

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ**

“ANÁLISIS DE LAS CARGAS EN EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN DE  
UN VEHÍCULO FORMULA SAE MEDIANTE EXTENSOMETRÍA  
ELÉCTRICA”

**TESIS DE GRADO PREVIA A  
LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO MECÁNICO  
AUTOMOTRIZ**

**AUTORES:**

DIEGO LEONARDO GONZÁLEZ PERALTA

EDWIN GEOVANNY NIVICELA PATIÑO

**DIRECTOR:**

ING. JÓNATAN POZO PALACIOS

**CUENCA, FEBRERO 2015**

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

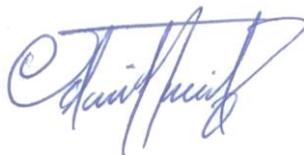
Nosotros Diego Leonardo González Peralta y Edwin Geovanny Nivicela Patiño, declaramos que el trabajo de grado que presentamos, es de nuestra autoría y basado en el proceso de investigación establecida en la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana.

A través de la presente declaración, cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo a la Universidad Politécnica Salesiana según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento, y la Normativa Institucional Vigente.

Cuenca, febrero de 2015



Diego Leonardo González Peralta



Edwin Geovanny Nivicela Patiño

## CERTIFICADO

Certifico que el presente proyecto de tesis “*Análisis de las cargas en el sistema de suspensión de un vehículo formula SAE mediante extensometría eléctrica*”, realizado por los estudiantes: Diego Leonardo González Peralta y Edwin Geovanny Nivicela Patiño, fue dirigido por mi persona.

Cuenca, febrero de 2015

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "J. Pozo", enclosed within a blue oval scribble.

Ing. Jónatan Pozo Palacios

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi madre por ser el pilar fundamental en mi vida, demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional, por ser un ejemplo a seguir que me ha llevado a cumplir con esta meta.

A mi hermana por estar siempre allí brindándome su cariño y apoyo en todas mi metas planteadas.

**Diego Leonardo González**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Julia y Luis que son y serán mi inspiración y mi brazo derecho en los buenos y malos momentos de mi vida, de los que me siento orgulloso y dichoso de tenerlos, por ser un ejemplo de vida, y sobre todo por ser grandes de corazón.

Quiero dedicarles a mis hermanos, por ser el complemento perfecto en mi vida, que siempre están pendientes de mi bienestar, y son mi mayor motivación..

Además quiero dedicar este trabajo a toda mi familia y amigos, que de una u otra manera me apoyaron, a quienes les tengo un gran aprecio y consideración.

**Edwin Geovanny Nivicela**

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente agradezco a Dios por permitirme llegar a cumplir esta meta.

A mi madre por brindarme la fortaleza y apoyo necesario para superar todos los obstáculos encontrados durante toda mi vida de estudiante.

A mi director de tesis, por su apoyo incondicional en el desarrollo del proyecto y por compartir sus conocimientos que permitieron la culminación del trabajo de tesis.

A los docentes de la Universidad Politécnica Salesiana, los mismos que hicieron posible la realización del proyecto.

**Diego Leonardo González**

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero agradezco a Dios por seguir bendiciendo mi vida, salud, trabajo y estudios, a mis padres Julia Patiño y Luis Nivicela por su apoyo incondicional, emocional, consejos y valores transmitidos, que me han permitido seguir alcanzando mis objetivos; a mis hermanos, por sus ánimos y alientos brindados.

Se agradece a la Universidad Politécnica Salesiana y a todos los profesores que supieron transmitir sus conocimientos de manera adecuada en cada asignatura dictada; a nuestro tutor de tesis, el ingeniero Jónatan Pozo por su colaboración y consejos en el proyecto fin de carrera

Mil gracias a todos los compañeros a lo largo de todo este periodo, especialmente un agradecimiento a mi compañero de este proyecto final Diego González, por aquellos momentos y anécdotas compartidas durante el proceso elaboración de este proyecto.

**Edwin Geovanny Nivicela Patiño**

## RESUMEN

En este trabajo de tesis se presenta el análisis de las cargas en el sistema de suspensión de un vehículo formula SAE mediante extensometría eléctrica.

Inicialmente se realiza una fundamentación teórica referente a extensometría eléctrica y deformaciones en materiales. Además se da a conocer los materiales que se utilizan para la implantación de las galgas extensiométricas en el elemento a medir.

Seguido de aquello en el capítulo II se da a conocer el sistema de suspensión que se encuentra en el vehículo formula SAE. Se indica el proceso adecuado para selección de las galgas, así como el correcto uso del equipo para la adquisición de datos, se detalla los elementos seleccionados para la instrumentación del prototipo. Así como se indica el proceso de instrumentación que se llevó a cabo en el vehículo.

En el capítulo III se indica todo lo referente al software para la adquisición de datos, detallando el funcionamiento de la tarjeta de adquisición utilizada, seguido de la utilización del software NI VISA. Este software nos permitirá la interacción de la PC con la DAQ.

Posteriormente se indica la adquisición de datos mediante Labview, así como la programación básica para guardar las señales en nuestra PC, reproducirlas y analizarlas en el capítulo final.

En el capítulo IV se realizan las pruebas en el vehículo Formula SAE, para ello se parte de una validación de los resultados medidos. La validación consiste en instrumentar una platina con galgas extensiométricas, medir su esfuerzo y comprobarlo con el esfuerzo calculado para obtener un rango de error entre las medidas calculadas y las tomadas experimentalmente.

Finalmente se realiza un análisis de los datos obtenidos y de las cargas a las que está expuesto el sistema de suspensión del vehículo formula SAE en las pruebas de frenado y curva.

# ÍNDICE

<b>Lista de Figuras</b> .....	XIII
<b>Lista de Tablas</b> .....	XVI

## CAPÍTULO I

### Fundamentación teórica de la extensometría eléctrica y el análisis de

<b>deformaciones</b> .....	1
1.1  Introducción.....	1
1.2  Definiciones.....	1
1.3  Deformación .....	2
1.4  Medición de deformaciones por medio de la extensometría eléctrica .....	3
1.5  Principio de funcionamiento de las galgas extensiométricas .....	3
1.5.1  Deformación axial.....	4
1.5.2  Deformación transversal.....	5
1.6  Características de las galgas extensiométricas .....	7
1.6.1  Rango .....	8
1.6.2  Ancho y longitud de la galga .....	8
1.6.3  Resistencia de la galga .....	9
1.6.4  Factor de la galga (GF) .....	9
1.6.5  Linealidad e histéresis .....	9
1.6.6  Material del elemento sensible de la galga .....	10
1.6.7  Material de respaldo o "carrier" .....	12
1.6.8  Fluencia.....	13
1.6.9  Deformación máxima.....	13
1.6.10  Comportamiento a la fatiga.....	13
1.6.11  Sensibilidad transversal.....	14
1.6.12  Influencia de la temperatura.....	14
1.6.13  Disipación de calor.....	15
1.6.14  Influencia de los campos magnéticos.....	15
1.7  Tipos de galga .....	16
1.7.1  Según su material del elemento sensible.....	16
1.7.2  Según su Geometría .....	18
1.8  Accesorios utilizados en la extensometría eléctrica .....	21

1.8.1	Materiales utilizados para la implantación de las galgas extensiométricas.....	21
1.8.2	Parámetros para la medición de deformaciones.....	23
1.9	Sumario .....	28

## **CAPÍTULO II**

	<b>Instrumentación del sistema de suspensión con extensometría eléctrica.....</b>	<b>29</b>
2.1	Introducción.....	29
2.2	Sistemas de suspensión del vehículo Formula SAE.....	29
2.3	Partes del sistema de suspensión de un vehículo formula SAE .....	30
2.3.1	Neumático .....	31
2.3.2	Brazos de suspensión, soporte de neumático-chasis .....	31
2.3.3	Push-rods y pull-rods .....	32
2.3.4	Rocker .....	33
2.3.5	Conjunto Muelle–Amortiguador .....	33
2.4	Parámetros que influyen en la suspensión de una vehículo Formulas SAE.....	33
2.5	Estado del arte del uso de extensometría en la automoción .....	35
2.6	Distribución de las cargas en los brazos de suspension y barras Pesh rod 356	
2.6.1	Fuerzas en los brazos de suspension y barra push rod delatnero .....	36
2.6.2	Fuerzas en los brazos de suspension y barra push rod posterior.....	36
2.7	Criterio de seleccion de los brazos de suspension y batras push rods a instrumentar.....	37
2.7.1	Numero de canales de medicion .....	37
2.7.2	Máximos esfuerzos en la suspension .....	38
2.8	Selección del puente de eheatstone .....	39
2.9	Selección de galgas y accesorios.....	41
2.9.1	Compromiso de selección .....	41
2.9.2	Serie y modelo de la galga extensiométrica.....	42
2.9.3	Longitud de la galga.....	44
2.9.4	Resistencia nominal de la galga .....	45
2.9.5	Almohadillas de conexión.....	45
2.9.6	Adhesivo .....	456
2.10	Equipos seleccionados.....	48

2.10.1	Galgas extensiométricas.....	48
2.10.2	Almohadillas de conexión.....	49
2.10.3	Adhesivo .....	50
2.10.4	Tarjeta de adquisición de datos .....	51
2.11	Proceso de instrumentación de la suspensión del vehículo Formula SAE..	51
2.11.1	Preparación de la superficie .....	52
2.11.2	Preparación de la galga extensiométrica.....	55
2.11.3	Pegado de la galga extensiométrica .....	57
2.11.4	Soldado de los terminales .....	59
2.11.5	Protección de la galga extensiométrica.....	59
2.12	Sumario .....	60

### **CAPÍTULO III**

<b>Implementación del software para la adquisición de datos .....</b>	<b>61</b>	
3.1	Introducción.....	61
3.2	Sistema de adquisición de datos .....	61
3.2.1	Sensor.....	62
3.2.2	Dispositivo DAQ.....	62
3.2.3	Ordenador.....	62
3.3	Uso del software controlador NI VISA.....	63
3.3.1	Reconocimiento de la tarjeta ENET-9219 en el equipo.....	64
3.3.2	Verificación de la tarjeta .....	65
3.3.3	Escala personalizada "CustomScaling" .....	65
3.3.4	Calibración de la galga.....	67
3.4	Visualización de los datos mediante LabView.....	67
3.4.1	DAQ Assistant y LabVIEW.....	68
3.4.2	Programación básica en Labview para visualizar la medición .....	70
3.5	Programación específica en Labview para visualizar la medición de esfuerzos en la suspensión.....	71
3.5.1	Programación para el almacenamiento de datos del vehículo SAE.....	71
3.5.2	Programación para la lectura de datos del vehículo SAE .....	71
3.6	Sumario .....	72

## **CAPÍTULO IV**

<b>Análisis de resultados</b> .....	73
4.1  Introducción.....	73
4.2  Inspecciones de funcionamiento .....	73
4.4.1  Inspección visual.....	73
4.4.2  Una inspección de carretera .....	74
4.3  Pruebas en el vehículo formula SAE.....	74
4.3.1  Prueba estática:.....	75
4.3.2  Pruebas dinámicas:.....	75
4.4  Análisis de las gráficas obtenidas.....	77
4.4.1  Análisis en el frenado.....	78
4.4.2  Análisis en curva .....	80
4.5  Representación de los datos obtenidos .....	81
4.5.1  Esfuerzos aplicados en las barras de suspensión del vehículo formula SAE.....	81
4.5.2  Cargas aplicadas en las barras de suspensión del vehículo fórmula SAE.....	81
4.5.3  Análisis del factor de seguridad en la suspensión del vehículo formula SAE.....	82
4.5.4  Datos experimentales obtenidosy calculados.....	83
4.6  Análisis de datos obtenidos .....	85
4.6.1  Prueba de frenado.....	85
4.6.2  Prueba en curvas. ....	86
4.7  Sumario .....	86
<b>CONCLUSIONES</b> .....	88
<b>TRABAJO FUTURO</b> .....	91
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	92
<b>ANEXO A</b> .....	95
<b>ANEXO B</b> .....	98

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1. <i>Relación de deformación unitaria y la deformación</i> .....	2
Figura 1.2. <i>Principio de funcionamiento galga extensiométrica</i> .....	4
Figura 1. 3 <i>Extensómetro eléctrico resistivo. Imagen modificada de</i> .....	7
Figura 1. 4 <i>Longitud de una galga extensiométrica</i> .....	8
Figura 1. 5 <i>Histéresis de una galga</i> .....	10
Figura 1. 6 <i>Constitución de una galga de hilo metálico</i> .....	17
Figura 1. 7 <i>Constitución de una galga de película metálica</i> .....	17
Figura 1. 8 <i>Representación esquemática de una banda extensiométrica semiconductora</i> .....	18
Figura 1. 9. <i>Galga uniaxial</i> .....	18
Figura 1. 10 <i>Galga biaxial</i> .....	19
Figura 1. 11 <i>Roseta rectangular</i> .....	20
Figura 1. 12 <i>Roseta delta</i> .....	20
Figura 1. 13 <i>Equipo de implantación</i> .....	23
Figura 1. 14 <i>Cadena de visualización de datos en la extensometría eléctrica</i> .....	23
Figura 1. 15 <i>Puente de Wheatstone</i> .....	24
Figura 1. 16 <i>Configuración cuarto de puente</i> .....	25
Figura 1. 17 <i>Configuración cuarto de puente para mejorar la medición</i> .....	25
Figura 1. 18 <i>Configuración del puente para mejorar la medición</i> .....	26
Figura 1. 19 <i>Configuración del puente para la compensación de temperatura</i> .....	26
Figura 1. 20 <i>Configuración de Puente Completo</i> .....	27
Figura 2. 1 <i>Sistema de suspensión del vehículo Formula SAE, UPS</i> .....	30
Figura 2. 2 <i>Neumático utilizado para la Formula SAE</i> .....	31
Figura 2. 3 <i>Brazos de suspensión del vehículo Formula SAE</i> .....	32
Figura 2. 4 <i>Suspensión esquematizada del vehículo Formula SAE</i> .....	32
Figura 2. 5 <i>Suspensión vehículo Formula SAE, UPS</i> .....	33
Figura 2. 6 <i>Transferencia de pesos longitudinal en un vehículo Formula SAE</i> .....	34
Figura 2. 7 <i>Transferencia de pesos lateral en un vehículo Formula SAE</i> .....	34
Figura 2. 8 <i>Cargas presentes en la suspensión delantera del vehículo Fórmula SAE.</i> .....	36
Figura 2. 9 <i>Cargas presentes en la suspensión posterior del vehículo Formula SAE37</i>	

Figura 2. 10 <i>Brazos instrumentados de la suspensión del vehículo Fórmula SAE</i> ....	38
Figura 2. 11 <i>Push rods instrumentados de la suspensión del vehículo Formula SAE</i>	38
Figura 2. 12 <i>Arreglo de puente para compensar la temperatura</i> .....	39
Figura 2. 13 <i>Arreglo de puentes con galgas extensiométricas para la compensación</i> .....	40
Figura 2. 14 <i>Configuración de puente utilizada para el vehículo Formula SAE</i> .....	40
Figura 2. 16 <i>Proceso para la selección de la serie y modelo de la galga</i> .....	43
Figura 2. 17 <i>Longitud activa de una galga extensiométrica</i> .....	44
Figura 2. 18 <i>Distribución del esfuerzo sobre una galga extensiométrica</i> .....	45
Figura 2. 19 <i>Especificaciones de las galgas serieSGD</i> .....	46
Figura 2. 20 <i>Especificaciones de las galgas serie SGD</i> .....	49
Figura 2. 21 <i>Especificaciones de las almohadillas de conexión BTP</i> .....	50
Figura 2. 22 <i>Limpieza buda (extracción de la pintura) de las barras de suspensión</i>	52
Figura 2. 23 <i>Suavizado de la superficie de las barras de suspensión</i> .....	52
Figura 2. 24 <i>Eliminación de grasa en las barras de suspensión</i> .....	53
Figura 2. 25 <i>Lijado en la superficie de las barras de suspensión</i> .....	54
Figura 2. 26 <i>Marcado de la superficie de las barras de suspensión</i> .....	55
Figura 2. 27 <i>Posicionamiento de la galga en el push-rod</i> .....	55
Figura 2. 28 <i>Alineación de la galga en el push-rod</i> .....	56
Figura 2. 29 <i>Proceso final de la preparación de la galga</i> .....	56
Figura 2. 30 <i>Aplicación del adhesivo</i> .....	57
Figura 2. 31 <i>Adhesión de la galga extensiométrica</i> .....	57
Figura 2. 32 <i>Aplicación de la presión en la galga extensiométrica</i> .....	58
Figura 2. 33 <i>Retirado de la cinta adhesiva</i> .....	58
Figura 2. 34 <i>Soldado de los terminales con ayuda de las almohadillas</i> .....	59
Figura 2. 35 <i>Protección de la galga extensiométrica</i> .....	59
Figura 3. 1 <i>Componentes de un sistema DAQ</i> .....	61
Figura 3. 2 <i>DAQ acoplado al vehículo Formula SAE</i> .....	62
Figura 3. 3 <i>Software utilizado en la adquisición de datos</i> .....	63
Figura 3. 4 <i>Encontrar un dispositivo DAQ conectado a la PC</i> .....	64
Figura 3. 5 <i>Selección de la tarjeta de adquisición de datos</i> .....	64
Figura 3. 6 <i>Dispositivos conectados al ordenador</i> .....	65
Figura 3. 7 <i>Verificación de la tarjeta ENET-9219</i> .....	65
Figura 3. 8 <i>Crear nueva escala</i> .....	66

Figura 3. 9 <i>Datos para lanueva escala</i> .....	66
Figura 3. 10 <i>Calibración de la galga</i> .....	67
Figura 3. 11 <i>Uso del DAQAssistant</i> .....	68
Figura 3. 12 <i>DAQAssistant</i> .....	68
Figura 3. 13 <i>Selección del canal de medición</i> .....	69
Figura 3. 14 <i>Parámetros de medida</i> .....	69
Figura 3. 15 <i>Programación de Labview para la visualización de resultados</i> .....	70
Figura 3. 16 <i>Programación para almacenamiento de un archivo de medición Labview</i> .....	71
Figura 3. 17 <i>Lectura de datos del vehículo Formula SAE ( Labview)</i> .....	72
Figura 4. 1 <i>Inspección visual del vehículo Formulas SAE, UPS</i> .....	74
Figura 4. 2 <i>Pista donde se realizaron las pruebas</i> .....	74
Figura 4. 3 <i>Adquisición de dato con el vehículo estacionado</i> .....	75
Figura 4. 4 <i>Prueba de frenado del vehículo Formula SAE</i> .....	76
Figura 4. 5 <i>Prueba en curva del vehículo Formula SAE</i> .....	76
Figura 4. 6 <i>Instrumentado del lado izquierdo del vehículo Fórmula SAE</i> .....	77
Figura 4. 7 <i>Barras instrumentadas de la suspensión del vehículo Formula SAE</i> .....	77
Figura 4. 8 <i>Deformación del brazo de suspensión delantero</i> .....	78
Figura 4. 9 <i>Deformación del brazo de suspensión posterior</i> .....	78
Figura 4. 10 <i>Deformación del push-rod delantero</i> .....	79
Figura 4. 11 <i>Deformación del push-rod posterior</i> .....	80
Figura 4. 12 <i>Deformación del brazo en curva</i> .....	80
Figura 4. 13 <i>Dimensiones de las barras de la suspensión (milímetros)</i> .....	82

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. 1 <i>Material utilizado en el elemento sensible de la galga</i> .....	11
Tabla 1. 2 <i>Material utilizado en la matriz portadora</i> .....	12
Tabla 1. 3 <i>La intensidad de flujo de un campo magnético</i> .....	15
Tabla 2. 1 <i>Adhesivos adecuados para cada material</i> .....	47
Tabla 2. 2 <i>Características de la galga extensométricaSGD-6/120-LY11</i> .....	49
Tabla 2. 3 <i>Característicasdel adhesivo SG496</i> .....	50
Tabla 2. 4 <i>Tarjeta de adquisición de datos NI ENET-9219</i> .....	51
Tabla 4. 1 <i>Características del material</i> .....	81
Tabla 4. 2 <i>Características del área de las barras de la suspensión del Formula SAE</i> .....	82
Tabla 4. 3 <i>Características de esfuerzos del material de la suspensión del Formula SAE</i> .....	82
Tabla 4. 4 <i>Datos del brazo posterior de la suspensión delantera del formula SAE</i> .	83
Tabla 4. 5 <i>Datos del brazo delantero de la suspensión posterior del Formula SAE</i> .	83
Tabla 4. 6 <i>Datos del push-rod de la suspensión delantera del Formula SAE</i> .	83
Tabla 4. 7 <i>Datos del push-rod de la suspensión posterior del Formula SAE</i> .	84
Tabla 4. 8 <i>Datos del brazo posterior de la suspensión delantera del formula SAE</i> .	84
Tabla 4. 9 <i>Datos del push-rod de la suspensión delantera del Formula SAE</i> .	84
Tabla 4. 10 <i>Resumen de los datos obtenido en frenado</i> .	85
Tabla 4. 11 <i>Resumen de los datos obtenido en curva</i> .	86

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA EXTENSOMETRÍA ELÉCTRICA Y EL ANÁLISIS DE DEFORMACIONES

### 1.1 Introducción

En este capítulo se presenta la fundamentación teórica con respecto a deformaciones mecánicas y extensometría eléctrica, así como el principio de funcionamiento en el que se basa una galga extensiométrica.

Posterior a eso se da a conocer las características que tienen las galgas extensiométricas utilizadas para la instrumentación, seguido del equipo utilizado para la implantación de estos sensores.

También se da a conocer los materiales utilizados para la implantación de las galgas en el elemento a medir. Finalmente se muestra una clasificación general de los equipos y componentes que intervienen en la cadena de medida de los esfuerzos y deformaciones presentes en una pieza.

### 1.2 Definiciones

A continuación se presentan algunas definiciones que serán utilizadas con mucha frecuencia en el posterior desarrollo de este capítulo, tales como:

**Esfuerzo**  $\left[\sigma = \frac{F}{A}\right]$ .- es la razón entre la fuerza aplicada sobre una superficie y el área de la misma.

**Coefficiente de Poisson**  $[\mu = -\epsilon_{transversal}/\epsilon_{longitudinal}]$ .-es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a las de estiramiento.

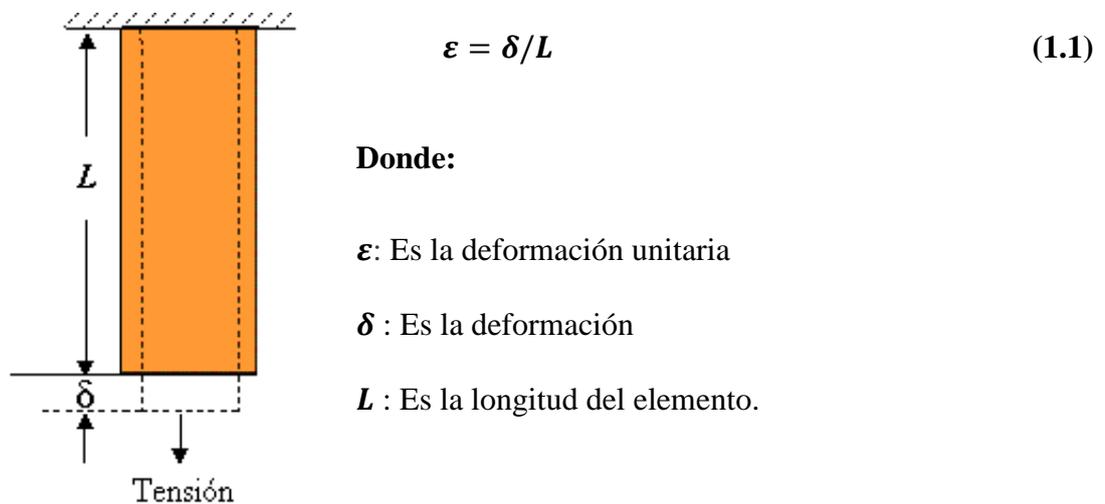
**Deformación unitaria** [  $\epsilon = \delta/L$  ].- es la variación en longitud por unidad de longitud que tiene un cuerpo cuando está sometido a una fuerza.

**El módulo de elasticidad o módulo de Young** [  $E = \sigma / \epsilon$  ].- se denomina módulo de elasticidad a la razón entre el incremento de esfuerzo y el cambio correspondiente a la deformación unitaria.

### 1.3 Deformación

A la deformación se le puede definir como el cambio de forma de un cuerpo, el cual puede ser debido a varios factores tales como, al esfuerzo al que está sometido dicho cuerpo, al cambio térmico, al cambio de humedad entre otras. En conjunción con el esfuerzo directo, la deformación se supone como un cambio lineal y se mide en unidades de longitud, mientras que en los ensayos de torsión se suele medir la deformación como un ángulo de torsión.

La ecuación que define la deformación unitaria que sufre un material cuando el mismo está expuesto a una carga axial es la mostrada a continuación:



**Figura 1. 1.** Relación de deformación unitaria y la deformación [1]

#### **1.4 Medición de deformaciones por medio de la extensometría eléctrica**

La extensometría eléctrica tiene por objeto la medida de las deformaciones que se producen en los cuerpos al ser sometidos a esfuerzos (mecánicos, térmicos). La demanda, siempre creciente, para el mejoramiento en el diseño de elementos y estructuras ha llevado al desarrollo y aplicación de la extensometría eléctrica como un método experimental que sustenta y apoya al diseño.

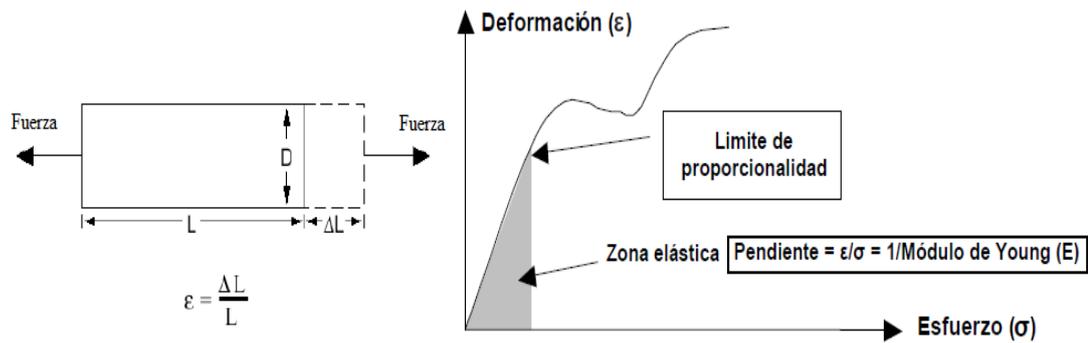
Existen varias clases de medidores de deformación entre ellos se encuentran los mecánicos, los cuales deben de cumplir ciertas características como:

- Medir con precisión los esfuerzos en condiciones estáticas dinámicas.
- De tamaño reducido, ligeros en peso y de espesor despreciable.
- Insensibles a los cambios de temperatura, y otras condiciones ambientales.
- De fácil instalación y operación.
- Que proporcionen una señal amplia y lineal como respuesta a la deformación.
- Adaptables a la observación y registro remotos.
- Gran estabilidad e histéresis despreciable.
- Económicos, seguros y exentos de fallas por envejecimiento y fatiga.

Las galgas extensiométricas están muy cerca de satisfacer todos estos requerimientos, son filamentos con una resistencia nominal que se adhieren a la superficie, de la cual se desea obtener información relacionada con la deformación sufrida.

#### **1.5 Principio de funcionamiento de las galgas extensiométricas**

El principio de funcionamiento se basa en el efecto piezorresistivo de metales y semiconductores, según el cual, su resistividad varía en función de la deformación a la que están sometidos, el material de que está hecho y el diseño adoptado.



**Figura 1.2.** Principio de funcionamiento galga extensiométrica [2]

### 1.5.1 Deformación axial

Ley de Hooke: en la zona elástica del material, la deformación unitaria  $\epsilon$  es proporcional a la tensión o esfuerzo  $\sigma$  :

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F/A}{E} \quad (1.2)$$

Además de la figura anterior sabemos que:

$$\epsilon = \frac{dl}{l} \quad (1.3)$$

Donde:

$\epsilon$ =Deformación unitaria. Aunque no tiene dimensiones, suele expresarse en *micro deformaciones* ( $1\mu \epsilon = 10^{-6}\text{m/m}$ ).

$F$ = Fuerza aplicada.

$E$ =Módulo de elasticidad o módulo de Young del material.

$A$ =Sección del hilo.

$\sigma = \frac{F}{A}$  = Esfuerzo axial.

### 1.5.2 Deformación transversal

Además de la deformación axial se produce una deformación transversal:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta D}{D} \quad (1.4)$$

Cuando el hilo se estira en dirección axial, el área de la sección transversal disminuye, ya que la masa total debe conservarse. La razón de la deformación lateral a la deformación axial también es una propiedad del material llamado “razón de Poisson”.

$$\nu = - \frac{\text{deformacion unitaria lateral}}{\text{deformacion unitaria axial}}$$

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{\text{lateral}}}{\varepsilon_{\text{axial}}}$$

Si se considera un hilo metálico de longitud  $L$ , sección transversal  $A$  y resistividad  $\rho$ , su resistencia eléctrica  $R$  es: [3]

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (1.5)$$

Si se le somete a un esfuerzo en dirección longitudinal, su resistencia  $R$  variará debido a los cambios dimensionales causados en  $L$ ,  $A$  y también  $\rho$ .

Si en la ecuación (1.5) aplicamos logaritmo natural a ambos lados de la expresión nos queda:

$$\ln R = \ln \left( \rho \cdot \frac{L}{A} \right) = \ln \rho + \ln L - \ln A$$

Diferenciando:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (1.6)$$

$\frac{dA}{A}$  = Variación de la sección del hilo cuando este se alarga efecto Poisson:

$$\frac{dA}{A} = -2\nu \frac{dL}{L}$$

Reemplazando en (1.6):

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} + 2\nu \frac{dL}{L} \quad (1.7)$$

Dividiendo ambos lados de la expresión para  $\frac{dL}{L}$  nos queda:

$$\frac{dR}{R} / \frac{dL}{L} = \frac{d\rho}{\rho} / \frac{dL}{L} + \frac{dL}{L} / \frac{dL}{L} + 2\nu \frac{dL}{L} / \frac{dL}{L}$$

Simplificando:

$$\frac{dR/R}{dL/L} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{dL/L} = K \quad (1.8)$$

En donde:

- 1 = Cambio en la resistencia debido un cambio en la longitud.
- $\frac{dR/R}{dL/L}$  = Factor de galga K
- $\nu$  = Cambio en la resistencia debido a un cambio en la sección.
- $\frac{\partial\rho/\rho}{\partial L/L}$  = Cambio en la resistencia debido al efecto piezorresistivo.

La variación que se genera en la resistencia de un medidor de deformación, se lo denomina factor de galga (GF) y es expresado como:

$$GF = \frac{dR/R}{dL/L} = \frac{dR/R}{\epsilon} = K \quad (1.9)$$

Para relacionar este valor con el esfuerzo aplicado nos referimos a la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F/A}{E}$$

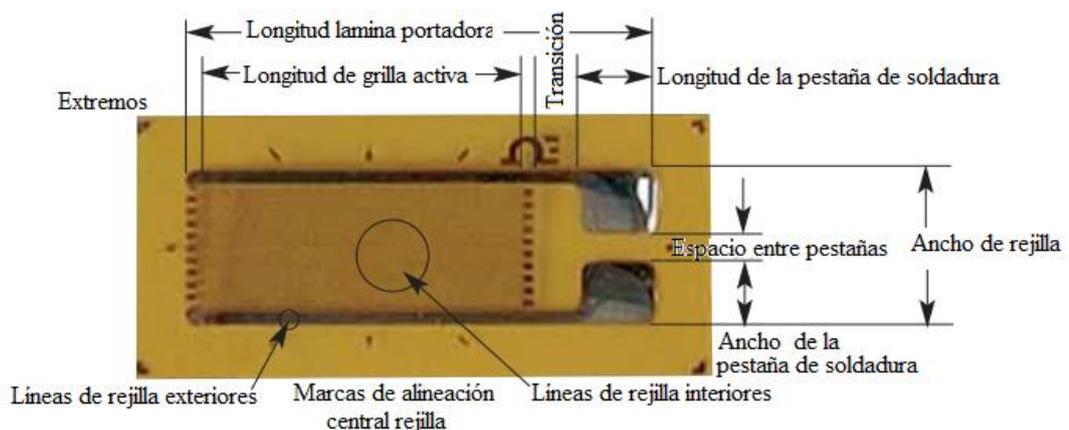
Remplazando la ecuación (1.2) en (1.9), y despejando  $\frac{dR}{R}$  tenemos:

$$\frac{dR}{R} = \frac{K \cdot F}{E \cdot A} \quad (1.10)$$

De esta manera queda comprobado, que una fuerza  $F$  aplicada a un conductor de sección transversal  $A$ , provocara una variación en su resistencia.

### 1.6 Características de las galgas extensiométricas

La construcción típica de un medidor de deformación metálico (véase figura 1,3), muestra un patrón de hoja metálica que se forma por el procedimiento de fotograbado de una película que previamente ha sido montada en una base plástica de resina flexible.



**Figura 1. 3.** Extensómetro eléctrico resistivo. Imagen modificada de [4]

A continuación se presenta los parámetros que caracterizan una galga extensiométrica, los mismos que nos ayudaran con la identificación de una galga en particular para una determinada aplicación.

### 1.6.1 Rango

Expresa los valores extremos de la variable a medir. Hay rango de entrada (refiriéndose a la señal mecánica) y otro de salida (refiriéndose a la señal eléctrica). En ocasiones se denomina alcance.

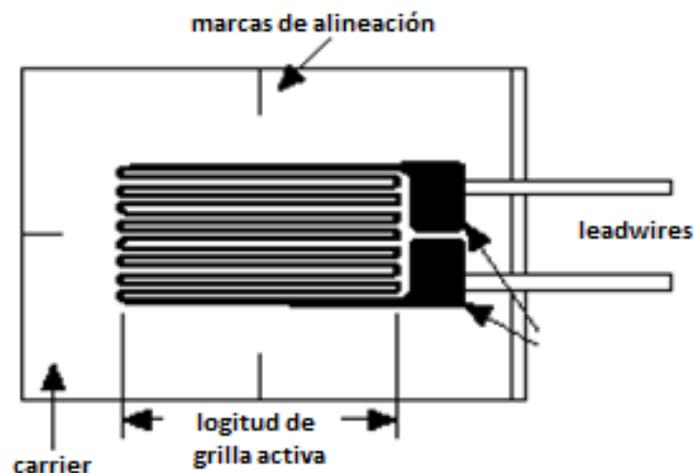
$$\text{Rango de entrada} = m_0 - m_1$$

$$\text{Rango de salida} = e_0 - e_1$$

### 1.6.2 Ancho y longitud de la galga

Tanto el ancho como la longitud son considerados teniendo en cuenta la dimensión del material, en donde la banda debe adaptarse. La longitud de la galga es la región activa o longitud de la grilla sensible al esfuerzo de una galga.

Los codos y almohadillas de soldadura no se consideran sensibles al esfuerzo debido a su gran sección transversal y su baja resistencia eléctrica. Para satisfacer las necesidades se ofrecen longitudes de galgas que van de 0.2mm a 100mm.



**Figura 1. 4.** Longitud de una galga extensiométrica [5]

### **1.6.3 Resistencia de la galga**

Un medidor de deformación metálico tiene una resistencia sin deformar cuyos valores nominales son de  $120\Omega$ ,  $350\Omega$  o  $1000\Omega$ , con tolerancias que oscila entre el 0.15% y el 0.8%, la deformación media por tensión del 2%, una deformación media por compresión de -1% y una temperatura máxima de operación de  $150^{\circ}\text{C}$ .

Es importante tener en cuenta que una galga con una mayor resistencia es preferible ya que reduce la generación de calor con el mismo voltaje aplicado, siempre y cuando no se afecte los otros factores de la galga, la corriente máxima de calibración se especifica entre  $15\text{ mA}$  a  $100\text{ mA}$ .

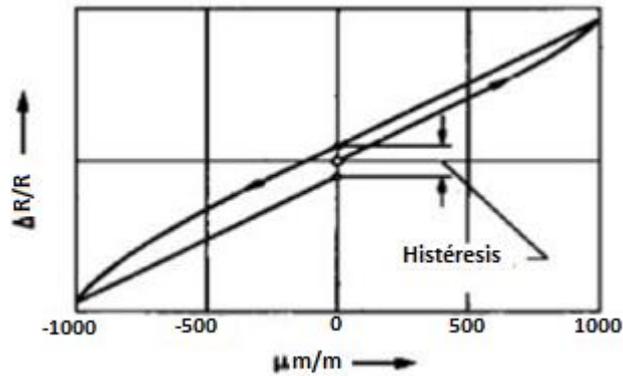
### **1.6.4 Factor de la galga (GF)**

El factor de galga es la sensibilidad al esfuerzo que tiene el sensor. Supongamos que una pieza de prueba sufre una deformación de  $500\mu\epsilon$ . Una galga extensiométrica con un factor de galga de 2 mostrará un cambio en su resistencia eléctrica de  $2 * (500 * 10^{-6}) = 0.1\%$ . Para una galga de  $120\Omega$ , es un cambio sólo de  $0.12\Omega$ . Para medir cambios tan pequeños de resistencia y compensar la sensibilidad térmica estos sensores son casi siempre utilizados en configuración puente con excitación externa.

El factor de galga (GF) es una constante característica de cada galga, siendo el fabricante quien generalmente proporciona este factor, que se determina en función de la aleación empleada para su fabricación.

### **1.6.5 Linealidad e histéresis**

La diferencia entre las medidas en reposo realizadas una después de un ensayo de tracción y otra después de un ensayo de compresión se conoce como histéresis.



**Figura 1. 5.** *Histéresis de una galga [4]*

La histéresis es un fenómeno en el que intervienen varios factores tales como los adhesivos que se utilicen, elemento portador y el elemento conductor de la galga.

Las galgas clásicas presentan una desviación en la linealidad del 0.1% hasta  $4000\mu\epsilon$  y del 1% hasta  $10000\mu\epsilon$  y la deformación máxima que admiten es de 20000 a  $25000\mu\epsilon$ .

### 1.6.6 Material del elemento sensible de la galga

El componente principal que determina las características de operación de una galga extensiométrica es la aleación sensible al esfuerzo que compone la grilla de papel metálico. Sin embargo, la aleación no es en todos los casos un parámetro de selección independiente.

A continuación se presentan una variedad de aleaciones del elemento sensible de las galgas extensiométricas [5].

- **Aleación A:** Constantán, una aleación de cobre y níquel, autocompensado por temperatura.
- **Aleación P:** Constantán templado.
- **Aleación D:** Aleación isoelástica de cromo y níquel.
- **Aleación K:** Aleación de cromo y níquel; Karma autocompensado por temperatura.

En la siguiente tabla se presentan los diferentes materiales de los que está construido el hilo conductor, así como las características que presentan y aplicaciones.

**Tabla 1. 1** *Material utilizado en el elemento sensible de la galga [5]*

<b>Material</b>	<b>Características</b>	<b>Aplicaciones</b>
<b>Aleación A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La más antigua y la más utilizada.</li> <li>• Relativamente insensible a la temperatura.</li> <li>• Alta sensibilidad al esfuerzo</li> <li>• Resistividad alta.</li> <li>• Costo económico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medidas con altas elongaciones.</li> </ul>
<b>Aleación P</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coste alto.</li> <li>• Es muy dúctil (permite que galgas con un longitud de 3mm o mayor puedan ser tensadas más del 20%).</li> <li>• Bajo grandes esfuerzos cíclicos, exhibe cambios permanentes.</li> <li>• No es recomendable para esfuerzos cíclicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medidas a altas temperaturas.</li> <li>• Para mediciones de esfuerzos muy grandes 5% (50000microstrain).</li> </ul>
<b>Aleación D</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precisan control de temperatura.</li> <li>• Alto factor de galga (aproximadamente 3.2).</li> <li>• No es usada normalmente en medidas estáticas.</li> <li>• Gran relación S/N.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medidas dinámicas (cuando no es necesario mantener estable una referencia cero).</li> <li>• Medidas de fatiga.</li> </ul>
<b>Aleación K</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autocompensación térmica</li> <li>• La soldadura de terminales es compleja.</li> <li>• Utilizada para mediciones estáticas.</li> <li>• Pueden ser expuestas a</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medidas a temperaturas bajas.</li> <li>• Medidas con temperatura variable o no controlada.</li> <li>• Estimaciones de</li> </ul>

	temperaturas altas como 40°C.	esfuerzos estáticos que actúan por largo tiempo, a temperatura ambiente.
--	-------------------------------	--

### 1.6.7 Material de respaldo o "carrier"

La confección de una galga extensiométrica se realiza mediante un grabado de papel metálico sobre un material de respaldo o "carrier".

A continuación se presenta una tabla con los distintos materiales de los que está construida la matriz portadora así como sus características y aplicaciones.

**Tabla 1. 2** *Material utilizado en la matriz portadora [5]*

Material	Características	Aplicaciones
<b>Poliamida</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es el soporte estándar.</li> <li>• Capaz de soportar grandes elongaciones.</li> <li>• Espesor habitual de 0.025mm.</li> <li>• Material de respaldo duro, extremadamente flexible.</li> <li>• Estas galgas son menos sensibles a daños durante la instalación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medidas tanto estáticas como dinámicas.</li> <li>• Aplicaciones habituales.</li> </ul>
<b>Epoxi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalación delicada.</li> <li>• Requiere mano de obra especializada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medidas precisas.</li> <li>• Medidas estáticas como dinámicas desde -269 hasta +269 °C.</li> </ul>
<b>Fibra de vidrio Reforzada con epoxi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soporta temperaturas moderadas.</li> <li>• Soporta muy bien el trabajo a fatiga.</li> <li>• La máxima elongación aceptable por el material es limitada al 1 o 2%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medidas cíclicas y de fatiga.</li> </ul>

### **1.6.8 Fluencia**

En una galga extensiométrica que está sometida a una carga constante, la misma trata de liberarse modificando su longitud en el sentido en el que se aplica la fuerza, esto puede ocasionar errores en la medida.

La fluencia puede verse afectada por distintos factores tales como:

- Forma y tipo de rejilla de la galga.
- Material soporte del elemento conductor.
- Elemento adhesivo utilizado (tipo y espesor).
- Tiempo durante el cual se aplica la carga.

### **1.6.9 Deformación máxima**

La deformación máxima que puede soportar una galga extensiométrica viene dado por las propiedades del elemento conductor, del elemento de soporte y del adhesivo que se utilice en la colocación de este transductor.

La deformación límite que puede soportar una galga viene indicada en forma porcentual y suele oscilar entre el 0.15% como valor más bajo y 5% como valor más alto, aunque también se fabrican galgas que alcanzan hasta el 20% y 25%.

### **1.6.10 Comportamiento a la fatiga**

Los repetidos ciclos de funcionamiento de una galga extensiométrica pueden producir un deterioro tanto en el elemento adhesivo, como las conexiones, y el elemento resistivo, provocando una variación del factor de galga.

Las galgas extensiométricas son capaces de soportar entre unos  $10^5$  y  $10^7$  ciclos, siempre y cuando se tenga en cuenta que las galgas trabajan siempre en su zona elástica. El tamaño y la forma de las galgas influyen, obteniendo mayor resistencia a

la fatiga las galgas de mayor tamaño. Esta característica se debe de tenerse en cuenta en ensayos dinámicos con una frecuencia de carga y descarga elevada.

#### **1.6.11 Sensibilidad transversal**

Las galgas están fabricadas para trabajar siempre en una dirección determinada de acuerdo a su diseño, pero sin embargo se produce una pequeña deformación en dirección transversal con respecto al sentido longitudinal de la galga, lo que varia la resistencia de la misma, este valor viene dado por el fabricante en forma porcentual que suele ser menor del 1%.

#### **1.6.12 Influencia de la temperatura**

El cambio de temperatura durante el periodo de ensayo, es un factor que se debe tener en cuenta para distinguir si la variación de resistencia medida se debe a la deformación aplicada o a la variación de temperatura.

Cuando cambia la temperatura en la que se encuentra la galga, ocurren cuatro efectos que modifican sus características:

- Varía el valor del factor de galga  $K$ .
- La rejilla se alarga o se contrae.
- El material soporte de la galga, se alarga o contrae.
- Cambia la resistencia de la galga, ya que debido a la variación de temperatura, se altera el valor de la resistividad del hilo de la rejilla.

El cambio en el factor de galga para una banda realizada con *constantán* (aleación denominada también *advance*), es decir una galga estándar, es del orden de 0,00735% por °C, por lo que puede despreciarse este efecto.

En ensayo de tensiones térmicas de materiales, son posibles grandes variaciones de temperatura y debe corregirse el valor de  $K$ .

### 1.6.13 Disipación de calor

La temperatura de la banda, no solo está influenciada por la temperatura ambiente, sino también por la potencia disipada en la banda cuando se conecta al circuito eléctrico de medida (puente de Wheatstone). La potencia  $P = R \cdot I^2$  ( $R$ : resistencia de la banda,  $I$ : corriente que circula por ella), es disipada en forma de calor.

### 1.6.14 Influencia de los campos magnéticos

La presencia de campos magnéticos durante las medidas con galgas extensiométricas puede alterar los resultados debido a efectos de la magnetostricción<sup>1</sup> y la magnetorresistencia<sup>2</sup>.

Para evitar este efecto existen galgas no inductivas gracias a la forma del elemento conductor o a un apantallamiento. Los cables de conexión también se ven sometidos a este fenómeno, por lo cual es conveniente utilizar cables no inductivos o magnéticamente apantallados cuando se sospecha de la presencia de campos magnéticos.

Los sistemas de alimentación y amplificación basados en modulación de frecuencia permiten eliminar por filtrado las interferencias creadas por campos magnéticos. Utilizando sistemas de compensación, como por ejemplo configuraciones del puente de Wheatstone de  $\frac{1}{2}$  puente, se consigue amortiguar los efectos de la presencia de los campos magnéticos.

**Tabla 1. 3** *La intensidad de flujo de un campo magnético [6]*

Densidad de flujo en militesla [mT]	Elementos generadores de campos magnéticos
Bajo ( $\leq 2$ )	A 1m de distancia de transformadores, tubos fluorescentes y cables de alta intensidad; motores

<sup>1</sup>Magnetostricción: Cambio de las dimensiones de un material ferromagnético por la acción de un campo magnético.

<sup>2</sup>Magnetorresistencia: Propiedad que tienen algunos conductores metálicos o semiconductores de variar su resistencia eléctrica por la acción de campos magnéticos.

	eléctricos entre 2 y 4m de distancia.
<b>Medio (2 a 50)</b>	Todos los aparatos mencionados en el apartado anterior a menos de 1m; soldadores eléctricos entre 15cm y 2m de distancia; seccionadores de barras, cables conexiones etc. con una corriente $\geq 5000A$ entre 3 y 15m de distancia, y una corriente de 1000 A hasta 2m de distancia.
<b>Alto (50 a 3200)</b>	A 3m de distancia de mesas de vibración junto a motores eléctricos y generadores.

## 1.7 Tipos de galga

Se presenta una clasificación de los diferentes tipos de galgas extensiométricas que existen, de acuerdo al material del que esta construidos el elemento sensible y de acuerdo a la geometría de construcción de estos sensores.

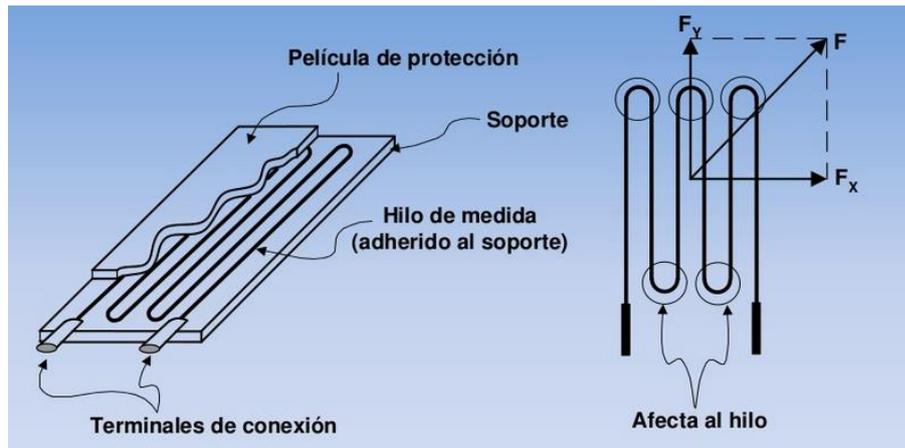
### 1.7.1 Según su el material del elemento sensible

#### *Galgas Metálicas*

Las galgas metálicas se constituyen por una base muy delgada, a la cual se le adhiere un elemento sensible muy fino, el mismo que puede ser en forma de hilo metálico o película metálica.

##### **a. Galgas de hilo metálico "wire strain gauge"**

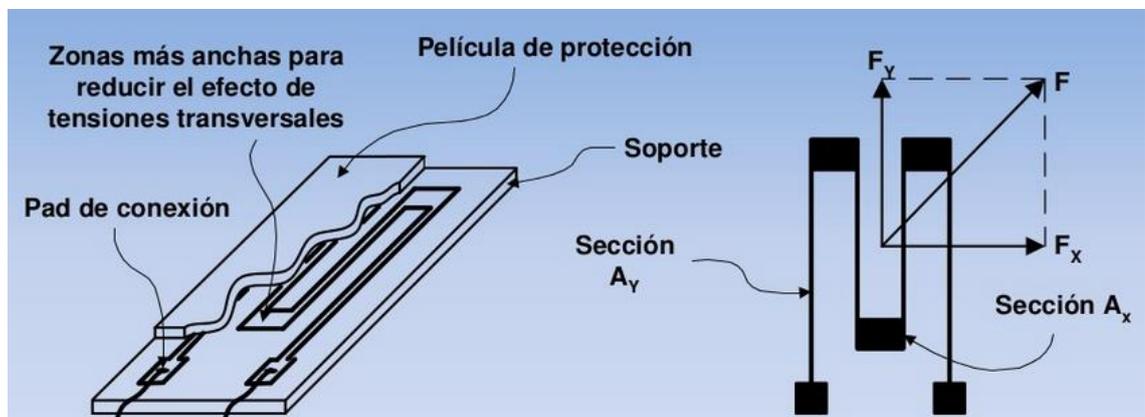
El elemento sensible es un hilo conductor metálico con una sección circular de 0.025mm de diámetro y encolado sobre una base aislante de resina epoxíca o poliéster.



**Figura 1. 6.** *Constitución de una galga de hilo metálico [7]*

### b. Galgas de película metálica "foil strain gauge"

Esta clase de galgas tiene una característica de fabricación similar a los circuitos impresos que tienen bases flexibles. Se desarrollan por el medio de creación de placas utilizando fotografías, llamado el método de fotograbado. Se conforman por una película de protección, un soporte, un pad de conexión y de zonas anchas para reducir el efecto de tensiones transversales.

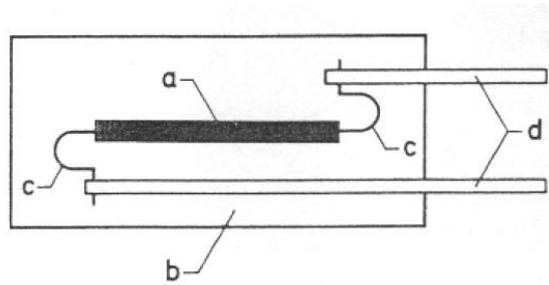


**Figura 1. 7.** *Constitución de una galga de película metálica [7]*

### Galgas semiconductoras

En las galgas semiconductoras hay un elemento semiconductor en vez del hilo metálico, generalmente estas construidas con materiales como el silicio y germanio. Las galgas semiconductoras pueden ser del tipo N o P.

Estas galgas presentan factor GF alto en comparación con las galgas metálicas, de la misma forma tiene un costo más elevado.



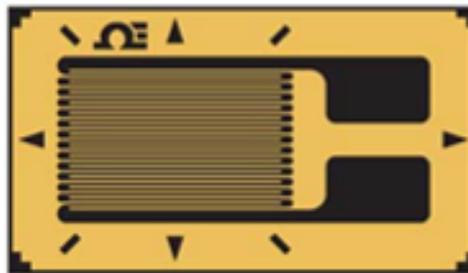
**Figura 1. 8.** Representación esquemática de una banda extensiométrica semiconductor [6]

El elemento de medida está formado por una tira de escasas décimas y centésimas de milímetro de anchura y grosor respectivamente, que se fija a una lámina portadora aislante y que está provista de conexiones.

### 1.7.2 Según su Geometría

#### Galgas extensiométricas uniaxiales

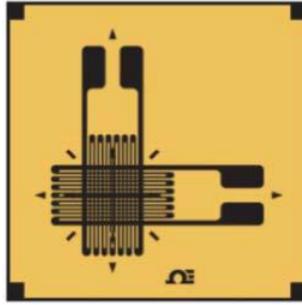
Este tipo de galgas miden deformaciones en una sola dirección, son casi insensibles a deformaciones transversales, por lo que son utilizadas para medir deformaciones simples en orientación de los esfuerzos principales.



**Figura 1. 9.** Galga uniaxial [8]

#### Galgas extensiométricas biaxiales

La constitución de este tipo de galgas permite la medición de esfuerzos simultáneamente en dos direcciones, son más precisas que las galgas de tipo uniaxiales.



**Figura 1. 10.** Galga biaxial [9]

### **Galgas extensiométricas tipo roseta**

Se refiere a sensores que están constituidos por tres galgas extensiométricas, utilizadas para medir el estado de deformaciones de un material en el plano. Este tipo de galgas nos permiten obtener la deformación normal en  $x$  ( $\epsilon_x$ ), la deformación normal en  $y$  ( $\epsilon_y$ ) y la deformación cortante en el plano ( $\gamma_{xy}$ ).

Los valores de deformación que se obtiene en la roseta son  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_b$  y  $\epsilon_c$ , para obtener los valores de  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  y  $\gamma_{xy}$ , es necesario resolver las siguientes ecuaciones:

$$\epsilon_a = \epsilon_x \cdot \cos^2 \theta_a + \epsilon_y \cdot \text{sen}^2 \theta_a + \gamma_{xy} \cdot \text{sen} \theta_a \cdot \cos \theta_a \quad (1.11)$$

$$\epsilon_b = \epsilon_x \cdot \cos^2 \theta_b + \epsilon_y \cdot \text{sen}^2 \theta_b + \gamma_{xy} \cdot \text{sen} \theta_b \cdot \cos \theta_b \quad (1.12)$$

$$\epsilon_c = \epsilon_x \cdot \cos^2 \theta_c + \epsilon_y \cdot \text{sen}^2 \theta_c + \gamma_{xy} \cdot \text{sen} \theta_c \cdot \cos \theta_c \quad (1.13)$$

Aunque pueden crearse infinidad de combinaciones para el arreglo de galgas, existen dos que son las más utilizadas: la roseta rectangular y la roseta delta.

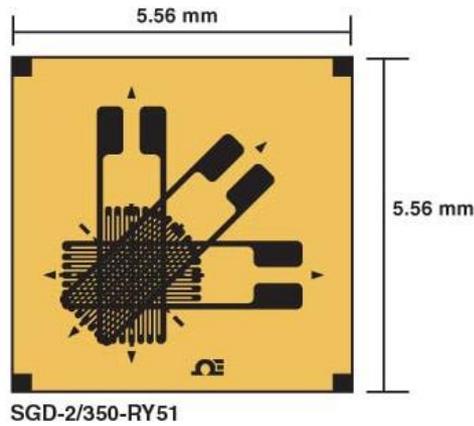
### **Roseta rectangular**

Sus galgas están arregladas de manera que una roseta se encontrará en posición horizontal, una en posición vertical la última a un ángulo de  $45^\circ$ . Con este arreglo de galgas, las deformaciones que conseguirán medir serán las que se muestran a continuación:

$$\epsilon_x = \epsilon_a \quad (1.14)$$

$$\epsilon_y = \epsilon_c \quad (1.15)$$

$$\gamma_{xy} = 2\epsilon_b - (\epsilon_a + \epsilon_b) \quad (1.16)$$



**Figura 1. 11.** Roseta rectangular [10]

### Roseta delta

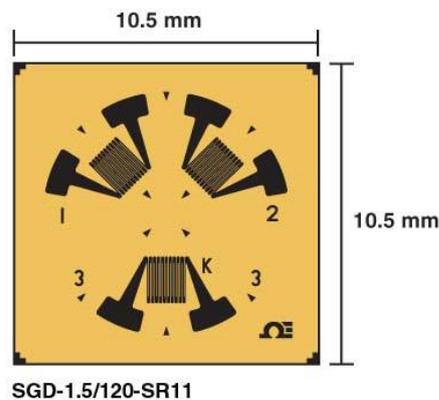
Sus galgas están posicionadas con una diferencia de 60° entre sí, por lo que habrá una en posición horizontal, otra a 60° y, por último, una al 120°.

Con este arreglo de roseta las deformaciones en los ejes son las siguientes:

$$\epsilon_x = \epsilon_a \quad (1.17)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{3}(2\epsilon_b + 2\epsilon_c - \epsilon_a) \quad (1.18)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2}{\sqrt{3}}(\epsilon_b + \epsilon_c) \quad (1.19)$$



**Figura 1. 12.** Roseta delta [11]

## **1.8 Accesorios utilizados en la extensometría eléctrica**

Para obtener resultados adecuados y reducir errores en la instrumentación se deben utilizar los accesorios adecuados tanto al momento de la implantación como al momento de la medición.

### **1.8.1 Materiales utilizados para la implantación de las galgas extensiométricas**

Para la implantación de las galgas extensiométricas en el elemento a medir, se utilizan diversos accesorios, los mismos que se los han agrupado en distintas fases, estas fases están a su vez agrupadas de acuerdo a la función que cumplen en el proceso.

#### **Materiales utilizados en la preparación del material a instrumentar**

Se debe dar un tratamiento a la superficie del material antes de realizar la colocación de las galgas extensiométricas con el fin de conseguir una superficie limpia de cualquier contaminante, así como libre de imperfecciones físicas que pudiesen afectar al correcto funcionamiento de las galgas.

Los materiales comúnmente utilizados para la preparación de la superficie son los siguientes:

- **Lijas:** Se recomienda la utilización de lijas #180 para acero, y #360 para aluminio, su misión es reducir las imperfecciones en la superficie del material para una mejor adhesión de la galga.
- **Acetona:** Se le utiliza como removedor de contaminantes tales como aceite o grasa que se encontrase en la superficie del material.
- **Neutralizador:** Es utilizado como limpiador de la superficie en caso que la misma se encuentre contaminada con algún compuesto químico.

### **Materiales utilizados en el pegado de la galga**

En esta fase la galga es adherida a la superficie del material, mediante la utilización de un adhesivo especial. Para un correcto pegado de la galga se utilizan los siguientes materiales:

- **Pinzas:** Se utiliza para impedir el contacto directo de las galgas con posibles contaminantes que existieren en el entorno como puede ser la grasa de los dedos entre otros.
- **Cinta adhesiva:** Se le utiliza para ubicar correctamente las galgas en la dirección y posición establecidas.
- **Adhesivo:** Se utiliza para adherir la galga a la superficie del material.

### **Materiales utilizados en el soldado de terminales**

Los terminales así como las galgas en general tienen medidas bastante pequeñas, por lo que se debe tener cuidado en el proceso de soldado para evitar dañar cualquier elemento. Los materiales que se utilizan en este proceso son los siguientes:

- **Terminales para las galgas:** Estos nos sirven como apoyos donde se pueden soldar los filamentos de las galgas con el cable que llevará la señal, a su vez que ayudará a evitar tensiones en la galga por movimientos en los cables. Estos terminales se encontrarán adheridos a la superficie del material a una distancia de aproximadamente 1.6mm del extremo de la galga.
- **Cautín:** El cautín se lo utiliza para unir los filamentos de la galga a los terminales, y a su vez estos elementos a los cables que son los encargados de llevar la señal al equipo de adquisición de datos
- **Estaño:** Es el material de aportación que se utiliza para soldar los cables y terminales.
- **Cable:** La mayoría de fabricantes sugieren utilizar cables AWG #20 al #28.

### Materiales utilizados en la protección de la galga

Una vez que se han realizado los procesos anteriormente mencionados, se debe de recubrir tanto la galga, como los terminales de agentes externos que pudiesen contaminar y deteriorar a la galga y sus conexiones.

El compuesto y técnica que se utilice en la protección de la galga depende del ambiente en que se encuentre instalada la misma, siendo en algunos casos posible la instalación de la galga sin ninguna protección posterior.

**Barniz de recubrimiento:** En general se requiere de al menos un barniz protector para la mayoría de aplicaciones, también podría llegar a requerirse una capa de silicón para protección mecánica y cera para protección contra humedad.



Figura 1. 13. Equipo de implantación

### 1.8.2 Parámetros para la medición de deformaciones

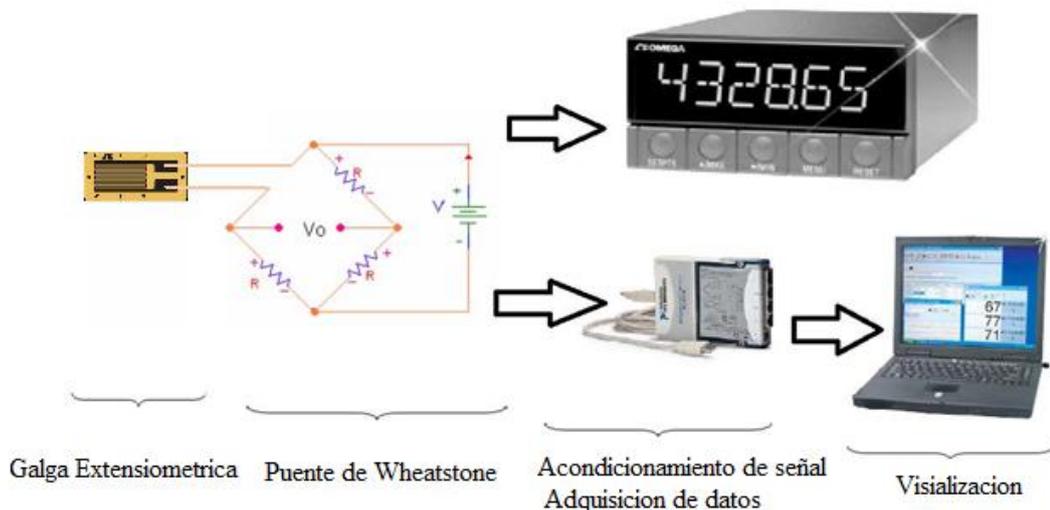


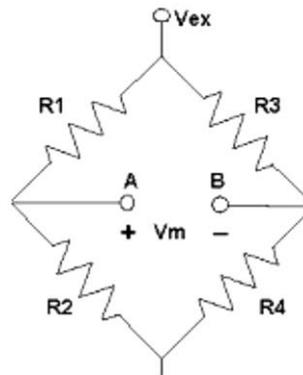
Figura 1. 14. Cadena de visualización de datos en la extensometría eléctrica [12]

### Galgas extensiométricas

Estas se fijan en los puntos donde se desee realizar la medición y actúan como sensores.

### Puente de Wheatstone

El Puente de Wheatstone es el encargado de proporcionar el voltaje de excitación necesaria a las galgas extensiométricas, así como permitir tomar las medidas de variación de voltaje en sus bornes de salida A y B representados en la siguiente figura.



**Figura 1. 15.** *Puente de Wheatstone* [13]

El puente se encuentra balanceado, de manera que el voltaje en los terminales A y B debe ser cero. Cuando existe una variación en cualquiera de las resistencias también existe una diferencia de potencial en los terminales de salida, siendo esta tensión proporcional al cambio en la resistencia.

El voltaje existente entre los terminales de salida A y B, está dado por la siguiente expresión:

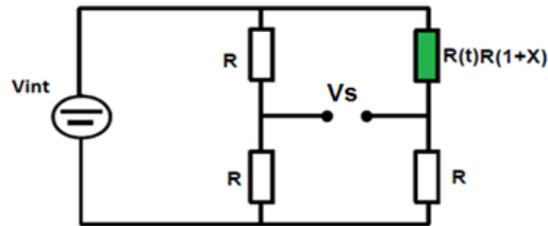
$$V_m = V_{ex} \left( \frac{R_2}{R_2 + R_1} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} \right) \quad (1.20)$$

Las galgas extensiométricas pueden estar colocadas en una, varias, o incluso todas las ramas del puente de Wheatstone, en las ramas que no se encuentren colocadas las galgas se colocarán resistencias fijas de alta exactitud, estabilidad y precisión.

De acuerdo al número de ramas que ocupen las galgas extensiométricas tenemos varias configuraciones del puente, entre ellas la de cuarto de puente, medio puente y puente completo, representados en la siguiente figura.

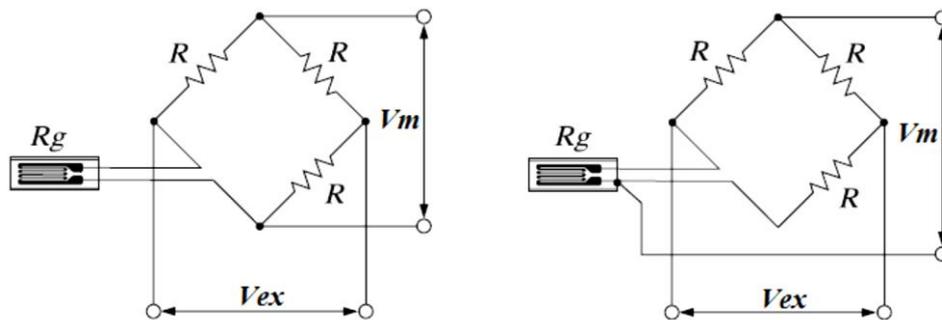
**a. Configuración de Cuarto de Puente**

El puente de Wheatstone en configuración cuarto de puente se caracteriza por tener una baja sensibilidad, esta configuración utiliza una sola galga colocada a una rama como se indica en la siguiente figura.



**Figura 1. 16.** Configuración cuarto de puente

Las ramas que no contienen galgas extensiométricas constan de resistencias fijas, esto a de más de provocar una baja sensibilidad también provoca que una variación de temperatura afecte al equilibrio del puente ya que haría variar la resistencia solo de la rama donde se encuentre la galga.



**Figura 1. 17.** Configuración cuarto de puente para mejorar la medición

a) Conexión de dos cables, b) Conexión de tres cables [14]

Generalmente se utiliza una conexión de tres cables para compensar la resistencia que generan los cables que unen la galga extensiométrica con el resto del puente.

### b. Configuración de medio puente

Esta configuración utiliza dos galgas, las mismas que van a mejorar la sensibilidad de la medición, así como compensar los efectos de la temperatura.

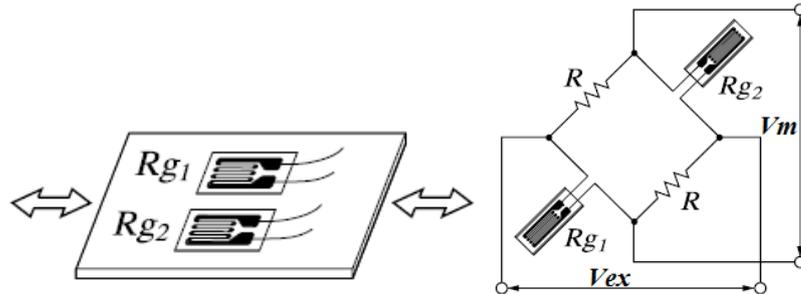


Figura 1. 18. Configuración del puente para mejorar la medición [14]

La compensación de la temperatura se obtiene al ocupar una segunda galga (galga inactiva) en dirección transversal a la primera, de manera que cualquier cambio de temperatura que se produzca afecten de manera similar a ambas galgas.

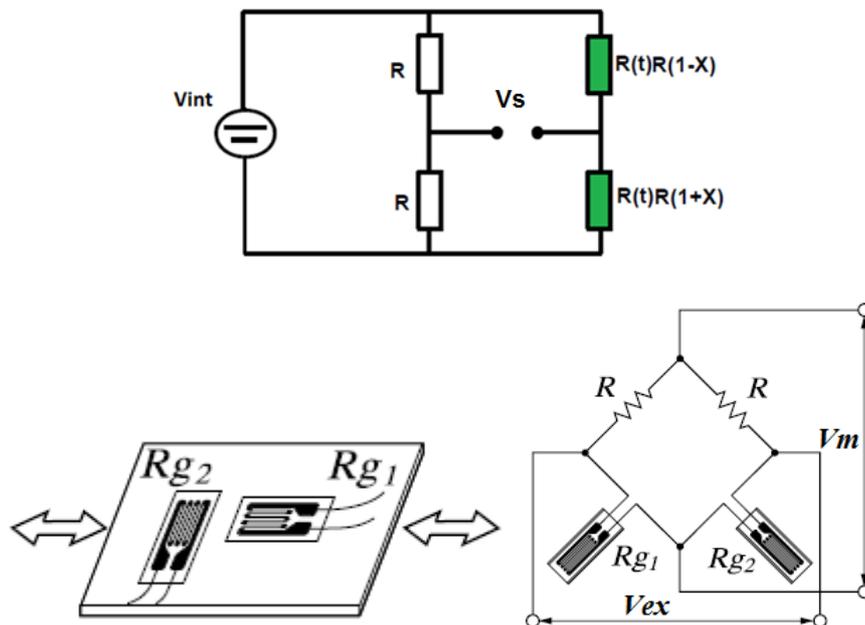
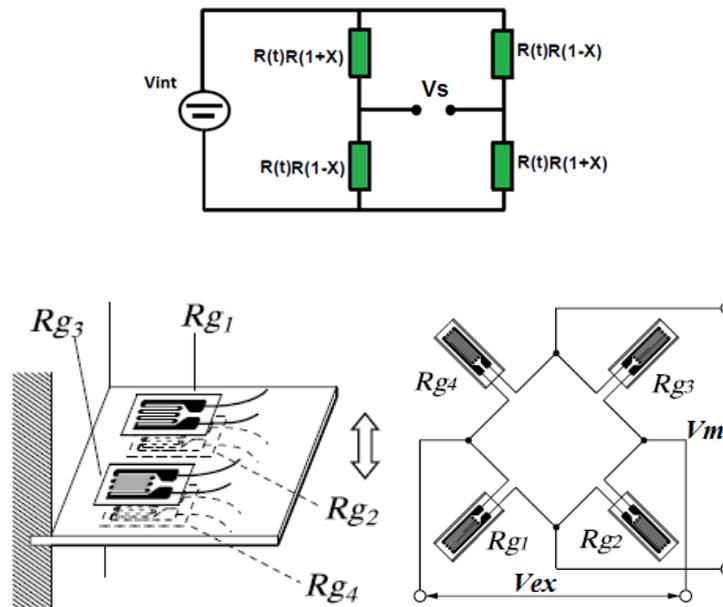


Figura 1. 19. Configuración del puente para la compensación de temperatura [14]

### c. Configuración de puente completo

En esta configuración se utilizan cuatro galgas extensiométricas cada una de ellas colocada a cada rama del puente, mejorando aún más la sensibilidad de la medición, así como la compensación de la temperatura.



**Figura 1. 20.** Configuración de Puente Completo [14]

### Acondicionamiento de la señal

Para una correcta visualización de los resultados se necesita un acondicionamiento de la señal, esto se logra gracias a equipos que realizan las funciones de amplificación, filtrado, aislamiento eléctrico y multiplexado.

A continuación se explican algunos acondicionamientos que realizan los equipos de adquisición de datos:

- **Excitación:** El equipo de medición o la tarjeta de adquisición son los encargados de proveer la fuente de poder para el funcionamiento de las galgas.
- **Terminación del puente:** Lo que realiza el equipo es completar el puente con resistencias internas, cuando la configuración es de  $\frac{1}{4}$  o  $\frac{1}{2}$  puente.
- **Amplificación:** Debido a que la señal de salida de las galgas es débil, se requiere de una amplificación. Con lo que se consigue maximizar la eficiencia del equipo así como la obtención de mediciones más precisas.

- **Filtrado:** Se filtra la señal con el fin de reducir ruido eléctrico o cualquier componente de frecuencia no deseada que afecte a la medición.
- **Aislamiento eléctrico:** Los medidores y tarjetas de adquisición de datos tienen sistemas de aislamiento y atenuación para evitar señales de voltaje fuera de rango.
- **Multiplexado:** El multiplexado nos permite enviar secuencialmente un cierto número de señales a un solo digitalizador.

### **Visualización**

Luego de un adecuado acondicionamiento de la señal, se llega a un último paso que es la visualización de resultados. Esto consiste en visualizar con la ayuda de un software la deformación de la galga extensiométrica que se encuentra sometida a un esfuerzo.

El software que se utiliza para la adquisición y manejo de datos por lo general es el LABVIEW, mismo que permitirá leer los datos proporcionado por la tarjeta de adquisición y mostrarnos en un computador.

### **1.9 Sumario**

En este capítulo se revisaron los conceptos fundamentales sobre deformación mecánica y extensometría eléctrica, dando a conocer el principio de funcionamiento de una galga extensiométrica y las características que definen a este sensor. Se dio a conocer el equipo que se utiliza tanto para la implantación, como para la adquisición de datos que nos proporcionan estos medidores de tensión.

En el capítulo siguiente se dará a conocer la selección de la galga adecuada, a la vez se detallara la instrumentación de la suspensión del vehículo Formula Student mediante estos sensores.

## **CAPÍTULO II**

# **INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN CON EXTENSOMETRÍA ELÉCTRICA**

### **2.1 Introducción**

En este capítulo se realizara la instrumentación de la suspensión del vehículo Formula SAE mediante extensometría eléctrica. Se da criterios de selección de los adecuados equipos, así como el procedimiento para la colocación de las galgas extensiométricas en la suspensión.

Antes de realizar la instrumentación del sistema de suspensión, se debe tener claro el tipo, características y funcionamiento de la suspensión que se va a instrumentar. Para ello se da inicialmente una generalización de lo referente al sistema de suspensión Formula SAE.

Finalmente se detalla el proceso de instrumentación en la suspensión del vehículo Formula SAE con el equipo adecuado.

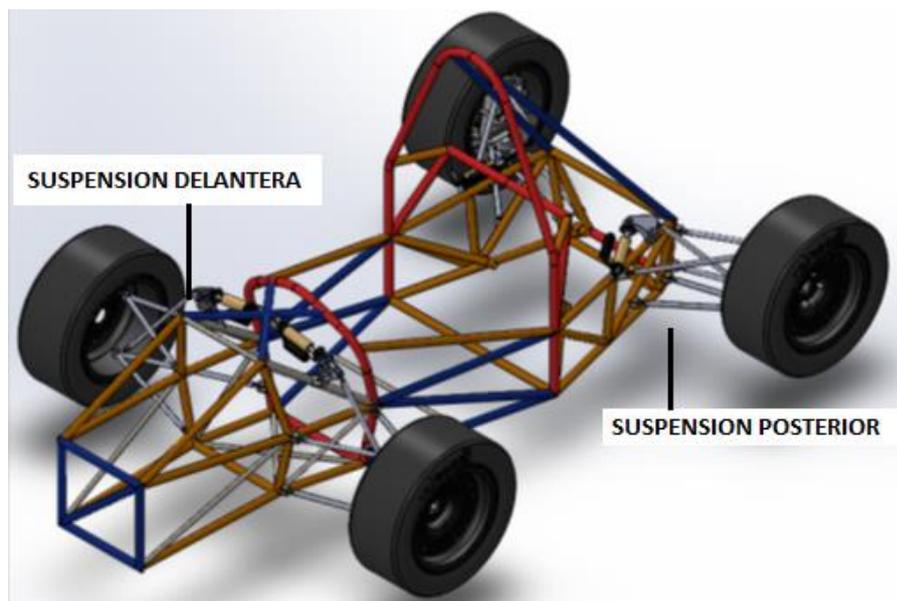
### **2.2 Sistemas de suspensión del vehículo Formula SAE**

Antes de abarcar el tema de instrumentación de la suspensión en el vehículo Formula SAE, debemos tener clara la idea de la suspensión en la que vamos a trabajar.

La suspensión de un monoplaza tiene la función de “absorber” las desigualdades del circuito sobre el que se desplaza manteniendo aislado al chasis, además mantener de forma óptima el contacto de las ruedas con la pista, proporcionando un adecuado nivel de confort y seguridad de marcha. [15]

Sus funciones principales son las siguientes:

- Mantener una correcta altura del vehículo durante la conducción.
- Absorber esfuerzos y vibraciones generados por las irregularidades de la pista, y que estos no sean transmitidos al bastidor.
- Control direccional del vehículo.
- Mantener el contacto del neumático con la carretera (adherencia).
- Mantener la posición de los neumáticos y la geometría de la dirección.
- Resistir el balanceo de la carrocería.



**Figura 2. 1.** Sistema de suspensión del vehículo Formula SAE, UPS

*Fuente: UPS Racing Team*

### **2.3 Partes del sistema de suspensión de un vehículo formula SAE**

Cuando se habla de suspensiones existe un concepto muy importante que es el de masa suspendida y masa no suspendida. La masa no suspendida son todas las partes que, incluyendo la rueda, sirve para filtrar las irregularidades del terreno, mientras que la masa suspendida es el resto de las partes del coche.

Los componentes que se encuentran dentro de la parte no suspendida, y que constituyen la suspensión son:

- Neumático.
- Brazos de suspensión, soporte de neumático-chasis.
- Muelle.
- Amortiguador.
- Barra estabilizadora, este componente es opcional.

### 2.3.1 Neumático

El neumático es el primer componente de la suspensión, y el único que tiene contacto directo con el piso. Debe ser capaz de absorber las primeras irregularidades de la pista proporcionando, además, la adherencia transversal y longitudinal necesarias para que el coche mantenga con seguridad la velocidad de paso por curva necesaria.



**Figura 2. 2.** *Neumático utilizado para la Formula SAE [16]*

### 2.3.2 Brazos de suspensión, soporte de neumático-chasis

Son los encargados de unir la masa no suspendida con el chasis, estos suelen tener forma de "A". Los puntos de unión entre los brazos (*wishbones*) y la mangueta deben ser los puntos de convergencia de los brazos, o vértice del triángulo, de modo que los brazos trabajen sólo a tracción y a compresión, y nunca a flexión. Hay un brazo superior y otro inferior por cada rueda.



**Figura 2. 3.** Brazos de suspensión del vehículo Formula SAE

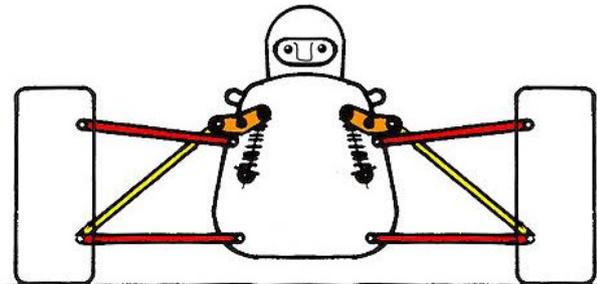
a) Brazo de suspensión frontal b) Brazo de suspensión posterior

*Fuente: UPS Racing Team*

### 2.3.3 Push-rods y pull-rods

Cuando se utiliza una suspensión abordo, normalmente se considera la actuación del conjunto resorte amortiguador, a través de un sistema de barra (push/pull rod) y un balancín (rocker).

Un sistema de *Push-Rods* es relativamente sencillo y se lo puede apreciar en la siguiente figura:



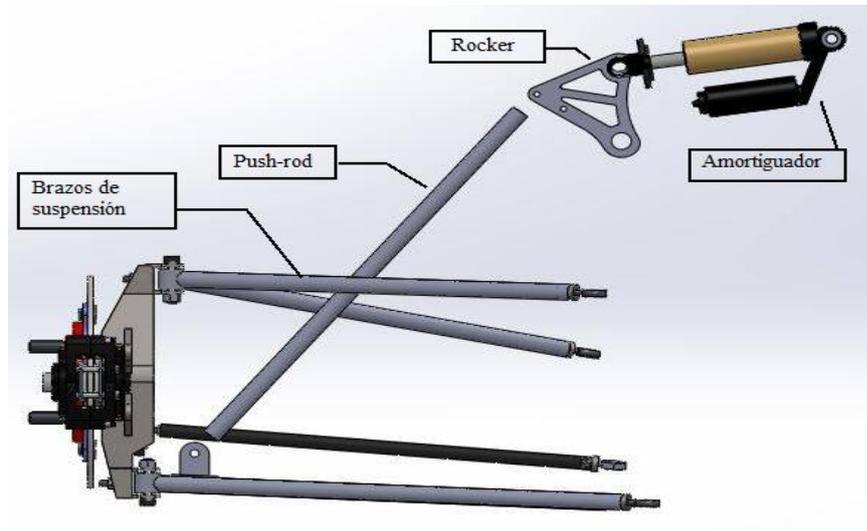
**Figura 2. 4.** Suspensión esquematizada del vehículo Formula SAE

Las barras rojas representan los brazos superior e inferior de la suspensión, las barras amarillas representan los push-rods. Los cuales sirven para reenviar el movimiento de la rueda, mediante el rocker, hacia el amortiguador.

Un sistema semejante al Push-Rod, es el sistema Pull-Rods. En este último caso en vez de "empujar" al conjunto muelle-amortiguador, el sistema "tira" del amortiguador.

### 2.3.4 Rocker

El rocker lleva un eje en el centro, por lo que balancea sus extremos: por un lado el push-rod, y al lado contrario el amortiguador.



**Figura 2. 5.** *Suspensión vehículo Formula SAE, UPS*

*Fuente: UPS Racing Team*

### 2.3.5 Conjunto Muelle–Amortiguador

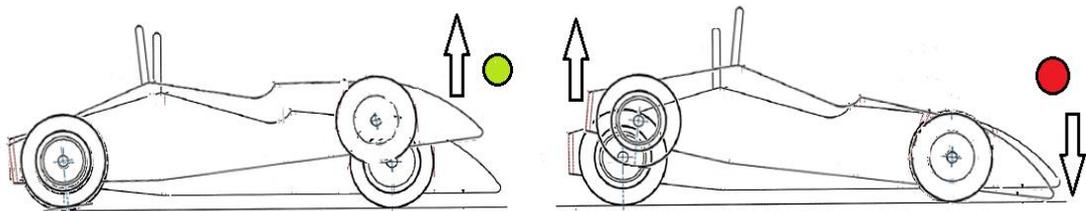
Estos dos elementos son los encargados de convertir las fuerzas que transmite el conjunto de la suspensión en deformación. Dadas las características de cualquier tipo de muelle, la energía absorbida, con ciertas pérdidas es devuelta generándose oscilaciones de larga duración en el tiempo y que se mitiga muy despacio. Con el amortiguador se consiguen eliminar esas oscilaciones que siguen a la absorción de la fuerza generada sobre el conjunto de la rueda.

### 2.4 Parámetros que influyen en las cargas del sistema de suspensión de un vehículo formula SAE

En el sistema de suspensión es apreciable que las fuerzas que actúan en el mismo se verán afectadas por parámetros que intervienen directamente en su funcionamiento y en su comportamiento.

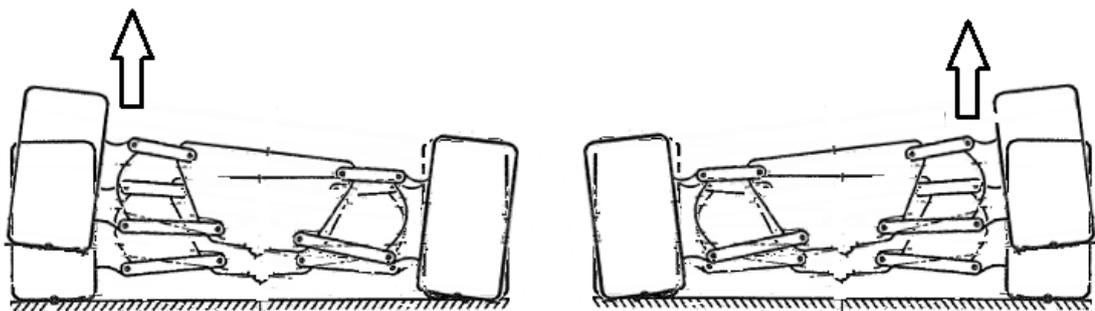
En el sistema de suspensión es apreciable que las fuerzas que actúan en el mismo se verán afectadas por parámetros que intervienen directamente en su funcionamiento y en su comportamiento.

**La transferencia de pesos longitudinal:** Está presente en las aceleraciones y en las fuerzas de frenado. El peso total del vehículo no cambia, sin embargo la masa del vehículo varía en aceleraciones (desde la parte frontal a la posterior) y en frenado (desde la parte posterior a la frontal). La carga que se transfiere es reflejada en las fuerzas que actúan en la suspensión (compresión o tracción).



**Figura 2. 6.** *Transferencia de pesos longitudinal en un vehículo Formula SAE*

**La transferencia de pesos lateral:** Se basa en el mismo principio que la transferencia de pesos longitudinal, pero en este caso la transferencia de masa se genera en sentido lateral.



**Figura 2. 7.** *Transferencia de pesos lateral en un vehículo Formula SAE*

**El chasis:** es un parámetro de gran influencia puesto que es el encargado de conectar los componentes como son el motor, sistemas de traslación y tren de fuerza motriz. Funciona como punto de unión de varios sistemas auxiliares, además soporta el peso del vehículo y ayuda a la suspensión a soportar fuerzas de frenado.

## **2.5 Estado del arte del uso de extensometría en la automoción**

La extensometría es la técnica más utilizada para el análisis experimental de tensiones, esta técnica cada vez va cobrando más importancia por su gran aporte a la validación de cálculos y diseños tradicionales. En la actualidad la extensometría es aplicada en varias ramas tales como la medicina, automoción, aeronáutica, naval, mantenimiento industrial, etc.

La empresa National Instruments NI, es una empresa dedicada a ofrecer equipos de instrumentación electrónica, y software de aprendizaje. National Instruments se propuso un desafío, de analizar el rendimiento de un coche de carreras Formula Student utilizando un sistema de adquisición de datos junto con el método experimental de extensometría eléctrica. Mediante esta técnica la empresa pudo recopilar información en tiempo real de los esfuerzos a los que estaba sometido el prototipo, datos que sirvió para optimizar el diseño del vehículo. [17]

Así como se puede obtener datos experimentales del funcionamiento de la suspensión, también se puede instrumentar cualquier otra parte del vehículo formula SAE. Es así que estudiantes de la ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA UNIDAD TICOMÁN, realizaron una tesis que comprendía el estudio teórico, numérico, experimental para el análisis del mecanismo en el sistema de dirección de un vehículo formula SAE. En esta tesis se realizó la instrumentación con galgas extensiométricas en partes del sistema de suspensión tales como cremallera, brazo de dirección, etc. [18].

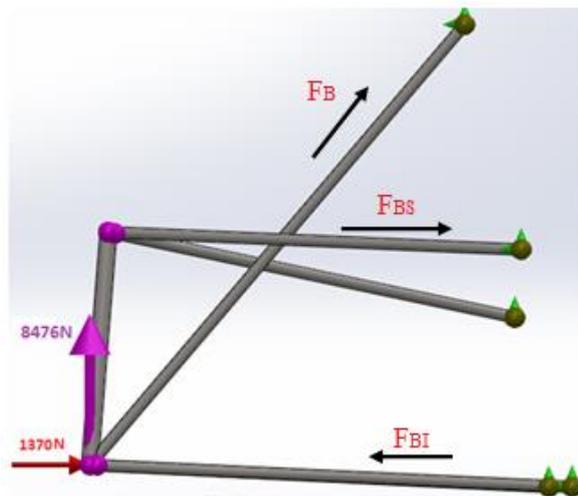
Siguiendo con el estudio del estado del arte, la extensometría eléctrica utilizada también como medio experimental para validar diseños, es un requisito que se está pidiendo en la competencia Formula Student. Es así que las universidades que se destinen a ingresar a esta competencia, están realizando una instrumentación previa para obtener las fuerzas actuantes en sus sistemas, incluido el de suspensión como lo hizo el departamento de ingeniería mecánica de la UNIVERSIDAD DO RIO GRANDE DO SUL. [19]

## 2.6 Distribución de las cargas en los brazos de suspensión y barras push rods

A continuación determina el valor de los esfuerzos a los que se encuentran expuestos tanto los brazos de suspensión como las barras push rods en el caso crítico.

### 2.6.1 Fuerzas en los brazos de suspensión y barra push rod delanteros

Para el cálculo de las fuerzas se realiza un análisis estático de la estructura formada por los brazos de suspensión y la barra push rod. Mediante una previa revisión bibliográfica [20], se ha logrado obtener los valores de fuerza de dicha estructura la misma que se muestra a continuación.



**Figura 2. 8.** Cargas presentes en la suspensión delantera del vehículo Fórmula SAE.  
Imagen modificada de [20]

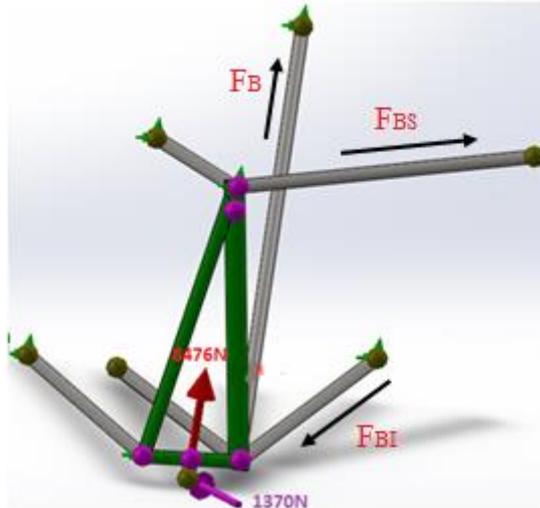
$$F_B = \text{Fuerza en el balancín} = 10700\text{N}$$

$$F_{BS} = \text{Fuerza en el brazo superior} = 2300\text{N}$$

$$F_{BI} = \text{Fuerza en el brazo inferior} = 3730\text{N}$$

### 2.6.2 Fuerzas en los brazos de suspensión y barra push rod posteriores

De igual manera que para los brazos delanteros, en los brazos posteriores se realiza la misma revisión bibliográfica [20], obteniéndose los valores de fuerzas en los brazos tanto superior como inferior y la barra push rod.



**Figura 2. 9.** Cargas presentes en la suspensión posterior del vehiculó Formula SAE [20]

$$F_B = \text{Fuerza en el balancín} = 11000\text{N}$$

$$F_{BS} = \text{Fuerza en el brazo superior} = 2500\text{N}$$

$$F_{BI} = \text{Fuerza en el brazo inferior} = 3800\text{N}$$

Los elementos de la suspensión tanto derecho como izquierdo presentan valores de esfuerzos similares en condiciones de funcionamiento y carga iguales.

## 2.7 Criterio de selección de los brazos de suspensión y barras push rods a instrumentar

Para la selección adecuada de los diferentes brazos y barras push rods que se van a instrumentar se tienen en cuenta dos factores. El primero hace referencia al número de barras o elementos que se puede instrumentar con el equipo de adquisición de datos y el segundo a las barras que representan mayor esfuerzo o que están propensas a mayores riesgos de fallo.

### 2.7.1 Número de canales de medición

El número de canales que se pueden medir con una tarjeta de adquisición de datos es una característica que se debe tener en cuenta al momento de la instrumentación. La tarjeta utilizada permite una adquisición de datos con 4 canales de medición, lo que permite medir 4 barras al mismo tiempo.

## 2.7.2 Máximos esfuerzos en la suspensión

Como se puede revisar en los puntos 2.6.1 y 2.6.2 los push rods tanto delanteras como posteriores son las barras que mayor fuerza soportan, seguido de ellos van los brazos inferiores tanto delanteros como posteriores, dejando a los brazos superiores con la menor fuerza soportada.

De esa manera es claro que el análisis debe basarse en aquellos elementos sometidos a mayor esfuerzo.

Con todo lo anteriormente dicho los elementos seleccionados para realizar un análisis de las cargas a las que se encuentran expuestos son los siguientes:



**Figura 2. 10.** Brazos instrumentados de la suspensión del vehículo Fórmula SAE

a) Suspensión delantera b) Suspensión posterior



**Figura 2. 11.** Push rods instrumentados de la suspensión del vehículo Formula SAE

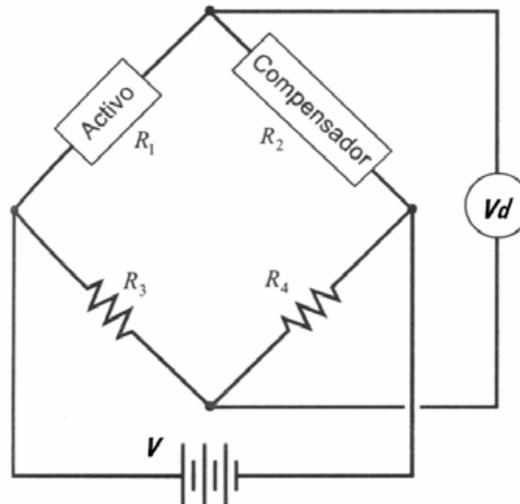
a) Suspensión delantera b) Suspensión posterior

## 2.8 Selección del Puente de Wheatstone adecuado

Como se mencionó en el apartado 1.8.2 a, existen varios montajes básicos de galgas extensiométricas en un puente de Wheatstone.

El uso de múltiples medidores permite compensar los efectos no deseados, como componentes de temperatura y deformaciones específicas.

En un puente de Wheatstone las deformaciones iguales en los brazos opuestos se suman, mientras que en los brazos adyacentes se cancelan, el primer efecto se utiliza para compensar factores indeseados tales como temperatura.



**Figura 2. 12.** Arreglo de puente para compensar la temperatura [20]

A continuación se muestra diferentes arreglos de galgas extensiométricas con la correspondiente compensación.

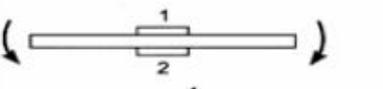
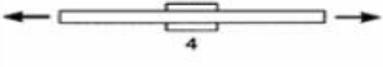
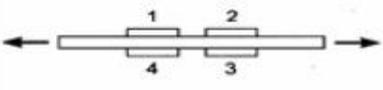
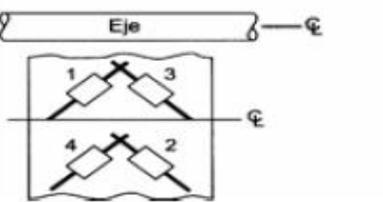
Arreglos	Compensación proporcionada
	Ninguna $k=1$
	Temperatura $k=2$
	Sólo flexión $k=2$
	Temperatura y flexión $k=4$
	$k=1+\mu$
	Temperatura y axial $k=4$

Figura 2. 13. Arreglo de puentes con galgas extensiométricas para la compensación [20]

Como se puede apreciar en la figura anterior, el arreglo que proporciona una mejor compensación es un arreglo de 4 galgas extensiométricas.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se opta por elegir la configuración de puente completo la misma que se muestra a continuación. También se da a conocer la forma en que se colocarán las galgas extensiométricas en el elemento a medir.

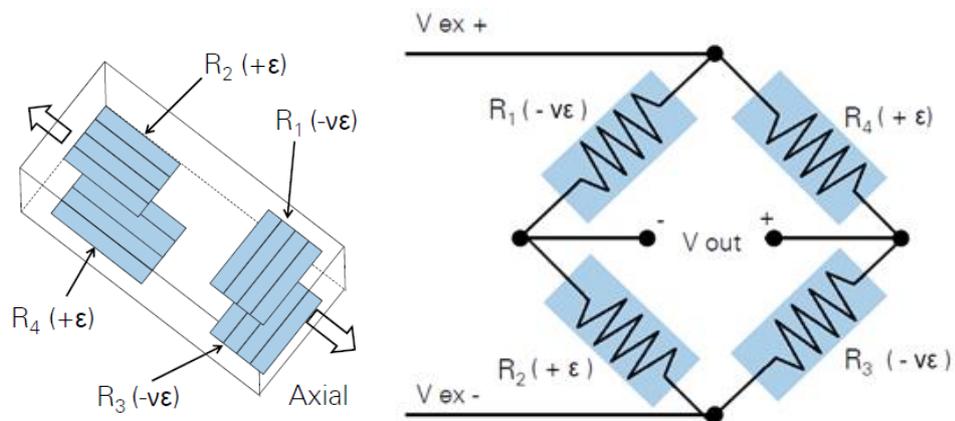


Figura 2. 14. Configuración de puente utilizada para el vehículo Formula SAE [21]

## **2.9 Selección de galgas y accesorios**

La selección de las galgas así como sus accesorios es el primer paso a seguir para realizar cualquier tipo de trabajo con extensiométrica eléctrica, ya que una correcta selección nos va a permitir obtener los resultados adecuados, así como evitar costos innecesarios, y reducir tiempos tanto de medición como de instrumentación.

Para una selección correcta de galgas se debe seguir un proceso adecuado y ordenado, a continuación se presentan los pasos a considerar:

1. *Tener un conocimiento claro de que pretende con las medidas:* cálculos a realizar.
2. *Serie de la galga extensiométrica.*
3. *Condiciones mecánicas del punto de medida:* Hace referencia al tipo de esfuerzo y carga, ya sea estática o dinámica.
4. *Modelo de la galga.*
5. *Longitud de la galga.*
6. *Resistencia nominal de la galga.*
7. *Almohadillas de conexión.*
8. *Adhesivo.*

### **2.9.1 Compromiso de selección**

Se debe tener en cuenta que en el proceso de selección de una galga extensiométrica lleva consigo varios compromisos. Esto se debe a que dependiendo de la elección de los parámetros que generalmente tiende a satisfacer un requerimiento, puede obrar en cierta medida en contra de otros.

Para una selección adecuada es necesario llegar a un compromiso que ayude a satisfacer cualquier conjunto de circunstancias que se llegasen a presentar y juzgar este compromiso en la validez y precisión de los datos.

### **2.9.2 Serie y modelo de la galga extensiométrica**

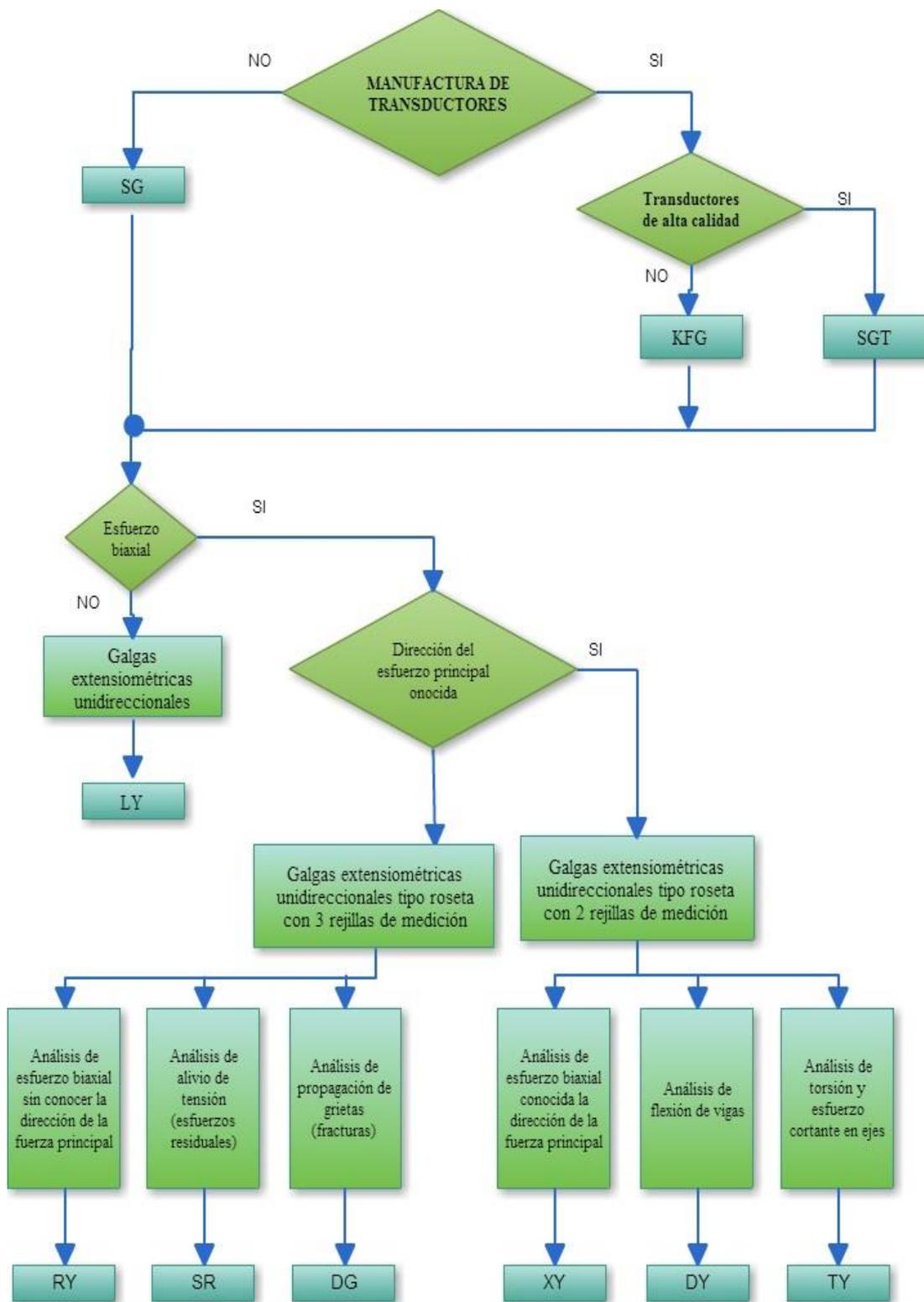
La serie y el modelo de una galga extensiométrica nos definen tres de los parámetros necesarios para la selección de una galga adecuada.

La serie de una galga extensiométrica nos define:

- La aleación con la que está fabricado el elemento sensible de la galga (rejilla).
- El material de la matriz portadora.

El modelo nos define la configuración de la rejilla que tendrá la galga extensiométrica.

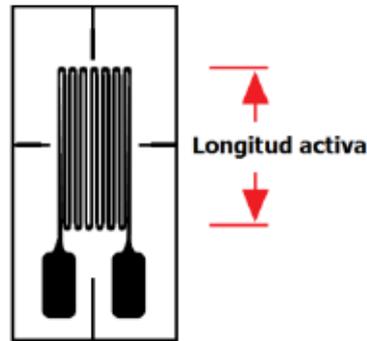
A continuación se presenta un diagrama de flujo que facilita el proceso de selección de una galga adecuada, la codificación indicada con letras mayúsculas: RY, SR.... Etc., corresponde a los productos de la compañía OMEGA.



**Figura 2. 15.** Proceso para la selección de la serie y modelo de la galga [14]

### 2.9.3 Longitud de la galga

La longitud de la galga extensiométrica hace referencia a la región activa de la galga, también conocida como rejilla, debido a que los arrollamientos y las pistas de soldadura se consideran insensibles a la deformación por tener mayor sección.



**Figura 2. 16** Longitud activa de una galga extensiométrica [5]

Existen en el mercado una gran gama de longitudes de acuerdo a sus aplicaciones, caracterizándose principalmente en dos tipos, que son: galgas cortas y galgas largas.

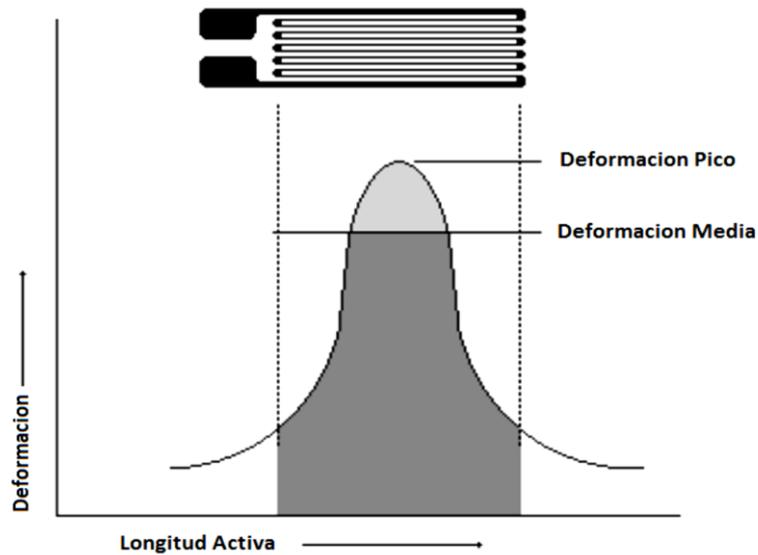
#### a. Galgas cortas

Se encuentran en el mercado con longitudes que varían entre 1.5 y 6 mm, estas galgas tienden a presentar pérdidas en el rendimiento, principalmente en lo referente a su alargamiento máximo y resistencia a fatiga o a cargas cíclicas.

#### b. Galgas largas

Las galgas que presentan mayor longitud por lo general son más fáciles de manejar tanto en la instalación como en el cableado, así mismo presentan una mejor disipación del calor.

Algo que se debe tener en cuenta es que la galga tiende a medir el valor promedio de la deformación en la zona en la que se encuentra la longitud activa, la variación de la deformación en esta zona no es uniforme como se puede apreciar en la siguiente figura.



**Figura 2. 17.** *Distribución del esfuerzo sobre una galga extensiométrica [5]*

#### **2.9.4 Resistencia nominal de la galga**

Algo que se debe de tener en cuenta al momento de elegir el valor de la resistencia de una galga extensiométrica es que con un valor más grande de resistencia se reduce la tasa de generación de calor. Así mismo una resistencia más grande nos ayudará a reducir la sensibilidad del circuito debido a la resistencia de los cables, de la misma manera reduce las variaciones no esperadas de la señal.

Los valores nominales de resistencia que tiene las galgas son de  $120\Omega$  a  $1000\Omega$ .

#### **2.9.5 Almohadillas de conexión**

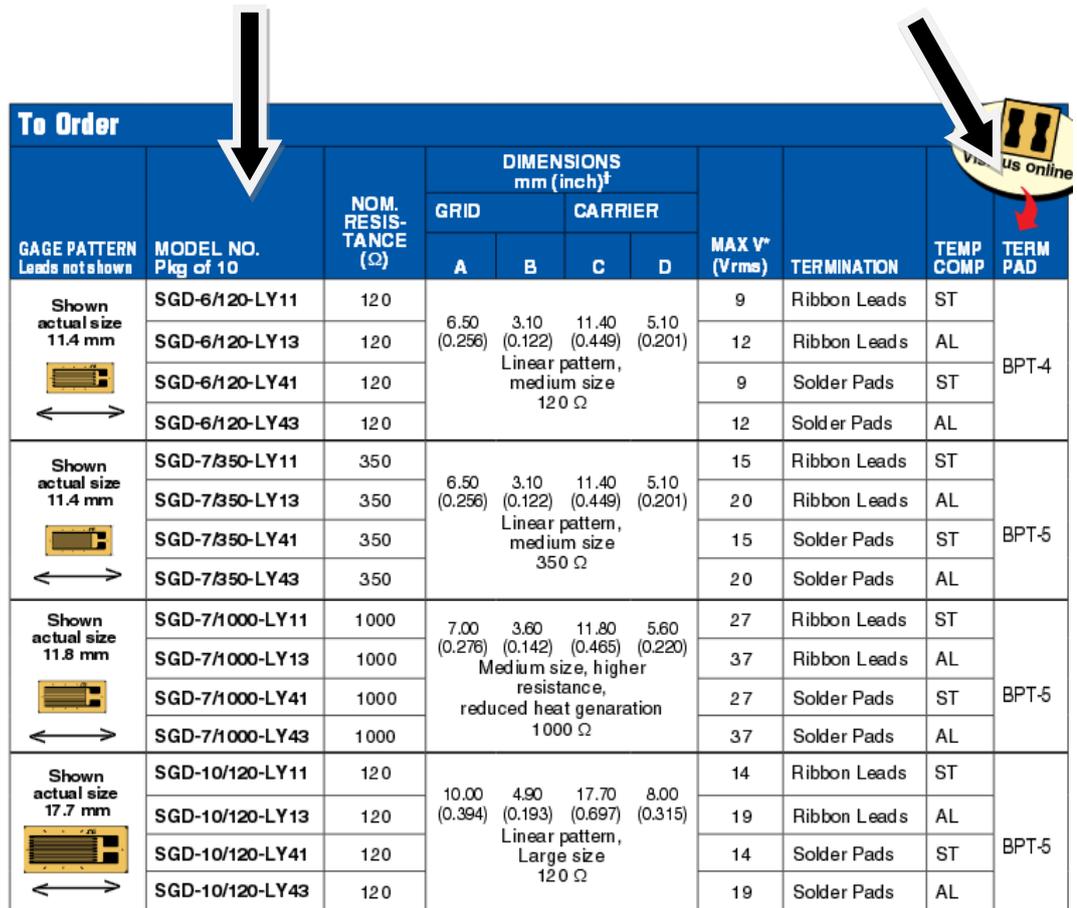
Las almohadillas de conexión son las encargadas de unir los conductores de calibre fino de las galgas, con los conductores de calibre más grueso de la instrumentación. De la misma forma actúan como puntos de anclaje, aliviando de esta manera las tensiones que se pueden producir al mover los conductores de la instrumentación.

Las almohadillas de conexión varían de acuerdo al tipo de galga extensiométrica que se utilice, y para ello nos basamos en el número de identificación que tiene cada una de ellas.

En la información general de las galgas, el fabricante coloca en el lado derecho de dicha tabla el código de la almohadilla "TERMPAD" referente a cada modelo de galga denominado.

Número de identificación de la galga extensiométrica

Código de la almohadilla de conexión adecuada para la galga



To Order										
GAGE PATTERN Leads not shown	MODEL NO. Pkg of 10	NOM. RESISTANCE ( $\Omega$ )	DIMENSIONS mm (inch) <sup>†</sup>				MAX V* (V <sub>rms</sub> )	TERMINATION	TEMP COMP	TERM PAD
			GRID		CARRIER					
			A	B	C	D				
Shown actual size 11.4 mm  	SGD-6/120-LY11	120	6.50 3.10 11.40 5.10 (0.256) (0.122) (0.449) (0.201) Linear pattern, medium size 120 $\Omega$				9	Ribbon Leads	ST	BPT-4
	SGD-6/120-LY13	120					12	Ribbon Leads	AL	
	SGD-6/120-LY41	120					9	Solder Pads	ST	
	SGD-6/120-LY43	120					12	Solder Pads	AL	
Shown actual size 11.4 mm  	SGD-7/350-LY11	350	6.50 3.10 11.40 5.10 (0.256) (0.122) (0.449) (0.201) Linear pattern, medium size 350 $\Omega$				15	Ribbon Leads	ST	BPT-5
	SGD-7/350-LY13	350					20	Ribbon Leads	AL	
	SGD-7/350-LY41	350					15	Solder Pads	ST	
	SGD-7/350-LY43	350					20	Solder Pads	AL	
Shown actual size 11.8 mm  	SGD-7/1000-LY11	1000	7.00 3.60 11.80 5.60 (0.276) (0.142) (0.465) (0.220) Medium size, higher resistance, reduced heat generation 1000 $\Omega$				27	Ribbon Leads	ST	BPT-5
	SGD-7/1000-LY13	1000					37	Ribbon Leads	AL	
	SGD-7/1000-LY41	1000					27	Solder Pads	ST	
	SGD-7/1000-LY43	1000					37	Solder Pads	AL	
Shown actual size 17.7 mm  	SGD-10/120-LY11	120	10.00 4.90 17.70 8.00 (0.394) (0.193) (0.697) (0.315) Linear pattern, Large size 120 $\Omega$				14	Ribbon Leads	ST	BPT-5
	SGD-10/120-LY13	120					19	Ribbon Leads	AL	
	SGD-10/120-LY41	120					14	Solder Pads	ST	
	SGD-10/120-LY43	120					19	Solder Pads	AL	

Figura 2. 18. Especificaciones de las galgas serie SGD [20]

### 2.9.6 Adhesivo

Un adhesivo adecuado nos va a permitir obtener resultados más fiables y proporcionar una adecuada transmisión de esfuerzos desde el material hacia la galga.

En el mercado podemos encontrar una gran variedad de adhesivos, dependiendo la aplicación y factores externos que estén relacionados con la medición.

La siguiente tabla muestra adhesivos adecuados para cada material, así como recomendaciones específicas para pegar las galgas extensiométricas al material correspondiente.

**Tabla 2. 1. Adhesivos adecuados para cada material [21]**

<b>Material</b>	<b>Pretratamiento</b>	<b>Limpieza</b>	<b>Adhesivo apropiado</b>	<b>Observaciones</b>
<b>Aluminio</b>	Desbastado	RMS1	Z70,X60,X28, EP310S,EP150	Si de la superficie emanan sustancias grasas: limpiar y calentar varias veces.
<b>Cobre-berilio</b>	Desbastado	RMS1	Z70,X60,X28, EP310S,EP150	Trabajar con rapidez, no dejar la pieza sin protección después del desbastado si es posible.
<b>Cobre</b>	Desbastado	RMS1	Z70,X60,X28, EP310S,EP150	
<b>Acero/ Hierro</b>	Desbastado	RMS1	Z70,X60,X28, EP310S,EP150	
<b>Níquel</b>	Desbastado	RMS1	Z70,X60,X28, EP310S,EP150	
<b>Titanio</b>	Desbastado	RMS1	Z70,X60,X28, EP310S,EP150	Trabajar con rapidez, no dejar la pieza sin protección después del desbastado si es posible. Si de la superficie emanan sustancias grasas: limpiar y calentar varias veces.
<b>Latón</b>	Desbastado	RMS1	Z70,X60,X28, EP310S,EP150	

## 2.10 Equipos seleccionados

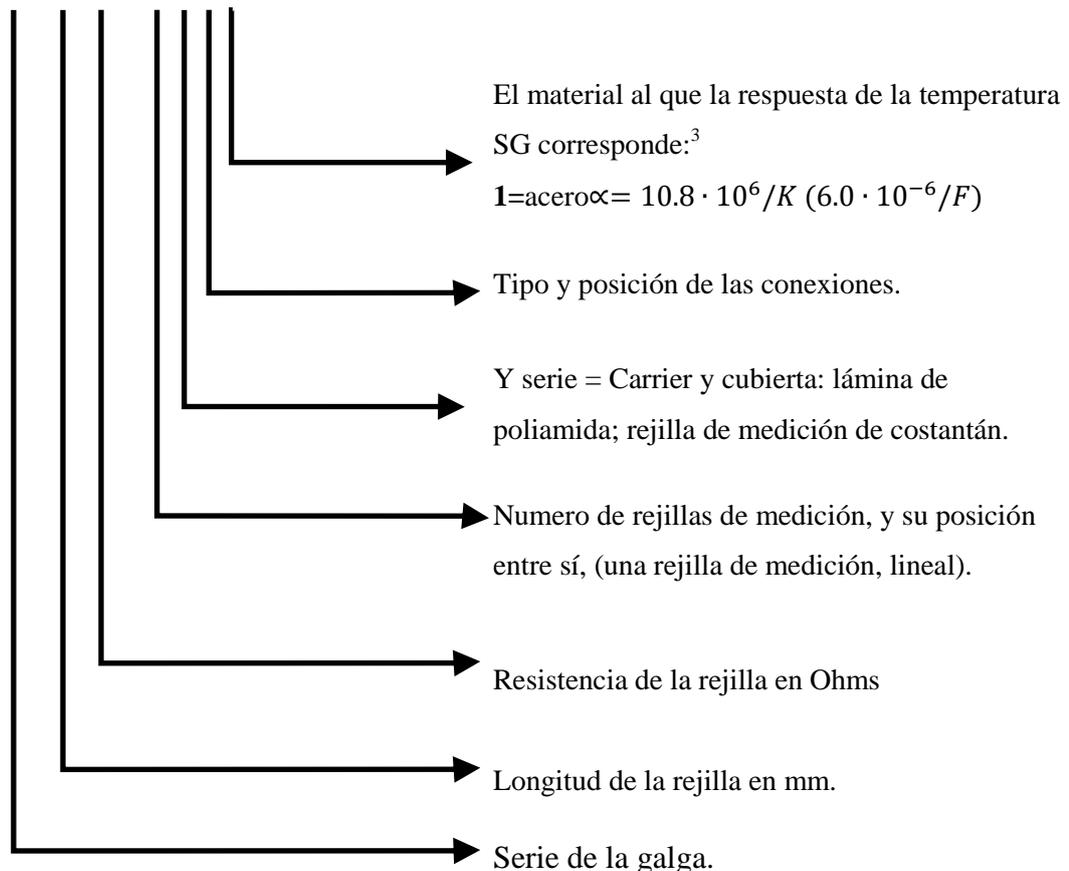
Una vez que se ha realizado el proceso de selección, teniendo en cuenta la disponibilidad del producto, y los requisitos que demanda la instrumentación, se llega a determinar los accesorios más adecuados.

### 2.10.1 Galgas extensiométricas

La serie y modelo de la galga extensiométrica ha sido seleccionada en función de la aplicación.

Las galgas de la serie SGD, son galgas estándar, utilizadas para la mayoría de aplicaciones debido su construcción robusta, gran flexibilidad y bajo costo. Son galgas adecuadas para la medición tanto estática como dinámica de alta precisión. A continuación se detalla la codificación de la galga seleccionada.

#### SGD-5/350- L Y1 1



<sup>3</sup> $\alpha$  = constante de proporcionalidad

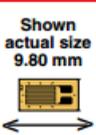
Se presenta una tabla con las características de la galga seleccionada.

**Tabla 2. 2.** Características de la galga extensométrica SGD-6/120-LY11 [22]

<b>SGD-5/350-LY11</b>	
<b>Material de la rejilla</b>	Constantán
<b>Material de la matriz portadora</b>	Poliamida
<b>Rango de temperatura</b>	-75°C a 200°C
<b>Rango de deformación</b>	3%
<b>Deformación máxima</b>	30000 microdeformaciones
<b>Resistencia eléctrica</b>	350 Ω
<b>Factor de la galga</b>	2.00
<b>Voltaje de alimentación</b>	6 V
<b>Longitud activa</b>	4.5 mm
<b>Ancho de la rejilla</b>	3.2 mm
<b>Sensibilidad transversal</b>	Insignificante

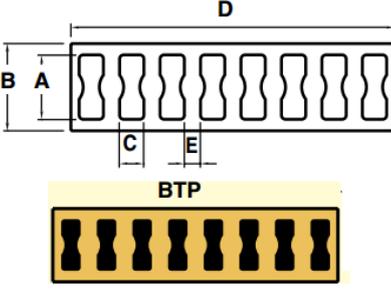
### 2.10.2 Almohadillas de conexión

Como ya se indicó anteriormente en el punto 2.5.5, las almohadillas de conexión vienen dadas a partir del modelo de la galga que se está utilizando.

To Order												
GAGE PATTERN <small>Leads not shown</small>	MODEL NO. <small>Pkg of 10</small>	NOM. RESIS-TANCE (Ω)	DIMENSIONS mm (inch) <sup>†</sup>				MAX V* (Vrms)	TERMINATION	TEMP COMP	TERM PAD		
			GRID		CARRIER							
			A	B	C	D						
 Shown actual size 9.80 mm	SGD-5/350-LY11	350	4.50   3.20   9.80   5.20 (0.177) (0.126) (0.386) (0.205) Linear pattern, medium size 350 Ω			12	Ribbon Leads	ST	BPT-4			
	SGD-5/350-LY13	350								17	Ribbon Leads	AL
	SGD-5/350-LY41	350								12	Solder Pads	ST
	SGD-5/350-LY43	350								17	Solder Pads	AL

**Figura 2. 19.** Especificaciones de las galgas serie SGD [20]

A continuación se muestran las dimensiones de la almohadilla BPT-4, que fue seleccionada anteriormente.



MODEL NO.	STRIPS PER PACK	DIMENSIONS mm (inch)				
		A	B	C	D	E
BTP-1	70	1.8 (0.07)	2.6 (0.1)	0.7 (0.03)	9.9 (0.39)	0.6 (0.02)
BTP-2	60	2.4 (0.09)	3.4 (0.13)	0.9 (0.04)	13.2 (0.52)	0.8 (0.03)
BTP-3	50	3.2 (0.13)	4.5 (0.18)	1.2 (0.05)	17.6 (0.69)	1 (0.04)
BTP-4	30	4.8 (0.19)	6.5 (0.26)	1.8 (0.07)	24 (0.94)	1.2 (0.05)
BTP-5	20	6 (0.24)	8.5 (0.33)	2.3 (0.09)	32.4 (1.28)	1.8 (0.07)

Figura 2. 20. Especificaciones de las almohadillas de conexión BTP [23]

### 2.10.3 Adhesivo

El adhesivo que se utiliza es el cianoacrilato a base de metilo SG496, que proporciona la marca OMEGA. Si se requiere esta marca ofrece un KIT de instalación con la codificación TT300, el cual contiene tanto los elementos para el pegado de la galga, como para preparar la superficie de la pieza.

Tabla 2. 3. Características del adhesivo SG496 [24]

<b>SG496</b>		
<b>Componente</b>	Cianoacrilato a base de metilo	
<b>Contenido</b>	1oz (aprox.750 galgas)	
<b>Tiempo mínimo de pegado</b>	<b>Acero</b>	60 a 120 seg
	<b>Aluminio</b>	50 a 100 seg
<b>Tiempo de curado (20°C)</b>	<b>Estáticas</b>	15min
	<b>Dinámicas</b>	10min
<b>Tiempo de fijación</b>	1 día	
<b>Tiempo de vida útil</b>	1 año	
<b>Temperatura de funcionamiento</b>	-54°C a 82°C	

## 2.10.4 Tarjeta de adquisición de datos

La tarjeta de adquisición de datos que se utiliza es la que se muestra a continuación, es una tarjeta muy versátil y brinda datos extremadamente confiables.

A continuación se muestra las características de la tarjeta de adquisición de datos NI ENET-9219.

**Tabla 2. 4.** Tarjeta de adquisición de datos NI ENET-9219 [25]

<b>NI ENET-9219.</b>	<b>Ethernet 4-Channel Universal Input</b> 
<b>Canales de medición</b>	4 canales universales independientes.
<b>Sistema de comunicación</b>	Ethernet.
<b>Señales de medición</b>	Galgas extensométricas, RTDs, termopares, celdas de carga y otras.
<b>Resolución</b>	24 bits.
<b>Rango de medidas</b>	$\pm 60V$ para voltaje y $\pm 25mA$ para corriente.

## 2.11 Proceso de instrumentación de la suspensión del vehículo Formula SAE

Después de seleccionar el equipo adecuado se procede a la colocación de las galgas extensométricas en la suspensión del vehículo Formula SAE. La colocación de las galgas extensométricas se encuentra clasificada en tres etapas:

- Preparación de la superficie.
- pegado de la galga.
- protección de la misma.

### 2.11.1 Preparación de la superficie

El propósito de la preparación es lograr una superficie químicamente limpia, con una rugosidad superficial adecuada.

#### **Limpieza burda**

Se debe de eliminar todo tipo de corrosión, oxidación y pintura que se encuentre en la zona de la pieza en la que se colocará la galga.



**Figura 2. 21.** Limpieza burda (extracción de la pintura) de las barras de suspensión

#### **Suavizado de la superficie**

Se debe eliminar cualquier imperfección mecánica, protuberancia o canales que tenga la superficie, mediante un limado, cepillado o proceso de mecanizado necesario.



**Figura 2. 22.** Suavizado de la superficie de las barras de suspensión

### **Eliminación de grasas**

Se debe eliminar todo tipo de aceite, grasas, contaminantes orgánicos o residuos de productos químicos que se encuentren en la superficie del material. Para elegir un determinado agente de limpieza se debe tener en cuenta la naturaleza del contaminante y si el agente puede afectar o no a la superficie.

La acetona es la más utilizada, también se encuentra el alcohol isopropílico, los baños líquidos agitados ultrasónicamente, métodos desengrasantes por vapor entre otros. El procedimiento consiste en empapar el agente limpiador en una gasa y lavar la superficie cubriendo inicialmente una área mayor a la deseada.



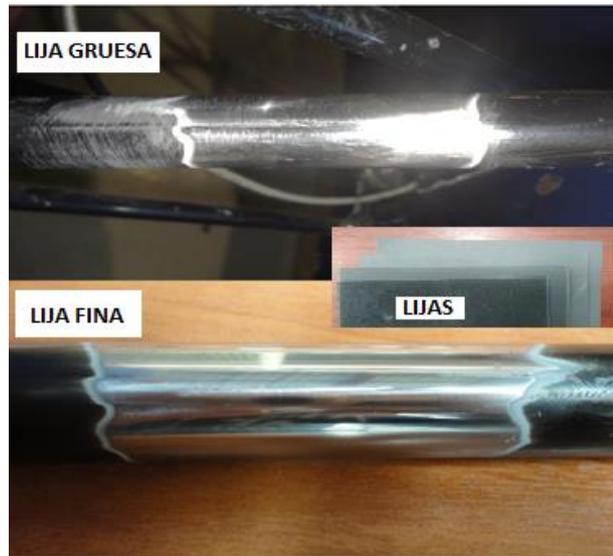
**Figura 2. 23.** *Eliminación de grasa en las barras de suspensión*

Hay que tener especial cuidado de no contaminar el envase del agente limpiador con las partículas de grasa. Para ello se debe trasladar una porción adecuada a un recipiente limpio del cual se usará.

Cada gasa usada debe ser desechada, evitando introducir una gasa usada en el agente limpiador. Así mismo delimitar correctamente el área a limpiar para evitar introducir partículas sucias nuevamente a la superficie ya limpiada.

### **Lijado**

Una buena adhesión de la galga depende en gran parte de la rugosidad que tenga la superficie donde se va a adherir, una superficie más lisa proporciona una mayor área de contacto efectiva. Se debe tener en cuenta el número de lija adecuado para cada material, se recomienda lijas del número 80 a 180 para acero y 220 a 360 para aluminio.



**Figura 2. 24.** *Lijado en la superficie de las barras de suspensión*

El procedimiento de lijado se lo realiza en forma de círculos, y comenzando por un número de lija más grueso, y terminando con uno más fino.

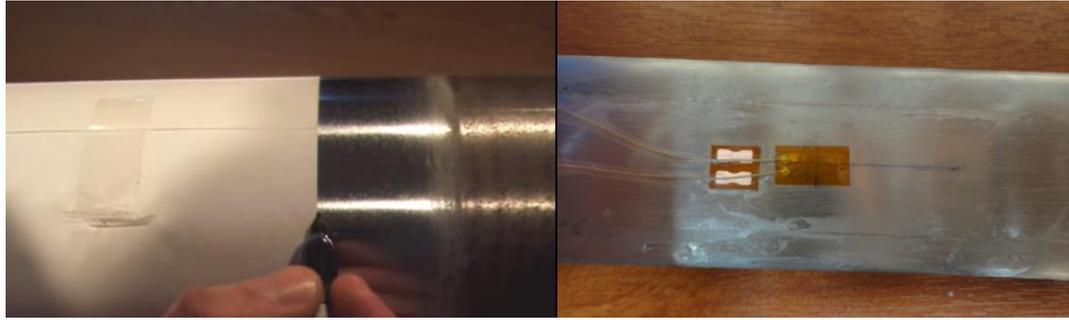
### **Limpieza fina**

Consiste en eliminar cualquier residuo de lija, limalla o polvo dejado del proceso anterior, para ello utilizamos los mismos procedimientos detallados en el apartado de eliminación de grasas.

Se debe pasar una gasa empapada con el agente limpiador por la superficie una sola vez con la ayuda de unas pinzas, repetir este paso hasta que la gasa no muestre señales de decoloración al pasar por el área que se está limpiando.

### **Marcado de la superficie**

El marcado de la superficie nos va a ayudar a colocar las galgas en la posición correcta de acuerdo a los esfuerzos que deseamos medir. Se puede utilizar un bolígrafo en el caso de acero, para conseguir hacer unas ligeras marcas.



**Figura 2. 25.** *Marcado de la superficie de las barras de suspensión*

### 2.11.2 Preparación de la galga extensiométrica

Una vez realizados los procesos anteriores las galgas deben ser adheridas lo más pronto posible para evitar que la superficie previamente preparada se contamine por factores atmosféricos.

#### **Posicionamiento de la galga**

Para ello se utiliza un trozo de cinta adhesiva de aproximadamente 10 a 15 cm. El procedimiento consiste en colocar mediante unas pinzas la galga y los terminales, en una superficie químicamente limpia.

Colocamos el pedazo de cinta sobre la galga y el terminal, de tal manera que queden centrados en la cinta, se levanta cuidadosamente a un ángulo de 45grados trayendo consigo la galga y el terminal de conexión adheridos.

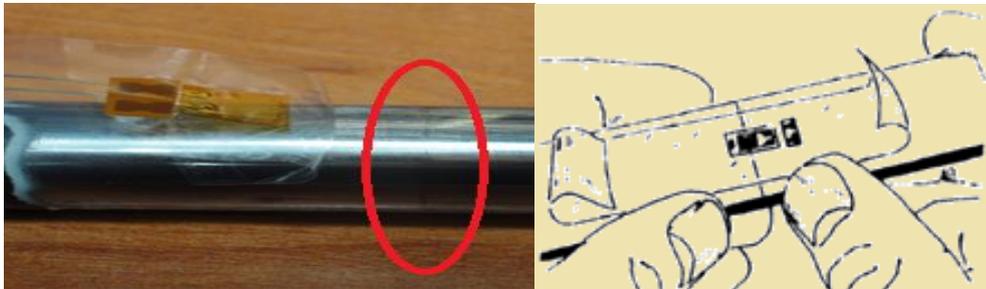


**Figura 2. 26.** *Posicionamiento de la galga en el push-rod*

### **Alineación de la galga**

Para este proceso se debe hacer coincidir las marcas de alineación que presenta la galga con las marcas que se realizaron en la pieza anteriormente. Se ayuda por medio de la línea de borde de la cinta adhesiva, la cual se pega en un extremo en la barra y se verifica de manera visual que las marcas empiecen a coincidir.

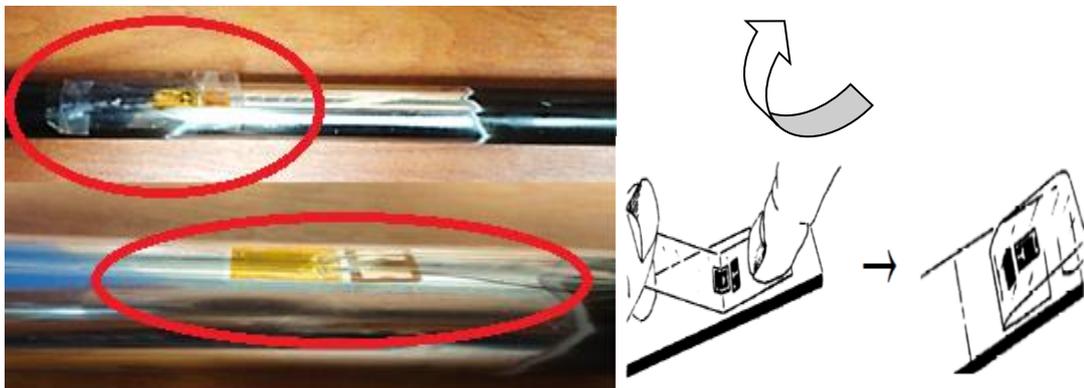
En caso de no conseguir una alineación adecuada, se debe levantar un extremo de la cinta manteniendo un ángulo igual o menor a  $45^\circ$  hasta despegar la cinta completamente. Se debe repetir el procedimiento hasta lograr una correcta alineación.



**Figura 2. 27.** *Alineación de la galga en el push-rod*

### **Final de la preparación**

Para concluir con la preparación de la galga y su terminal de conexión, se debe de levantar la cinta de un extremo en un ángulo agudo hasta que la galga quede aproximadamente 1cm libre. Seguidamente se debe doblar la cinta, de manera que la galga y su terminal queden expuestas en una superficie plana con la parte a adherirse hacia arriba como se muestra en la figura siguiente.



**Figura 2. 28.** *Proceso final de la preparación de la galga*

### 2.11.3 Pegado de la galga extensiométrica

Para el pegado de la galga extensiométrica se deben seguir los tres procedimientos mostrados a continuación, teniendo en cuenta de realizarlos en la secuencia mostrada y en un lapso de 3 a 5 seg.

#### Aplicación del adhesivo

Se procede a levantar el extremo de la cinta anteriormente doblada teniendo presente de no ejercer mucha fuerza en la cinta, evitando así, deteriorarla. Se coloca, dos gotas del adhesivo aproximadamente 1 cm entre la unión de la cinta con la probeta, y la periferia de la galga y terminal.



Figura 2. 29. Aplicación del adhesivo

#### Adhesión

Se debe desdoblar la cinta para quedar a aproximadamente 30° de la superficie. Mientras se sostiene la cinta con una ligera tensión, aplique una presión deslizante con sus dedos y una gasa de manera que se vaya oprimiendo la galga y su terminal en la posición adecuada.

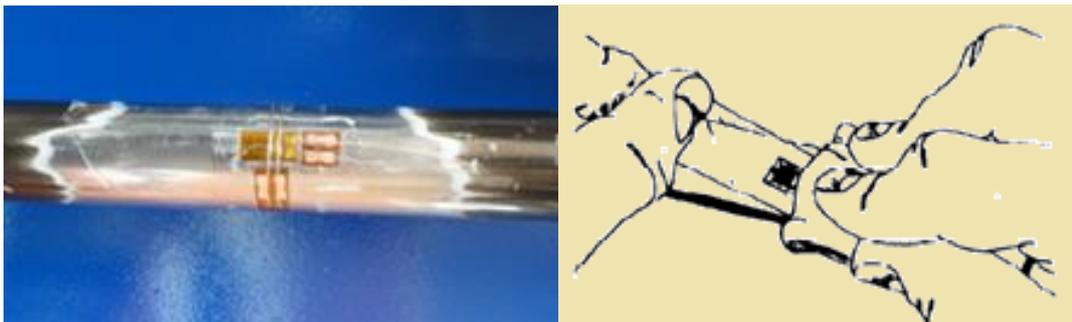


Figura 2. 30. Adhesión de la galga extensiométrica

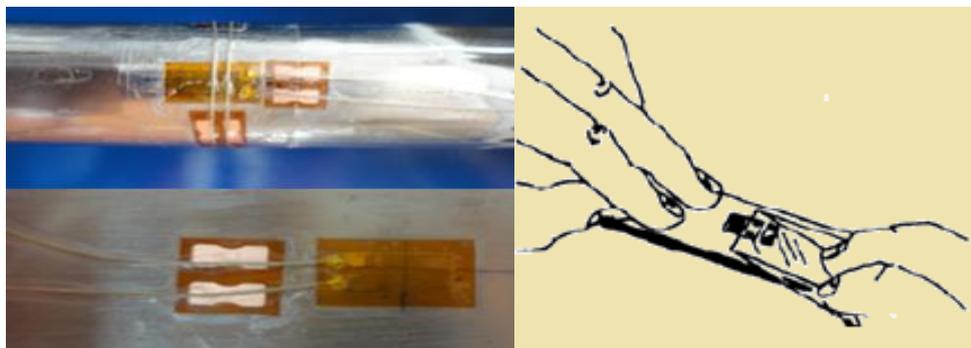
### Aplicación de presión

Después de realizar el paso anteriormente mencionado se debe ejercer una presión constante con el dedo pulgar sobre la galga y su terminal de conexión. Esta presión debe ser aplicada por un lapso mínimo de 1min. En condiciones de temperatura o humedad baja, el tiempo de aplicación de la presión debe extenderse a varios minutos dependiendo de las condiciones.



**Figura 2. 31.** *Aplicación de la presión en la galga extensiométrica*

Se debe esperar por lo menos 2 min antes de retirar la cinta, realmente no es necesario retirarla inmediatamente y puede permanecer como protección mecánica hasta que se procesa a soldar los terminales.



**Figura 2. 32.** *Retirado de la cinta adhesiva*

Para retirar la cinta se debe jalar directamente sobre si misma de forma continua y lenta para evitar fuerzas innecesarias sobre la galga.

#### 2.11.4 Soldado de los terminales

Para un correcto soldado de los terminales se recomienda que la punta del caudín sea de terminación plana. Es de importancia tener cuidado de no hacer contacto el caudín con el terminal de conexión por más de 1 segundo para evitar daños a la galga por calentamiento.

Después de tener todos los elementos en una posición adecuada, se fija los cables a soldar mediante una cinta, de esta manera se puede tener libres las dos manos para soldar. Al colocar el caudín se procura un ángulo de 30° o menor, a la vez de alimentar el terminal con 3 mm de soldadura.



**Figura 2. 33.** Soldado de los terminales con ayuda de las almohadillas

#### 2.11.5 Protección de la galga extensiométrica

Para evitar deterioros en las galgas extensiométricas, terminales y conexión, estos se deben cubrir mediante agentes protectores tanto de humedad, como de otros factores atmosféricos y mecánicos que afecten a la instrumentación.



**Figura 2. 34** Protección de la galga extensiométrica

Existe una gran variedad de agentes protectores tales como: barnices de silicona, grasa de silicona, resinas epoxi, tiras adhesivas, etc.

## **2.12 Sumario**

En este capítulo se dio a conocer el proceso de instrumentación de la suspensión del vehículo Formula SAE mediante extensometría eléctrica. Previo a la instrumentación se indicó las características que definen a la suspensión del FSAE.

Se presentó varios parámetros que sirven para una adecuada y correcta selección de las galgas extensiométricas posteriormente utilizadas. Uno de los parámetros que se presento fue un diagrama de flujo, el mismo que ayuda a conocer mejor la aplicación de las galgas.

Finalmente se detalló el proceso completo de instrumentación en el vehículo, para luego en el siguiente capítulo realizar la adquisición de datos mediante el software adecuado.

# CAPÍTULO III

## IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS

### 3.1 Introducción

En este capítulo se presenta la implementación del software para adquirir los datos medidos por las galgas extensiométricas. Para ello será necesario dos fases, la primera será la adquisición de datos mediante una tarjeta de adquisición, y la segunda la visualización de los valores mediante Labview.

Se presentara una fundamentación teórica de la utilización del software controlador de la tarjeta de adquisición de datos NI VISA. Así como el proceso de conexión y reconocimiento de la tarjeta en la PC.

Finalmente se muestra la programación en labview que nos va a permitir visualizar los resultados medidos.

### 3.2 Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos que se utiliza es el DAQ, este sistema consta de tres elementos básicos: sensor, hardware de medición DAQ y una PC con software adecuado para el manejo del sistema.

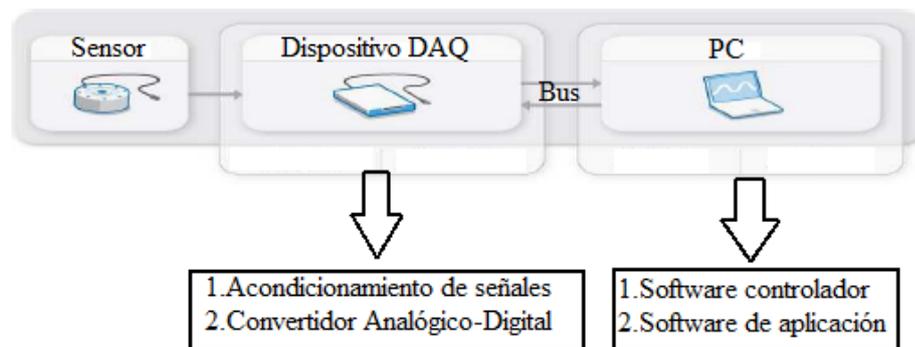


Figura 3. 1. Componentes de un sistema DAQ [26]

### 3.1.1 Sensor

Este dispositivo transforma un fenómeno físico (en nuestro caso deformación) en una señal eléctrica medible.

### 3.2.1 Dispositivo DAQ

Es un hardware que sirve de interfaz entre las señales analógicas captadas por los sensores y la PC.

Este hardware se le puede encontrar como tarjetas o dispositivos, en ambos casos están formados por tres componentes: un circuito de acondicionamiento de señales, el convertidor analógico-digital y un bus de datos para PC.

En el acondicionamiento de la señal comprende tanto el filtrado, atenuación y aislamiento, como la ampliación o des-amplificación de la señal para que la misma sea interpretada por la DAQ.

La conexión del dispositivo DAQ con la PC se lo realiza mediante un bus de datos tipo Ethernet.



**Figura 3. 2.** *DAQ acoplado al vehículo Formula SAE*

### 3.2.2 Ordenador

El ordenador (PC) tiene un software programable, el cual controla el funcionamiento del dispositivo DAQ; además procesa, visualiza y almacena los datos de medida. El ordenador debe cumplir ciertos requerimientos mínimos, tales como:

- Procesador: Pentium III/Celeron 866 MHz o equivalente.
- RAM: 256Mb, recomendable 1GB.
- Sistema Operativo: Windows, sea de 32 o 64 bits.
- Espacio en disco: 5GB (incluye controladores predeterminados).

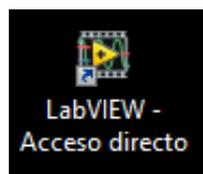
En el ordenador se instalan los dos siguientes complementos.

**Software controlador.-** Ofrece al software de aplicación la posibilidad de interactuar con el dispositivo DAQ. El software controlador que se utiliza es el NI-VISA.

NI-VISA, es un software controlador que permite configurar, programar y depurar sistemas de instrumentación. A su vez proporciona la interfaz de programación entre el hardware y los entornos de desarrollo de aplicaciones como NI LabVIEW.

**Software de aplicación.-**este software facilita la interacción entre la PC y el usuario para adquirir, analizar y presentar datos de medida. Puede ser una aplicación pre-construida, o un entorno de programación para construir aplicaciones con funcionalidad personalizada. [26]

El software de aplicación que se utiliza es el NI LabVIEW 2013 (32-bit)



**Figura 3. 3.** Software utilizado en la adquisición de datos

### 3.3 Uso del software controlador NI VISA

A continuación se muestra el uso del software para el reconocimiento de la tarjeta al la PC, así como la configuración de los parámetros a medir.

### 3.3.1 Reconocimiento de la tarjeta ENET-9219 en el equipo

Cuando se conecta por primera vez una tarjeta de adquisición de datos a un ordenador, es preciso realizar algunos pasos para conseguir que el ordenador reconozca al hardware. A continuación se detallan aquellos pasos:

1. Doble clic en el icono NI-MAX, para abrir el **Measurement & Automation Explorer**.
2. Clic derecho sobre **Network Devices**, y seleccionar **Find Network NI-DAQmx Devices**, Permite encontrar dispositivos NI-DAQ.

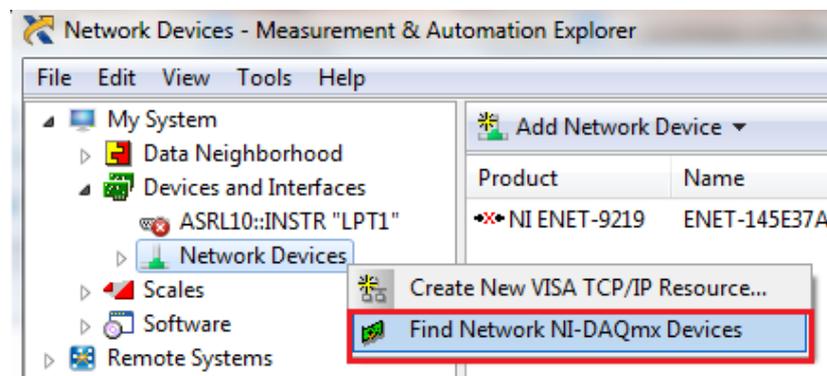


Figura 3. 4. Encontrar un dispositivo DAQ conectado a la PC

3. De la lista se selecciona la tarjeta utilizada, y se da clic en **Add Selected Devices**.

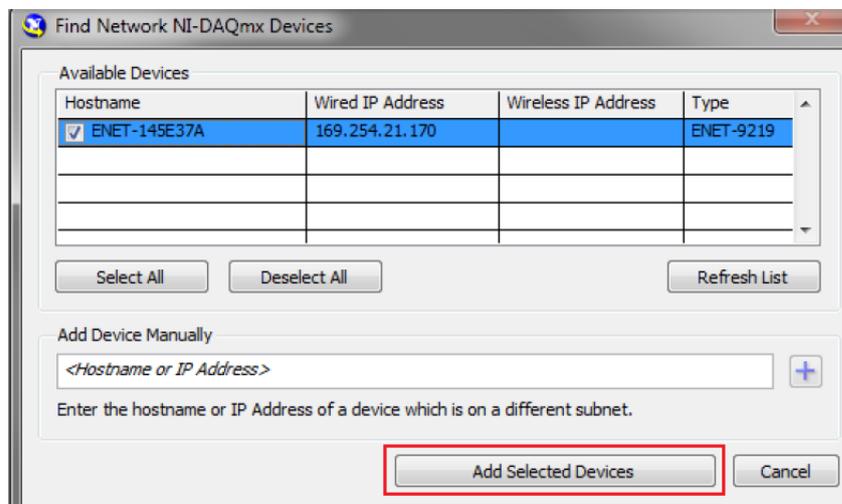
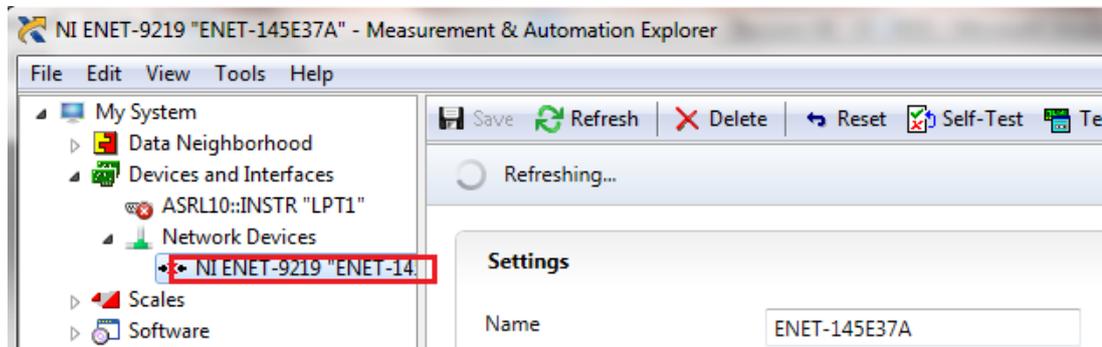


Figura 3. 5. Selección de la tarjeta de adquisición de datos

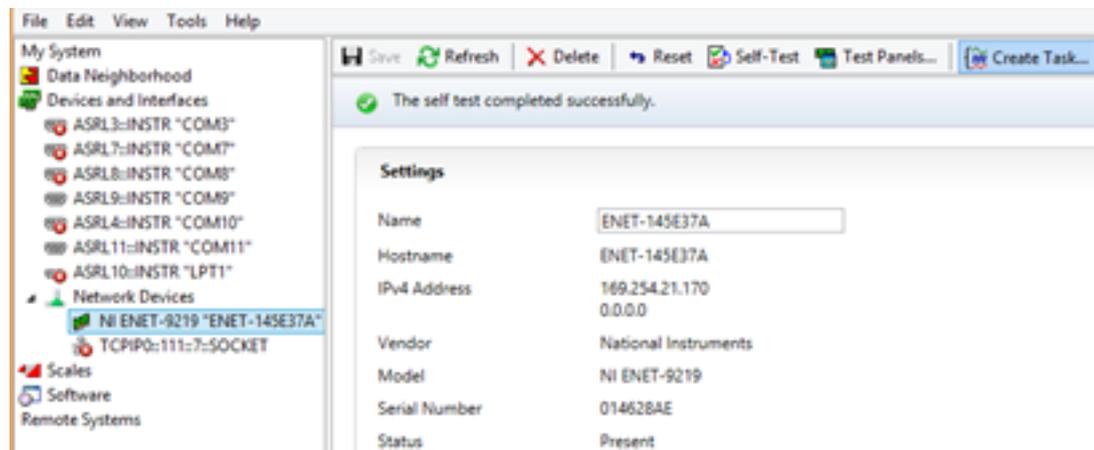
4. A continuación al ubicarse en el desplegable llamado **Network Devices**, se verifica la instalación de la tarjeta NI ENET-9219 en el equipo o PC.



**Figura 3. 6.** *Dispositivos conectados al ordenador*

### 3.3.2 Verificación de la tarjeta

La verificación de la tarjeta va a permitir verificar la compatibilidad de la DAQ con el equipo o PC. Para realizar esta operación en el programa MAX, se selecciona la tarjeta ENET-9219, y se da clic en la pestaña **Self-Test**.

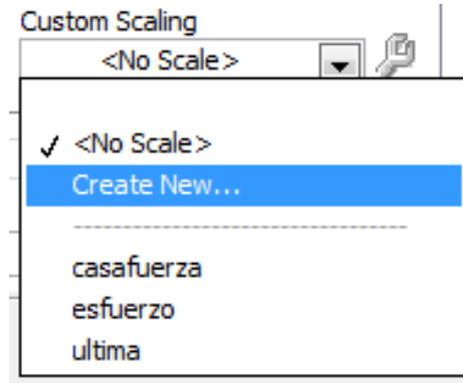


**Figura 3. 7.** *Verificación de la tarjeta ENET-9219*

### 3.3.3 Escala personalizada "Custom Scaling"

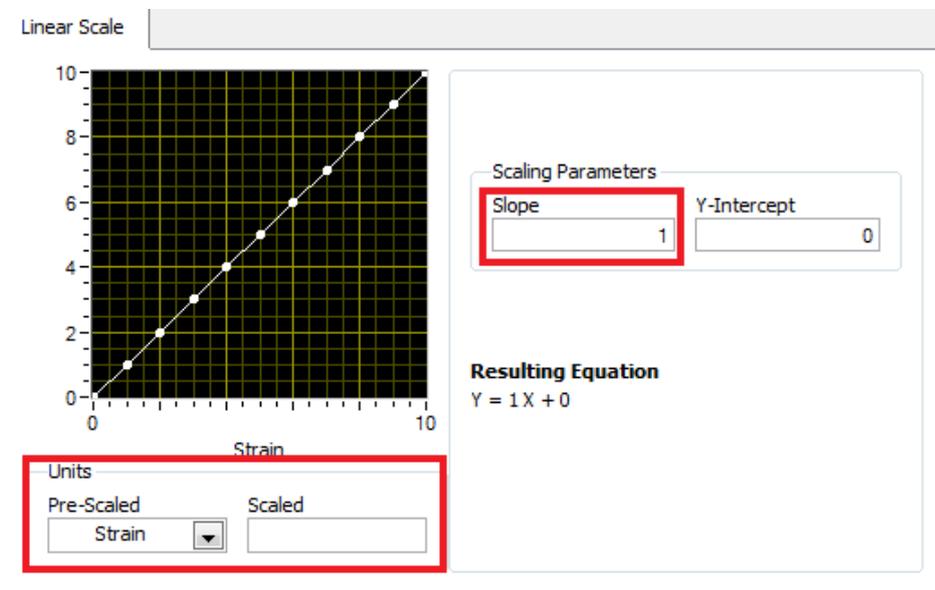
Una escala personalizada permite relacionar la deformación con una magnitud física, conociendo previamente el factor que relacione el comportamiento de la deformación vs magnitud física deseada. Con lo que podremos utilizar la DAQ para medir directamente aquel parámetro físico.

Para crear una nueva escala o seleccionar una previamente establecida nos ubicamos en el desplegable **Custom Scaling**.



**Figura 3. 8.** Crear nueva escala

Inmediatamente se abrirá una nueva ventana donde se pide seleccionar el tipo de escala a utilizar en la medición. En este caso será una escala lineal, se coloca un nombre a la escala y se da clic en **Finish**, con lo que genera la siguiente pantalla.

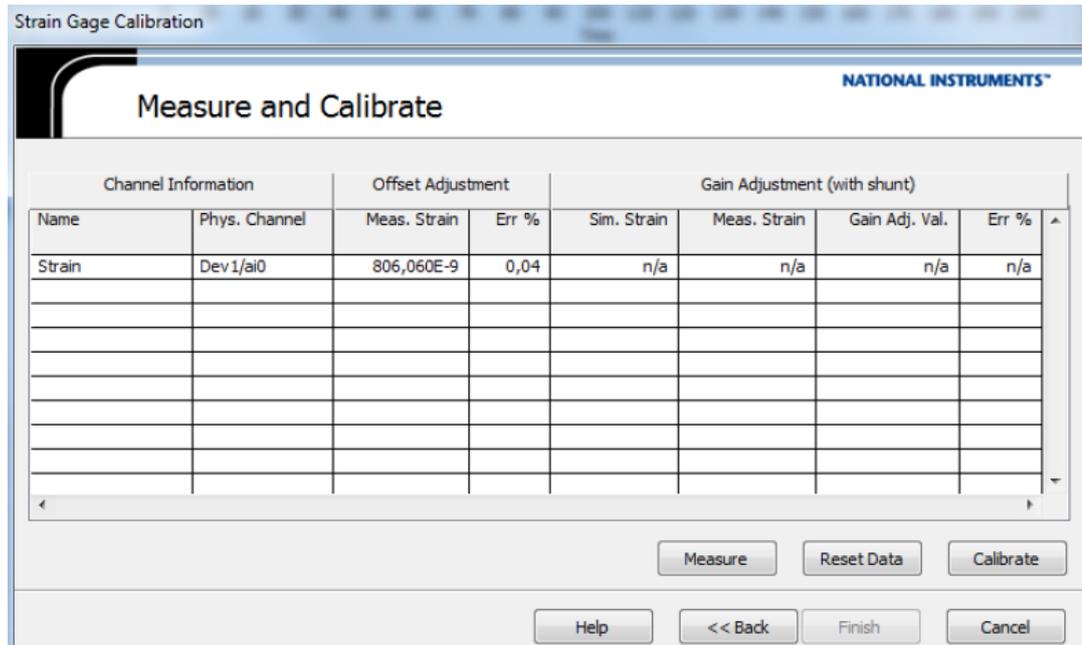


**Figura 3. 9.** Datos para la nueva escala

El factor de escala será colocado en la sección **Slope**, y la unidad relacionada a la magnitud física en la sección **Scaled**.

### 3.3.4 Calibración de la galga

Para el encendido de la galga, se da clic en la pestaña **Device** y se selecciona **Strain Calibration**, a continuación aparece una nueva pantalla en la que se da clic en **Next**, con lo que se mostrará una ventana.



**Figura 3. 10.** Calibración de la galga

La ventana mostrada anteriormente presenta los valores actuales de la galga y su error con respecto al cero. Se selecciona **Calibrate**, se espera unos segundos hasta que la tarjeta calibre el voltaje inicial de medición y se pulsa **Finish** para terminar.

### 3.4 Visualización de los datos mediante LabView

Para la visualización de datos se utiliza el software LabVIEW<sup>4</sup>, ya que a la vez de permitir interactuar con la tarjeta de adquisición de datos, permite procesar los resultados y representarlos en forma gráfica.

<sup>4</sup>Labview: Es un sistema de programación gráfico.

### 3.4.1 DAQ Assistant y LabVIEW

El DAQ Assistant es una función de LabVIEW, que nos permite conectar el interfaz de programación de labview con NI MAX.

Para utilizar el DAQ Assistant en Labview, debemos seguir los siguientes pasos:

1. Se da clic derecho en la pantalla Labview, lo que permite abrir una ventana de funciones propias del programa, seguimos la siguiente dirección para iniciar la función DAQ Assistant: **Express, Input, DAQ Assistant**.

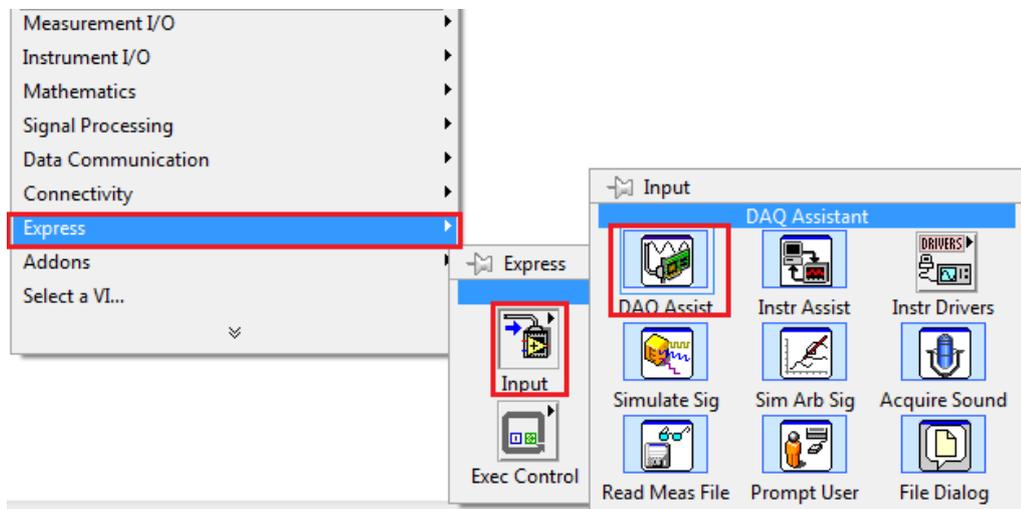


Figura 3. 11. Uso del DAQ Assistant

2. Al seleccionar DAQ Assist, se puede desplazar el icono a un sector de la pantalla de Labview. Al ubicarlo en un sitio, se abrirá la ventana del DAQ, donde se selecciona **Strain** en la pestaña de **Analog Input**.

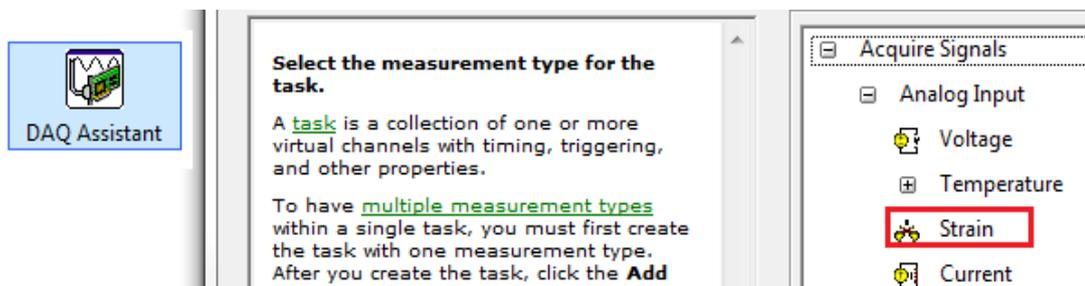


Figura 3. 12. DAQAssistant

3. Seleccionamos el canal físico donde está colocado el sensor, posteriormente se hará clic en **Finish**.

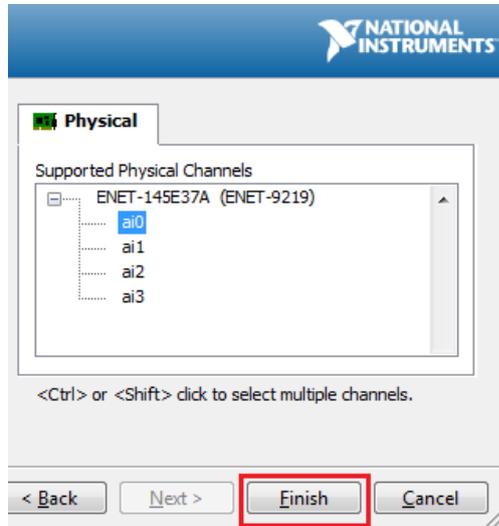


Figura 3. 13. Selección del canal de medición

4. Al hacer clic en **Finish**, inmediatamente se abrirá una ventana para la colocación de todos los factores referentes a la galga extensiométrica

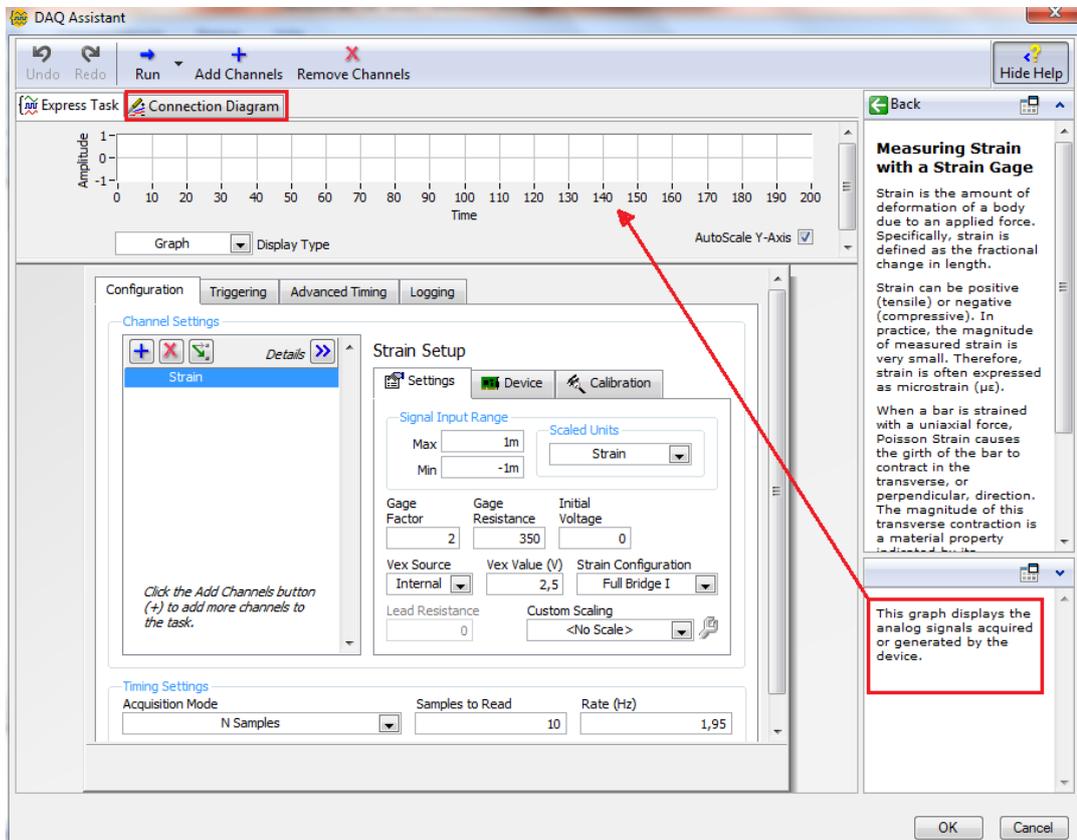


Figura 3. 14. Parámetros de medida

En dicha ventana también se podrá encontrar una pestaña llamada **Connection Diagram**, en la que podremos encontrar el diagrama de conexión del sensor hacia los canales físicos de la DAQ. Para adicionar un canal de medición se lo puede realizar pulsando en el símbolo "+" ubicado en la parte izquierda.

En caso de necesitar más información, se ubica sobre un parámetro y se genera una descripción en el panel ubicado en la parte derecha de la misma ventana.

### 3.4.2 Programación básica en Labview para visualizar la medición

Antes de empezar la programación en Labview se debe tener presente que todos los procesos de adquisición de datos anteriormente mencionados con la tarjeta DAQ deben estar funcionando en perfecto estado.

A continuación se muestra una configuración básica con la que ya se puede visualizar los datos medidos. Esta configuración es a modo de ejemplo, ya que dependiendo de los requerimientos, se puede configurar con más bloques, y obtener una visualización mejor de los resultados.

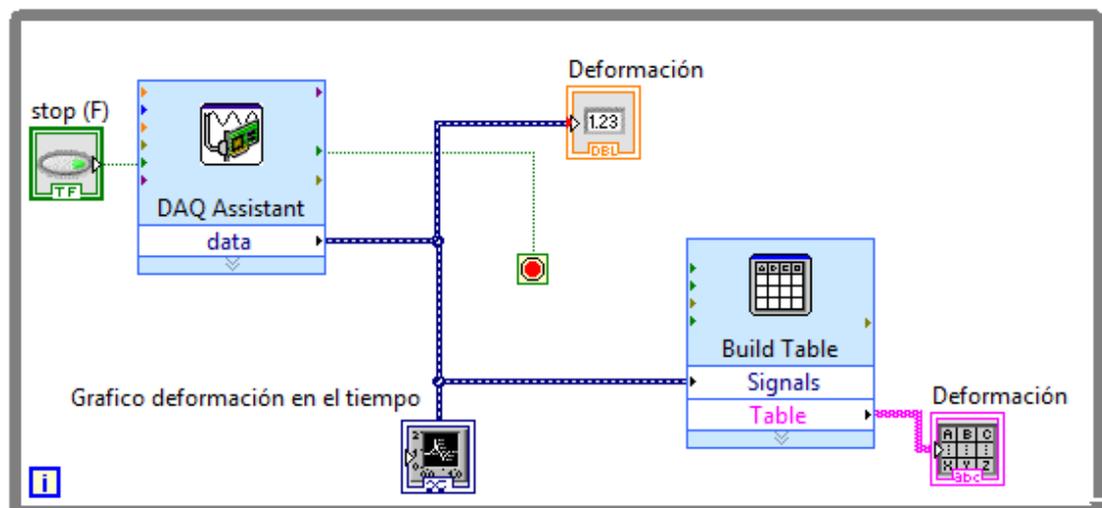


Figura 3. 15. Programación de Labview para la visualización de resultados

### 3.5 Programación específica en Labview para visualizar la medición de esfuerzos en la suspensión

A continuación se detallarán los pasos a seguir para crear un programa en Labview que permita leer los datos tomados por la tarjeta de adquisición, y a su vez representarlos de la mejor manera para los análisis posteriores.

#### 3.5.1 Programación para el almacenamiento de datos del vehículo SAE

Es necesario guardar los datos obtenidos en las diferentes pruebas realizadas, ya que es imposible el análisis en tiempo real, por lo que se crea una programación en Labview que permita guardar dichos valores, para posteriormente analizarlos de manera detenida.

A continuación se presenta una programación que permitirá guardar los valores obtenidos con la tarjeta de adquisición.

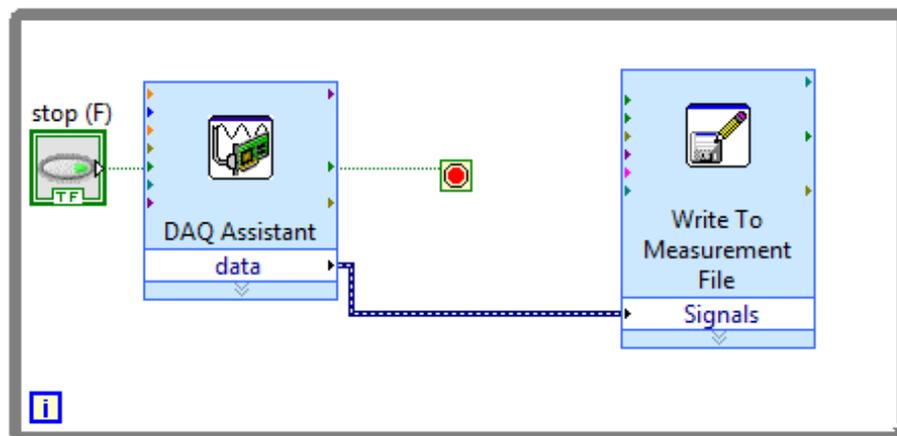


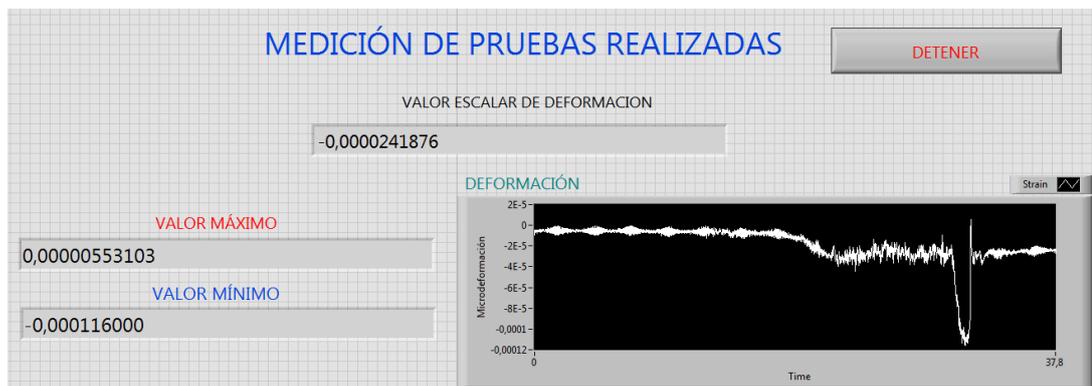
Figura 3. 16. Programación para almacenamiento de un archivo de medición Labview

#### 3.5.2 Programación para la lectura de datos del vehículo SAE

Labview así como permite guardar archivos con datos de mediciones, también permite leer los mismos desde un directorio dentro de la PC. Los datos que se obtienen mediante este lector ingresan a una programación la cual va a mostrar los diferentes resultados y parámetros deseados.

En el anexo B se presenta la programación realizada, la misma que permite leer los datos que se guardaron anteriormente, y encontrar los diferentes parámetros necesarios para un posterior análisis.

A continuación se muestra el interfaz en el que se mostrara los resultados obtenidos.



**Figura 3. 17.** Lectura de datos del vehículo Formula SAE (Labview)

### 3.6 Sumario

Previo al análisis de resultados, es necesario la adquisición de datos, es por ello que en el presente capítulo se presentó todo lo referente a la adquisición de datos y programación en Labview.

Se dio a conocer una fundamentación teórica del manejo y utilización del software controlador NI VISA. Luego de ello se muestra una programación que va a permitir tomar datos mediante la tarjeta de adquisición y guardarlos en nuestra PC.

Finalmente se indica una segunda programación en el software Labview la misma que va a permitir leer los datos almacenados y visualizarlos en un tiempo predeterminado, con los parámetros necesarios para el análisis en el capítulo siguiente.

# CAPÍTULO IV

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 Introducción

En este capítulo se presenta un análisis de resultados, partiendo inicialmente de las precauciones básicas que se deben tener en cuenta antes de realizar las pruebas. Seguido de aquello se procede a realizar las pruebas de frenado y en curva.

Dichos datos adquiridos en las pruebas se los va guardando en la PC, para posteriormente realizar la lectura de aquellos valores y realizar un análisis detallado del comportamiento de los brazos de lado izquierdo del vehículo; de la suspensión delantera y posterior, así como de las barras push-rods del mismo lado.

Luego se representa los resultados mediante tablas, que detallan los distintos parámetros que están presentes en el funcionamiento de la suspensión tal como esfuerzo, fuerza aplicada, y factor de seguridad. Finalmente se realiza un análisis de los resultados obtenidos.

### 4.2 Inspecciones de funcionamiento

Para la toma de datos en la suspensión del vehículo formula SAE, se debe tener presente que el mismo debe estar en movimiento, por lo que, antes de iniciar las pruebas y los análisis será necesario verificar 2 aspectos.

#### 4.2.1 Inspección visual

El vehículo de competencia formula SAE no debe presentar ningún tipo de peligro para la seguridad y el estado general del mismo debe ser apropiado para las condiciones de funcionamiento.



**Figura 4. 1.** *Inspección visual del vehículo Formulas SAE, UPS*

#### **4.2.2 Inspección de carretera**

La pista donde se realiza las pruebas presenta condiciones para que el vehículo pueda realizar su funcionamiento dinámico y alcance una velocidad considerable. No presenta obstáculos en su trayectoria y la superficie consta de dos rectas y dos curvas.



**Figura 4. 2.** *Pista donde se realizaron las pruebas*

#### **4.3 Pruebas en el vehículo formula SAE**

Para la validación del método experimental de adquisición de datos se realiza una previa instrumentación la misma que se detalla en el ANEXO A

### 4.3.1 Prueba estática:

La prueba estática valora aspectos como: adquisición de datos desde las galgas extensiométricas hacia la DAQ y la lectura de datos en el software de la computadora con el vehículo sin marcha (estacionado).



**Figura 4. 3.** *Adquisición de dato con el vehículo estacionado*

### 4.3.2 Pruebas dinámicas:

Las pruebas dinámicas valoran la adquisición de datos desde la DAQ al software. En estas pruebas el vehículo se encontrara en movimiento.

#### **Prueba de frenado**

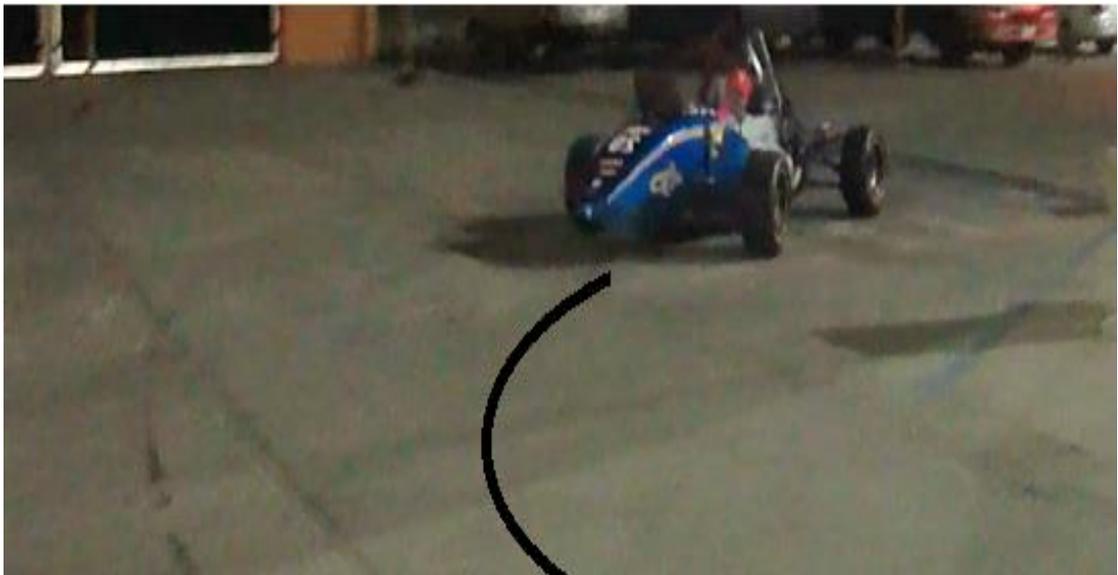
En el proceso de frenado los esfuerzos a los que está sometida una suspensión son considerables, La prueba consiste en una frenada brusca, la misma que se da después de que el vehículo alcance 30 Km/h.



**Figura 4. 4.** Prueba de frenado del vehículo Formula SAE

***Prueba en curvas:***

La prueba consiste en realizar vueltas continuas en la pista seleccionada, el vehículo alcanza la velocidad considerable después de la primera vuelta, siendo esta el punto de partida para la toma de datos.



**Figura 4. 5.** Prueba en curva del vehículo Formula SAE

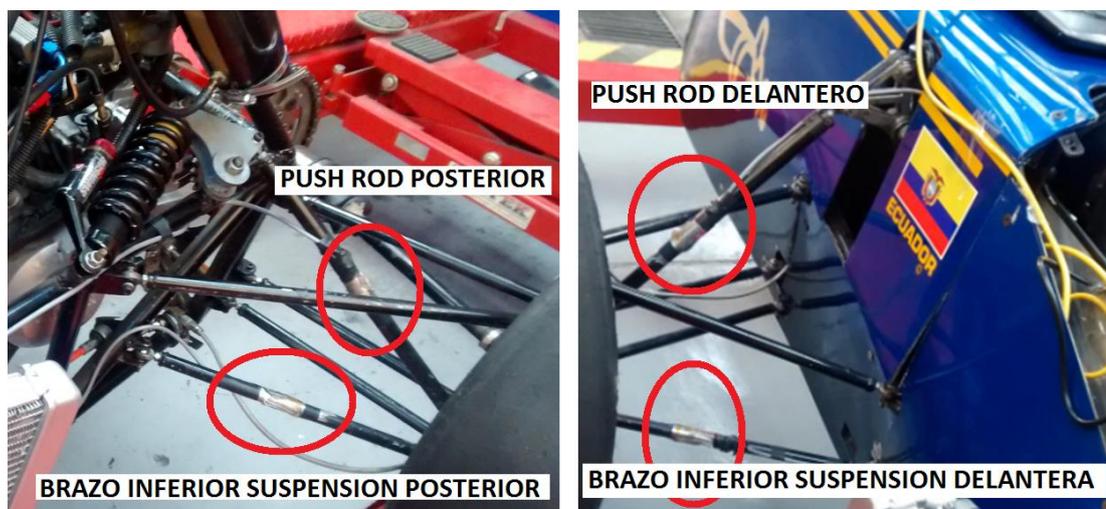
#### 4.4 Análisis de las gráficas obtenidas

Antes del análisis de las gráficas, es necesario indicar que se trabajó con el lado izquierdo del vehículo Formula SAE, en la suspensión delantera y posterior.



**Figura 4. 6.** Instrumentado del lado izquierdo del vehículo Fórmula SAE

El análisis se presenta en los brazos inferiores y en los push-rod de la suspensión tanto delantera como posterior del vehículo antes mencionado, DE AQUÍ EN ADELANTE se hará referencia las barras antes mencionadas, como lo muestra a figura.



**Figura 4. 7.** Barras instrumentadas de la suspensión del vehículo Formula SAE

#### 4.4.1 Análisis en el frenado

##### Brazo posterior de la suspensión delantera del vehículo formula SAE

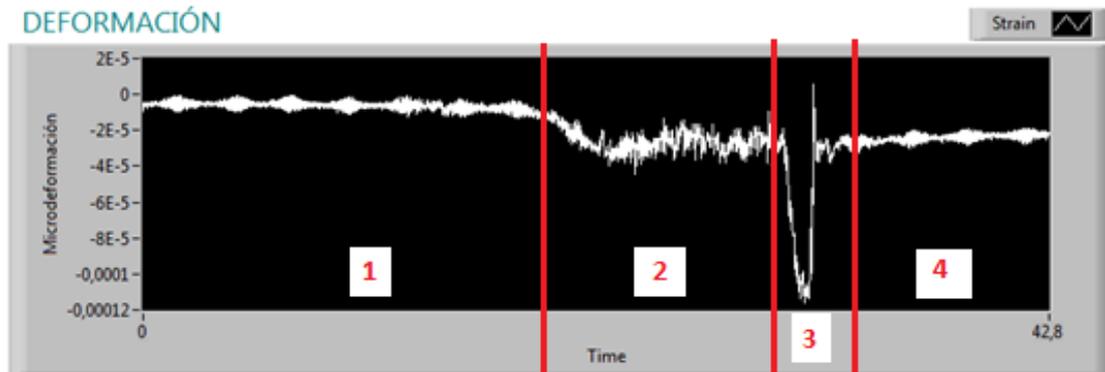


Figura 4. 8. Deformación del brazo de suspensión delantero

La etapa (1) hace referencia a la señal que emite la galga sin presentar variación en la deformación en el brazo de la suspensión, donde el vehículo permanece sin movimiento. En (2) se muestra un aumento de manera negativa (compresión) en la deformación producto del movimiento inicial del vehículo.

Durante la etapa (3) se produce el frenado repentino del vehículo generando valores extremos de deformación, en los cuales se centrara el análisis. En la etapa final (4) la señal se estabiliza reduciendo notablemente la deformación generada en (3) dado que el vehículo se detuvo

##### Brazo delantero de la suspensión posterior del vehículo formula SAE

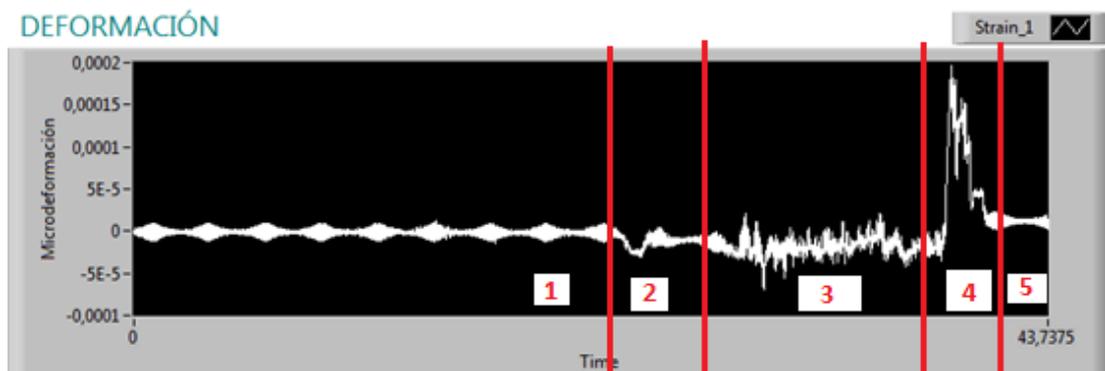


Figura 4. 9. Deformación del brazo de suspensión posterior

En la etapa (1) el vehículo permanece sin movimiento, lo que no genera variación de deformación. En la etapa (2) un intento de arranque del vehículo variando la deformación de manera negativa (compresión) que posteriormente en la etapa (3) se estabiliza causando el mismo efecto en la variación de la deformación.

En la etapa (4) se produce el frenado repentino del vehículo generando valores extremos de deformación (tracción), en los cuales se centrara el análisis. En la etapa final (5) la señal se estabiliza reduciendo notablemente la deformación generada en (4) dado que el vehículo se detuvo.

### Push-rod delantero de la suspensión del vehículo formula SAE

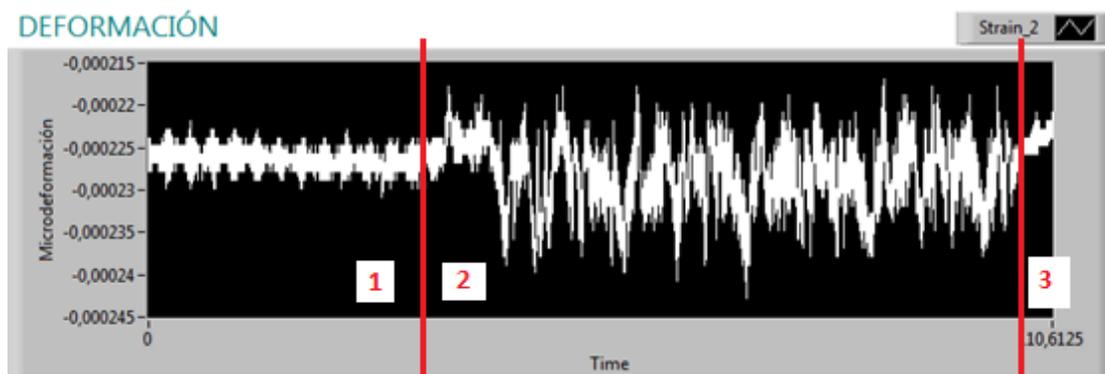


Figura 4. 10. Deformación del push-rod delantero

En la etapa (1) existe una deformación causada por el peso del vehículo, la misma que se mantiene constante mientras el vehículo se encuentre sin movimiento. En la etapa (2) el vehículo se encuentra en movimiento con variaciones de la deformación, siempre negativos, lo que nos indica que la barra se encuentra en todo momento en compresión.

En la etapa (3) la gráfica regresa al comportamiento inicial mostrado en la etapa (1)

## Push-rod de la suspensión posterior del vehículo formula SAE

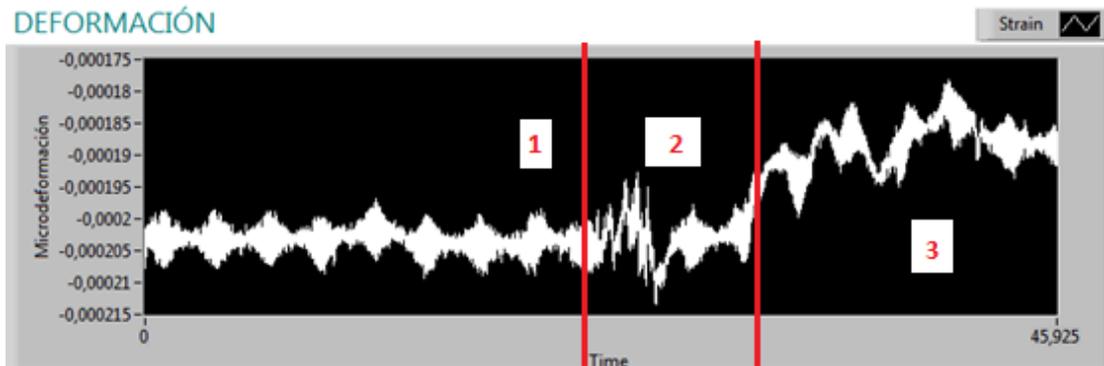


Figura 4. 11. Deformación del push-rod posterior

En la etapa (1) el vehículo no presenta movimiento, obteniendo un valor de deformación negativa, dado por el peso del vehículo en la parte posterior. En la etapa (2) las variaciones de deformación se dan por el movimiento del vehículo. En el instante del frenado la barra push-rod posterior reduce su deformación como se muestra en la etapa (3).

### 4.4.2 Análisis en curva

## Brazo posterior de la suspensión delantera del vehículo Formula SAE



Figura 4. 12. Deformación del brazo en curva

En la etapa (1) el vehículo se encuentra detenido, no existe variación en la deformación. El vehículo empieza el movimiento (2) y crea compresión en la barra. Alcanza la velocidad (3), el vehículo ingresa en la curva, donde empieza la variación

de deformación, este proceso se da de manera repetitiva durante las etapas (4, 5, 6). Para finalizar (7) el vehículo alcanza el tiempo de frenado que ya se lo analizó anteriormente.

#### 4.5 Representación de los datos obtenidos

Los valores adquiridos por el software antes mencionado, son valores de deformación que sirven para el análisis de parámetros de diseño como:

##### 4.5.1 Esfuerzos aplicados en las barras de suspensión del vehículo formula SAE

Para encontrar los esfuerzos aplicados en las barras de la suspensión del vehículo es necesario conocer el módulo de elasticidad del material con el que se encuentran diseñados. Posteriormente se usa la fórmula 1 (ANEXO A)

**Tabla 4. 1.** *Características del material*

**Fuente:** *UPS Racing Team*

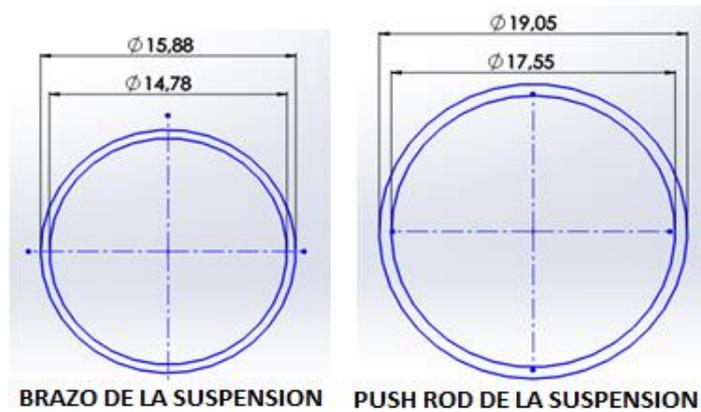
Material del brazo de suspensión	Acero Estructural
Material del push-rod	AISI 1018
<b>Módulo de elasticidad del acero estructural</b>	<b>E = 210 GPa</b>

##### 4.5.2 Cargas aplicadas en las barras de suspensión del vehículo fórmula SAE

La carga a la que está sometida las barras de la suspensión se encuentran una vez que se obtengan los esfuerzos y se relacionen con el área (A) de las barras. La carga se obtiene por medio de la siguiente expresión

$$\sigma_x = \frac{F}{A}$$

Para el cálculo de las áreas se conoce, por mediciones, los diámetros del brazo y del push-rod de la suspensión del vehículo.



**Figura 4. 13.** Dimensiones de las barras de la suspensión (milímetros)

Ya obtenidas las medidas se obtienen las áreas de cada una de las barras analizadas obteniendo como resultado.

**Tabla 4. 2.** Características del área de las barras de la suspensión del Formula SAE

<b>Área de los brazos de la suspensión</b>	Tienen un diámetro de 5/8 de pulgada (15,88mm) con un espesor de 1,1 mm <i>A= 4,65E-5 metros cuadrados</i>
<b>Área del push-rod de la suspensión</b>	Tienen un diámetro de 3/4 de pulgada (19,05mm) con un espesor de 1,5 mm <i>A= 4,31E-5 metros cuadrados</i>

#### 4.5.3 Análisis del factor de seguridad en la suspensión del vehículo formula SAE

El “factor de seguridad” (FS) es el valor que permite una precaución y un mejoramiento en el diseño de los elementos mecánicos:

**Tabla 4. 3.** Características de esfuerzos del material de la suspensión del Formula SAE

<b>Esfuerzos del acero estructural [MPa]</b>	<b>Esfuerzo de resistencia ultima [MPa]</b>	<b>Esfuerzo de resistencia a la fluencia [MPa]</b>
	400	250

#### 4.5.4 Datos experimentales obtenidos y calculados

##### Pruebas de frenado

**Tabla 4. 4.** Datos del brazo posterior de la suspensión delantera del formula SAE

Pruebas	Deformación [u]	Esfuerzo [MPa]	Fuerza (N)	Factor de seguridad	
				Basado en la resistencia a la fluencia	Basado en la resistencia ultima
1	- 116,00	- 24,36	- 1244,80	10,26	16,42
2	- 93,50	- 19,63	- 1003,42	12,73	20,37
3	- 95,08	- 19,96	- 1020,39	12,51	20,04

**Tabla 4. 5.** Datos del brazo delantero de la suspensión posterior del Formula SAE

Pruebas	Deformación [u]	Esfuerzo [MPa]	Fuerza (N)	Factor de seguridad	
				Basado en la resistencia a la fluencia	Basado en la resistencia ultima
1	197,00	41,37	1114,01	6,01	9,66
2	196,01	41,16	1103,17	6,07	9,71
3	185,00	38,85	1985,24	6,50	10,29

**Tabla 4. 6.** Datos del push-rod de la suspensión delantera del Formula SAE.

Pruebas	Deformación [u]	Esfuerzo [MPa]	Fuerza (N)	Factor de seguridad	
				Basado en la resistencia a la fluencia	Basado en la resistencia ultima
1	- 242,80	-50,98	-2605,49	4,90	7,84
2	- 222,82	-46,79	-2391,12	5,34	8,54
3	- 224,51	-47,14	-2409,24	5,30	8,48

**Tabla 4. 7.** Datos del push-rod de la suspensión posterior del Formula SAE.

Pruebas	Deformación [u]	Esfuerzo [MPa]	Fuerza (N)	Factor de seguridad	
				Basado en la resistencia a la fluencia	Basado en la resistencia ultima
1	- 178,77	-37,41	-1912,01	6,68	10,69
2	- 175,68	-36,89	-1885,07	6,77	10,84
3	- 177,32	-37,23	-1902,45	6,71	10,74

### Pruebas en curvas

**Tabla 4. 8.** Datos del brazo posterior de la suspensión delantera del formula SAE.

Curvas	Deformación [u]	Esfuerzo [MPa]	Fuerza (N)	Factor de seguridad	
				Basado en la resistencia a la fluencia	Basado en la resistencia ultima
1	-48,53	-10,19	-520,83	5,15	8,24
2	-47,50	-9,97	-509,46	5,26	8,42
3	-59,88	-12,57	-642,66	4,18	6,68
4	-48,97	-10,26	-524,74	5,11	8,17

**Tabla 4. 9.** Datos del push-rod de la suspensión delantera del Formula SAE.

Curvas	Deformación [u]	Esfuerzo [MPa]	Fuerza (N)	Factor de seguridad	
				Basado en la resistencia a la fluencia	Basado en la resistencia ultima
1	-190,70	-40,04	-1980,08	6,24	9,99
2	-180,05	-37,81	-1932,09	6,61	10,58
3	-192,46	-40,41	-2064,95	6,19	9,90
4	-184,52	-38,74	-1979,96	6,45	10,33

## 4.6 Análisis de datos obtenidos

A continuación se presenta una tabla donde se resumen los resultados de las tablas anteriores, aquí se representan los parámetros obtenidos a partir de la medición de deformaciones de la suspensión.

### 4.6.1 Prueba de frenado

**Tabla 4. 10.** *Resumen de los datos obtenido en frenado.*

Pruebas	Deformación [u]	Esfuerzo [MPa]	Fuerza (N)	Factor de seguridad	
				Basado en la resistencia a lafluencia	Basado en la resistencia ultima
Brazo delantero	-101,53	-21,31	-1089,53	11,81	18,94
Brazo posterior	192,67	40,46	1400,80	6,19	9,88
Push-rod delantero	-230,04	-48,30	-2468,61	5,180	8,28
Push-rod Posterior	-177,257	-37,177	-1899,843	6,720	10,757

Los valores en resumen que se presentan en la tabla (4,10) indican el estado del elemento, es decir, los esfuerzos a los que están sometidas las barras analizadas. Los esfuerzos pueden ser de compresión o tracción.

De esta manera el brazo delantero junto con los dos push-rod (delantero y posterior) están sometidos a una compresión, esto significa que estos elementos soportan gran parte del peso del vehículo incluyendo la desaceleración del mismo en el instante de frenado.

El brazo posterior al tener un signo positivo (+) se encuentra sometido a tracción, esto por la oposición al frenado y porque soporta menos porcentaje del peso del vehículo (transferencia de masas)

Los valores de factor de seguridad son elevados lo que indica que las barras de la suspensión del vehículo Fórmula SAE, soportarán las cargas de frenado.

#### 4.6.2 Prueba en curvas

**Tabla 4. 11.** *Resumen de los datos obtenido en curva.*

Curvas	Deformación [u]	Esfuerzo [MPa]	Fuerza (N)	Factor de seguridad	
				Basado en la resistencia a la fluencia	Basado en la resistencia ultima
Brazo delantero	-68,295	-14,330	-732,563	6,565	10,504
Push-rod delantero	-249,243	-52,333	2652,360	8,499	13,598

El comportamiento negativo presente en la tabla 4,11, tanto, en el brazo como en el push-rod indica que cuando el vehículo está sometido a una curva, se genera una compresión en los mencionados elementos de suspensión. En el caso de presentar valores positivos significa que el neumático perdió contacto con la pista

#### 4.7 Sumario

En este capítulo se realizó un análisis de resultados de las fuerzas actuantes en la suspensión del vehículo formula SAE. Para ello se partió de la medida de deformación producida en los elementos mediante la instrumentación que se realizó en el capítulo 2.

Con la ayuda del software de adquisición de datos, se puedo visualizar las gráficas de deformación, dichas graficas se las dividió en etapas, para simplificación del análisis.

Se obtuvieron valores críticos tanto de deformación y otros factores como fuerza, esfuerzo y factor de seguridad, los cuales fueron colocados en tablas que visualizan de mejor manera los resultados y permiten un mejor análisis.

## CONCLUSIONES

Una vez finalizado el presente trabajo se concluye lo siguiente:

- Los objetivos del presente proyecto fueron cumplidos satisfactoriamente, pues se logró determinar las fuerzas actuantes en la suspensión del vehículo formula SAE, mediante el análisis experimental basado en la extensometría eléctrica.
- La revisión bibliográfica inicial tiene gran importancia ya que es necesario tener un conocimiento teórico de los conceptos básicos en los cuales se basa la extensometría eléctrica, para con ello poder tener un conocimiento de los parámetros que podemos obtener para consideraciones de diseños mecánicos.
- El proceso de instrumentación de galgas extensiométricas conlleva gran precisión. Una incorrecta colocación de los sensores puede generar datos erróneos en la medición.
- Un correcto uso de los medios informáticos facilita la visualización de los resultados. El software utilizado para el tratamiento de señales es el NI Labview, que permite la interacción con la tarjeta de adquisición de datos NI DAQ, y la visualización de los datos obtenidos mediante una programación.
- En el análisis de los resultados se determinan los esfuerzos máximos que alcanza los brazos inferiores y los push rods de la suspensión, tanto delanteros como posteriores. El análisis sería mucho más exacto si el vehículo fuese sometido a cargas dinámicas reales de una pista de competición, que en nuestro medio es difícil encontrar.
- Un parámetro importante que se debe tener en cuenta en el diseño de cualquier elemento es el factor de seguridad para el cual está diseñado, es por ello que todo análisis tanto teórico como experimental debe incluir un análisis del factor de seguridad que se está utilizando.

- Los rangos máximos de deformación y esfuerzos obtenidos, en los elementos analizados se generan en las pruebas de frenado, en donde los valores de factor de seguridad no son críticos, por lo que la suspensión supera satisfactoriamente las pruebas.
- No se realizan pruebas en aceleración, ya que el vehículo está diseñado para detenerse desde una velocidad máxima en un tiempo mínimo, generándose mayores fuerzas en el frenado que en la aceleración.
- Los brazos de suspensión tanto delantero como posterior, se encuentran sometidos a cambios de esfuerzo bruscos. Esto es debido a que a diferencia de los push rods que se unen al chasis por medio de un resorte-amortiguador, los brazos de suspensión se sujetan directamente al chasis mediante rótulas.
- En la prueba de frenado, los valores de deformación en los push rods posteriores no presentan valores positivos, lo que indica que la barra de empuje push rod posterior siempre se encuentra en compresión.
- Las pruebas realizadas en curva presentan un esfuerzo menor tanto en los brazos de suspensión, como en las barras de empuje push rod, lo que deja a la prueba de frenado como la que genera mayores cargas sobre los elementos de la suspensión delantera.
- El material con el que están diseñados los tubos de las suspensión del vehículo formula SAE soportan satisfactoriamente las pruebas, pudiéndose en caso de ser necesario reemplazar el material de construcción por uno de menor resistencia al esfuerzo, o con uno de menor sección transversal con el fin de reducir pesos, lo que ayudaría al comportamiento del vehículo durante la competencia.

- Para la validación de los resultados obtenidos es necesario partir de un ensayo experimental previo a fin de calcular el error entre los datos medidos y los datos calculados teóricamente, un rango de error de 10% es aceptable.

## **TRABAJO FUTURO**

Como trabajo futuro se propone:

- Realizar la adquisición de datos referenciándolos a una posición en el tiempo del vehículo con la ayuda de un GPS, para de esta manera obtener medidas de esfuerzo en cada posición de la pista.
- Realizar la validación del diseño de un prototipo formula SAE mediante extensometría eléctrica aplicada a diferentes partes del vehículo.
- Realizar las pruebas con el vehículo instrumentado en pistas idóneas para competición, a fin de recolectar valores más exactos.
- Proponer mejoras en el diseño basándose en datos obtenidos mediante extensometría eléctrica

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] OswaldoRiosBermudez. (2015, enero) Mecanica de los materiales. Documento.
- [2] Ignacio MOrreno Velasco, "Apuntes de Instrumentación electrónica," Area de Tecnología Electronica, Universidad de Burgos,.
- [3] Carlos Navarro. APLICACIÓN DE LA EXTENSOMETRÍA A PROBLEMAS. Diapositivas.
- [4] Benjamin Torres Gorriz, "ESTUDIO EXPERIMENTAL DE SENSORES ÓPTICOS TIPO FBG PARA MEDIR DEFORMACIONES Y TEMPERATURAS EN ESTRUCTURAS," *Noviembre 2009*, p. 177, Noviembre 2009.
- [5] Ing.Javier Sosa. Galgas extensiométricas Strain gage 1. [Online].  
[www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Strain\\_Gages\\_1.pdf](http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Strain_Gages_1.pdf)
- [6] Karl Hoffmann, *Una Introducción a la medición mediante bandas extensiométricas*, Emilio Estany-Catalán, Ed. Barcelona, España: Hottinchnik GmbH Baldwin Messte.
- [7] Luis Alfonso Loaiza. (2011, noviembre ) slideshare. [Online].  
<http://es.slideshare.net/luisalfonsoloaiza/galgas>
- [8] Omega. (2015, Jan.) Omega Engineering. [Online].  
[http://www.omega.com/pptst/SGD\\_LINEAR1-AXIS.html](http://www.omega.com/pptst/SGD_LINEAR1-AXIS.html)
- [9] Omega. (2015, Jan.) Omega Engineering. [Online].  
[http://www.omega.com/pptst/SGD\\_BIAXIAL.html](http://www.omega.com/pptst/SGD_BIAXIAL.html)
- [10] Omega. (2015, Jan.) Omega Engineering. [Online].  
[http://www.omega.com/pptst/SGD\\_TRIAXIAL.html](http://www.omega.com/pptst/SGD_TRIAXIAL.html)
- [11] Omega. (2015, Jan.) Omega Engineering. [Online].  
[http://www.omega.com/pptst/SGD\\_StressRelief.html](http://www.omega.com/pptst/SGD_StressRelief.html)
- [12] Omega Engineering. (2015, Jan.) Omega Engineering. [Online].  
<http://www.omega.com/pptst/DP41-S.html>
- [13] CENAM. (2006) CENTRO NACIONAL DE METROLOGIA. [Online].  
<http://www.cenam.mx/fyp/transductores.html>
- [14] Pablo Xavier Idrovo and Luis Miguel Quintanilla, Aplicación de galgas extensiométricas en el laboratorio de mecánica de materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica para la obtención de deformaciones en elementos sometidos a cargas combinadas, 2010, TESIS DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO.

- [15] Ing. Giovanni Pablo Pillajo Quijia, ESTUDIO CINEMÁTICO DEL COMPORTAMIENTO DE LA SUSPENSIÓN DE UN PROTOTIPO DE FORMULA SAE STUDENT ELÉCTRICO DEL EQUIPO UPM RACING, 2012, PROYECTO FIN DE MASTER.
- [16] Estudiantes de la UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DEL PERU. (2011, Noviembre) URT- UTP Racing Team. [Online]. <http://urthsae.blogspot.com/2011/11/estudio-de-neumaticos-utilizados-para.html>
- [17] National Instrument, Data Acquisition and Telemetry from a Formula Student Race Car using NI LabVIEW and Single-Board RIO, Publicacion.
- [18] Ricardo Moreno Nieto and Roberto Carlos Ruiz Platan, ESTUDIO TEÓRICO, NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL PARA EL ANÁLISIS DEL MECANISMO EN EL SISTEMA DE DIRECCIÓN DE UN VEHÍCULO FORMULA, 2013, TESIS.
- [19] RODRIGO MINOZZO, ADQUISICIÓN DE FUERZAS DINAMICAS ACTUANTES EN LA SUSPENSION DELANTERA DE UN VEHÍCULO BAJA SAE, 2012, Monografía previo a la obtencion de diploma de Ingeniero Mecanico.
- [20] OMEGA. (2014) OMEGA Engineering. [Online]. [http://www.omega.com/Pressure/pdf/SGD\\_LINEAR1-AXIS.pdf](http://www.omega.com/Pressure/pdf/SGD_LINEAR1-AXIS.pdf)
- [21] © HBM. (2015) HBM Test and Measurement. [Online]. <http://www.hbm.com/es/menu/consejos-y-trucos/analisis-experimental-de-tensiones/eleccion-del-adhesivo-adecuado-para-la-instalacion-de-galgas-extensometricas/>
- [22] OMEGA. (2015, Enero) Omega Engineering. [Online]. [http://www.omega.com/Pressure/pdf/SGD\\_LINEAR1-AXIS.pdf](http://www.omega.com/Pressure/pdf/SGD_LINEAR1-AXIS.pdf)
- [23] OMEGA. (2015, Enero) Omega Engineering. [Online]. [http://www.omega.com/Pressure/pdf/Bridge\\_Completion\\_Resistors\\_RES.pdf](http://www.omega.com/Pressure/pdf/Bridge_Completion_Resistors_RES.pdf)
- [24] OMEGA. (2015, Enero) Omega Engineering. [Online]. [http://www.omega.com/pptst/Strain\\_Gage\\_Adhesives.html](http://www.omega.com/pptst/Strain_Gage_Adhesives.html)
- [25] National Instruments. (2015, Enero) NI ENET-9219 - Data Sheet - National Instruments. [Online]. <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-72>
- [26] Bonilla Novillo, Sayuri Monserrath; López Ortiz, Santiago Alejandro;, Diseño y construcción de un sistema de análisis de esfuerzos para ensayos de flexión en sistemas isostáticos e hiperestáticos, 2012, TESIS DE GRADO.
- [27] Omega. (2014) Strain Gage Technical Data. [Online]. [http://es.omega.com/techref/pdf/STRAIN\\_GAGE\\_TECHNICAL\\_DATA.pdf](http://es.omega.com/techref/pdf/STRAIN_GAGE_TECHNICAL_DATA.pdf)

- [28] Manuel Ángel MARTINEZ, *Medida de la fuerza de empuje de las hélices marinas mediante técnicas de extensometría*. España: Universidad de Oviedo, 2005.
- [29] National Instruments México. (2010, agosto) Medición de Tensión desde Galgas Extensiométricas con LabVIEW. [Online]. <https://www.youtube.com/watch?v=TTm-XwjcskA>
- [30] Gabriel Arturo Cruz Castro and Diego Fernando Mesías Izurieta, DISEÑO, CONSTRUCCION E IMPLEMENTACION DE SISTEMAS DE SUSPENSIÓN, DIRECCIÓN Y FRENOS DEL VEHICULO FORMULA SAE 2012, 2013, Proyecto previo a al obtención del titulo de ingeniero automotriz.
- [31] Juan Antonio Marchán. (2011, marzo) Tertulias de Fórmula 1. [Online]. <https://tertuliasdef1.wordpress.com/2011/03/31/suspensiones-en-f1-objetivo-y-partes-push-rod-vs-pull-rod/>
- [32] EDGAR YOBANY BUITRAGO BETANCOURT, DISEÑO DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO MONOPLAZA, 2011, TESIS Universidad nacional de Colombia Sede Medellin.
- [33] Carlos H. Saucedo-Zárate,.
- [34] Saucedo-Zárate, Carlos ; López-López, Máximo; Sánchez-López, Carlos; Huerta-Ruelas, Jorge A;, "Sistema experimental para el estudio de microdeformaciones mecánicas mediante anisotropía óptica inducida," *SciELO*, sep 2010.
- [35] GIANNI ROVITO SCANDIFFIO. (2013) EPTISA. [Online]. [http://www.eptisa.com/descargas/articulos/pavimentos\\_inteligentes.pdf](http://www.eptisa.com/descargas/articulos/pavimentos_inteligentes.pdf)

## ANEXO A

### VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EXTENSOMETRÍA ELÉCTRICA

El método de validación experimental es aplicado a una viga empotrada en un extremo que se encuentra sometida a una carga puntual en el otro extremo

#### Descripción de la validación experimental

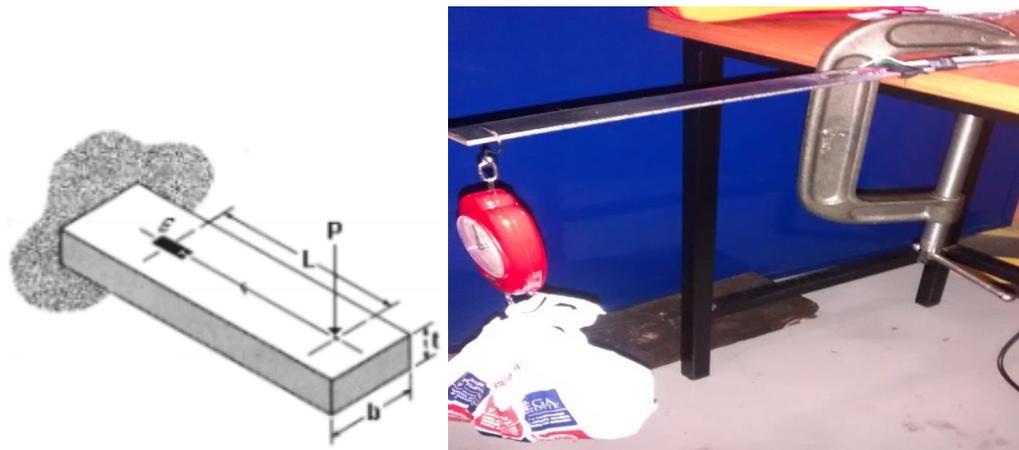
Se determinarán los esfuerzos y las deformaciones utilizando la técnica de extensometría eléctrica. Para validar los datos experimentales se realizará el análisis en una pieza sometida a flexión y se tomara en cuenta los cálculos teóricos de la ciencia de mecánica de materiales, y los cálculos que surgen a partir de los datos obtenidos de las mediciones experimentales. También se efectuará un análisis comparativo entre los resultados teóricos y los resultados experimentales con el fin de analizar un rango de error en el proceso experimental y de esta manera saber si las pruebas son válidas o no.

#### Estado de tensiones y material

Los puntos situados sobre la superficie de una pieza están sometidos a un estado de tensiones bidimensional ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$ ). Utilizando extensometría se puede medir ( $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ ,  $\gamma_{xy}$ ). Las galgas extensométricas permiten medir directamente  $\epsilon_x$  y  $\epsilon_y$  pero no  $\gamma_{xy}$ , es decir la galga que se utiliza es de sentido unidireccional determinando el esfuerzo cortante. Para esta prueba se presentan las características del material.

**Tabla ANEXO A1. Características del material**

Material	Acero Estructural
Módulo de elasticidad	$E = 210 \text{ Gpa}$
Coefficiente de Poisson	$\nu = 0,3$
Longitud	$L = 207 \text{ mm}$
Base (magnitud)	$b = 29 \text{ mm}$
Altura	$t = 3,6 \text{ mm}$



*Figura Anexo A1. Esquema de la viga analizada*

### **Análisis de resultados**

Los datos obtenidos experimentalmente se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla ANEXO A2. Datos obtenidos**

<b>Medición</b>	<b>Fuerza [N]</b>	<b>Deformación medida [μ]</b>
1	7,357	11
2	14,224	21
3	18,148	29
4	23,053	35

Para el cálculo teórico se utiliza la fórmula:

$$\sigma_x = \frac{M * y}{I}$$

Dónde:

M: Momento flexionante (fuerza aplicada por la longitud L)

Y: Distancia del eje neutro al punto a ser analizado

I: Momento de inercia de la sección transversal

$$I = \frac{1}{12} (b * t^3)$$

Para obtener el valor del esfuerzo normal con los datos experimentales se utiliza la siguiente fórmula:

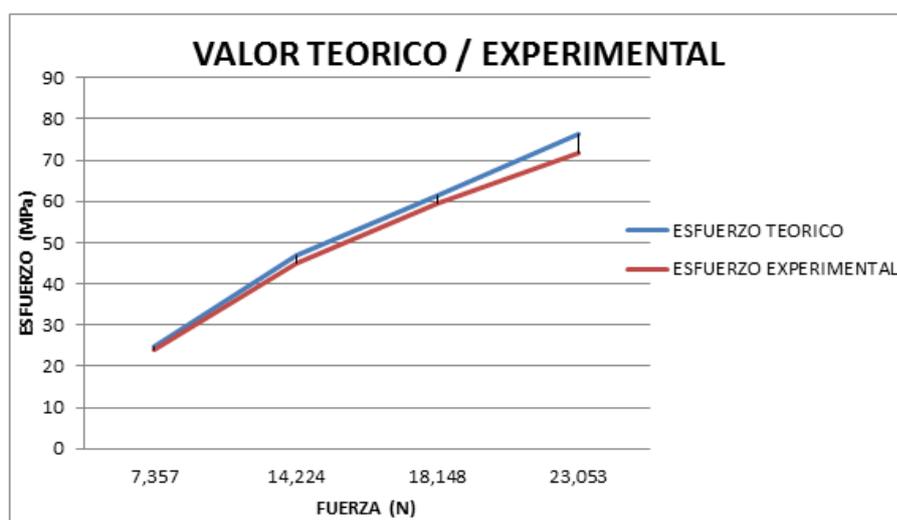
$$\sigma_x = E * \epsilon_x \text{ (F 1)}$$

A continuación se realiza una comparación entre los valores del esfuerzo teórico y experimental:

**Tabla ANEXO A3.** Comparativa de esfuerzos teóricos y experimentales

Muestra	Fuerza [N]	Esfuerzo [MPa]		Error relativo [%]
		Esfuerzo Teórico [MPa]	Esfuerzo Experimental [MPa]	
1	7,357	24,83	24,15	2,73
2	14,224	47,00	45,10	4,04
3	18,148	61,59	59,68	3,10
4	23,053	76,50	71,80	6,14

El error promedio entre los valores del esfuerzo teórico y del esfuerzo experimental es del 4%. Se concluye que aplicar la técnica de extensometría eléctrica en el análisis experimental de esfuerzos y deformaciones en piezas sometidas a tracción y compresión si conlleva a obtener datos reales en un funcionamiento dinámico de elementos mecánicos,



**Figura Anexo A2.** Esquema del rango de erros entre valores teóricos y experimentales

# ANEXO B

## PRUEBAS DE FRENADO

### UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA

#### MEDICIÓN BRAZO DELANTERO

DETENER

VALOR ESCALAR DE DEFORMACION

-0,0000222903

VALOR MÁXIMO  
0,00000553103

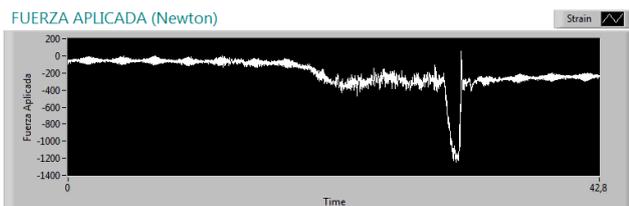
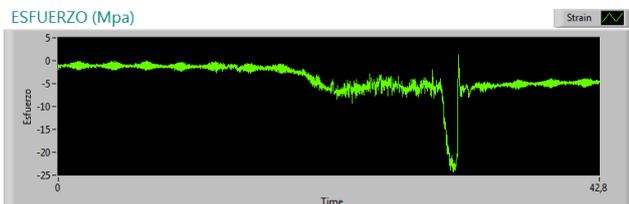
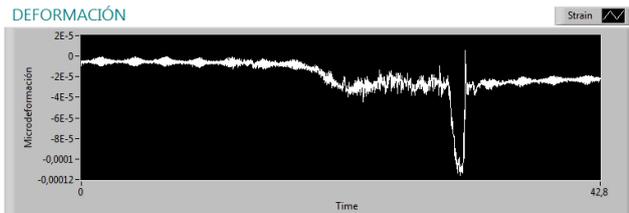
VALOR MÍNIMO  
-0,000116000

VALOR MÁXIMO (Mpa)  
1,16152

VALOR MÍNIMO (Mpa)  
-24,3600

VALOR MÁXIMO (Newton)  
59,3534

VALOR MÍNIMO (Newton)  
-1244,80



#### MEDICIÓN BRAZO POSTERIOR

DETENER

VALOR ESCALAR DE DEFORMACION

0,0000111639

VALOR MÁXIMO  
0,000197000

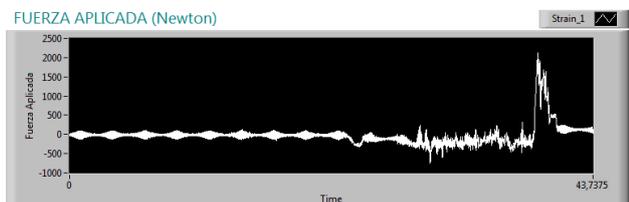
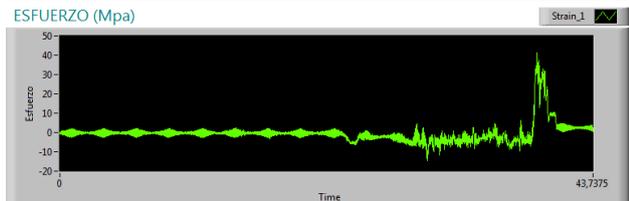
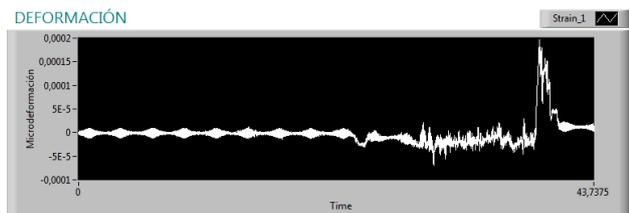
VALOR MÍNIMO  
-0,0000693863

VALOR MÁXIMO (Mpa)  
41,3700

VALOR MÍNIMO (Mpa)  
-14,5711

VALOR MÁXIMO (Newton)  
2114,01

VALOR MÍNIMO (Newton)  
-744,584



# UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA

## MEDICIÓN PUSH ROD DELANTERO

DETENER

VALOR ESCALAR DE DEFORMACION

-0,00064828

VALOR MÁXIMO

-0,000216800

VALOR MÍNIMO

-0,000242800

VALOR MÁXIMO (Mpa)

-45,5280

VALOR MÍNIMO (Mpa)

-50,9880

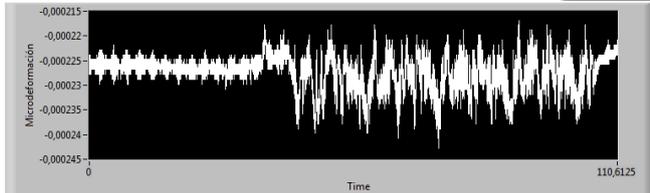
VALOR MÁXIMO (Newton)

-2326,48

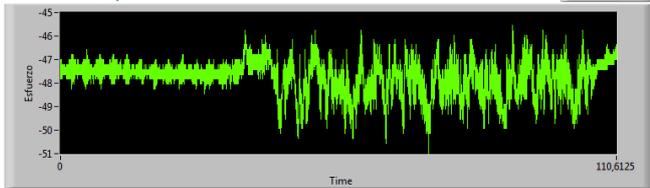
VALOR MÍNIMO (Newton)

-2605,49

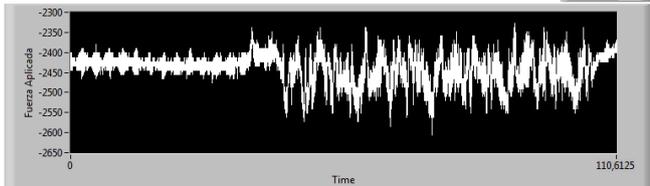
DEFORMACIÓN



ESFUERZO (Mpa)



FUERZA APLICADA (Newton)



# UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA

## MEDICIÓN PUSH ROD POSTERIOR

DETENER

VALOR ESCALAR DE DEFORMACION

-0,00000785672

VALOR MÁXIMO

-0,000178177

VALOR MÍNIMO

-0,000213310

VALOR MÁXIMO (Mpa)

-37,4171

VALOR MÍNIMO (Mpa)

-44,7951

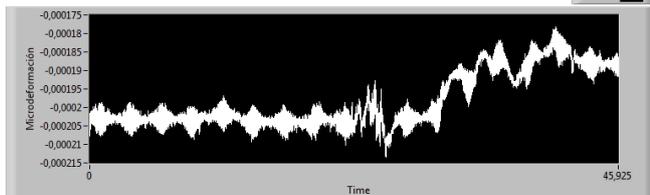
VALOR MÁXIMO (Newton)

-1912,01

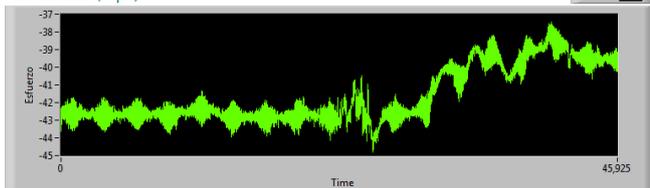
VALOR MÍNIMO (Newton)

-2289,03

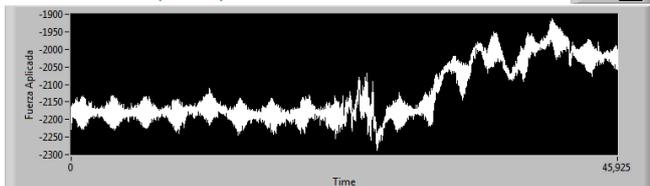
DEFORMACIÓN



ESFUERZO (Mpa)



FUERZA APLICADA (Newton)



# PRUEBAS EN CURVA

## UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA

### MEDICIÓN BRAZO DELANTERO EN CURVA

DETENER

VALOR ESCALAR DE DEFORMACION

0,00000286116

VALOR MÁXIMO

0,0000683219

VALOR MÍNIMO

-0,000121000

VALOR MÁXIMO (Mpa)

14,3476

VALOR MÍNIMO (Mpa)

-25,4100

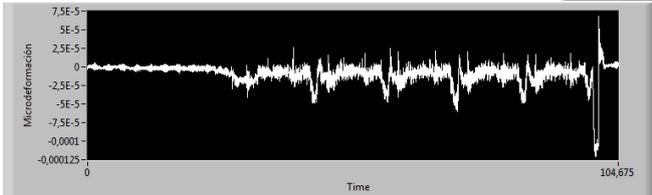
VALOR MÁXIMO (Newton)

733,162

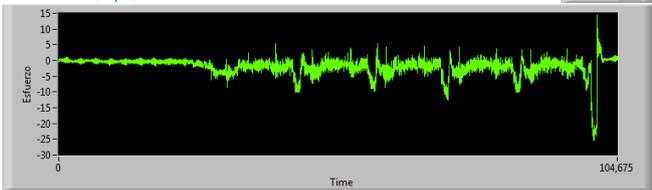
VALOR MÍNIMO (Newton)

-1298,45

DEFORMACIÓN



ESFUERZO (Mpa)



FUERZA APLICADA (Newton)

