

Universidad Nacional Autónoma de México



Facultad de Ingeniería



**“Desarrollo de un sistema para la determinación de
peso vehicular en forma dinámica”**

Tesis que presenta

José Antonio Zarazúa Cueto

Para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico

Director de Tesis

Ing. Rodolfo Peters Lammel

México D.F. Abril de 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que han sido parte de mi vida, quienes siguen conmigo y quienes desafortunadamente se nos adelantaron en el camino, creo que de alguna manera han participado para alcanzar este objetivo profesional, se los agradezco de todo corazón.

A mi madre, porque sus esfuerzos, lágrimas, desvelos y trabajo se vean recompensados con este escrito, que sin su apoyo y dedicación no habría conseguido lo que soy. Gracias por enseñarme a ver el lado positivo de las personas y las cosas por más oscuro que este el panorama, ha estado siempre a mi lado respetando mis pensamientos y creencias. Quiero que lo disfrutes conmigo y lo tomes a título personal.

A mi padre, porque sus charlas enriquecedoras y sus consejos son una guía para mí, por sembrar la semilla del amor por la electrónica desde pequeño aunque yo reniegue.

A mis padrinos, Raquel Ruiz y Manuel Riego, que son un ejemplo de vida y que me han procurado toda la vida, han sido la extensión de mi casa, mi gratitud infinita.

A mis primos, que son como mis hermanos. Lina, por su apoyo y el ejemplo que es para mí, Sandra, porque siempre sabe escuchar aunque no le guste hablar, Lucía, que siempre me ha apoyado y me brinda su cariño, Sagrario, compañera de juegos y ficciones infantiles, Manuel, que con sus peleas y juegos me han fortalecido. Los primos políticos, Carlos y Fernando, que me soportaron cuando era un niño latoso y lo siguen haciendo con sus consejos y pláticas.

A mis tíos, Guillermo, que alentó la práctica del deporte e inculcó la disciplina necesaria que eso conlleva. Lupe, que siempre estuvo al pendiente de mí a través de mi madre y las muestras de cariño que me dio, tanto ella como sus hijos, gracias.

A Osvelia Ivette, una persona muy especial y parte importante en estos últimos años, ha estado a mi lado compartiendo su vida y amor, me ha ayudado a descubrir cosas, amiga y confidente, la persona adecuada con quien discutir banalidades.

A Christian, Mónica, Oscar Patricio, Rodrigo, Rubén, Stephani, Susana y Ximena, por ser mis amigos, hacer más agradables los momentos difíciles de la escuela y compartir el tiempo de esparcimiento, seguir soportándome y siendo parte de mi vida, los valoro a cada uno.

A mis profesores, por su disposición, apoyo y enseñanzas que me dejaron, primordialmente a mi director de tesis Rodolfo Peters, por su tiempo, su amistad y paciencia para terminar este proyecto.

Y a todos aquellos que se han quedado en los recintos más recónditos de mi memoria pero que han sido partícipes en mi edificación.

ÍNDICE	I
ÍNDICE DE TABLAS	III
ÍNDICE DE FIGURAS	IV
OBJETIVO	VI
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. SISTEMAS DE PESAJE	9
2.1 INDICADORES DE DEFORMACIÓN FOTOELÁSTICOS	9
2.2 SENSOR POR MICRODEFORMACIONES	11
2.3 EXTENSÓMETROS	14
2.3.1 Extensómetros mecánicos	15
2.3.2 Extensómetro óptico.....	17
2.3.3 Extensómetro neumático.....	18
2.3.4 Extensómetro acústico o de cuerda vibrante	19
2.3.5 Extensómetros electronicos.....	20
2.3.5.1 Extensómetro de Inductancia.....	20
2.3.5.2 Extensómetro de Capacitancia.....	22
2.3.5.3 Extensómetro eléctrico (galga extensométrica).....	22
2.4 SISTEMAS ESTÁTICOS	24
2.4.1 Báscula:	24
2.4.2 Balanza:	24
2.4.2.1 Balanzas y basculas mecánicas.....	25
2.4.2.1.1 Balanza analítica.	25
2.4.2.1.2 Balanza de sustitución.....	26
2.4.2.1.3. Báscula de plato superior.	27
2.4.2.1.4. Báscula de resorte.	27
2.1.2.1.5 Balanza de pesa deslizante.	28
2.1.2.1.6 Balanzas electrónicas	29
2.5 SISTEMAS DINÁMICOS	31

3. DESCRIPCIÓN DEL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CELDAS DE DEFORMACIÓN.....	34
3.1 INDICADORES DE DEFORMACIÓN SEMICONDUCTORES O PIEZORRESISTIVOS.....	35
3.4 INDICADORES ADHERIDOS PARA MEDIR LA DEFORMACIÓN POR MEDIO DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA .	36
4. CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL.....	43
4.1 CONVERTOR DE SEÑAL ANALÓGICO A DIGITAL	44
4.1.1 <i>Modo Diferencial</i>	45
4.1.2 <i>Amplificador de instrumentación</i>	46
4.2 PROTECCIÓN	48
4.3 FILTRADO	49
4.4 TRANSMISIÓN	51
4.4.1 <i>Transmisión por lazo de corriente</i>	51
5. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	57
5.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UNA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	59
5.1.1 <i>Entradas Analógicas</i>	59
5.1.2 <i>Salidas Analógicas</i>	63
5.1.3 <i>Disparadores</i>	64
5.1.4 <i>Entradas y Salidas Digitales</i>	64
5.1.5 <i>Temporizadores de entrada y salida</i>	65
5.2 SELECCIÓN DE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	65
5.3 TARJETA DE ADQUISICIÓN USB-6008	69
5.4 MUESTREO	70
5.4.1 <i>Teorema del Muestreo</i>	71
6. PROGRAMA DE CAPTURA Y EVALUACIÓN DE DATOS.....	74
6.1 CONTROLADOR DE DISPOSITIVO (DRIVER)	76
6.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA	77
6.3 INTERFASE DE USUARIO	79
6.4 CÓDIGO FUENTE.....	80
7. OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES.....	82
8. REFERENCIAS	84
9. ANEXOS	85
ANEXO A.....	85
ANEXO B.....	86
ANEXO C.....	91

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Clasificación de los transportes por configuración de ejes	5
Tabla 1.2 Peso de los transportes por configuración de ejes	6
Tabla 1.3 Configuraciones de ejes.....	7
Tabla 1.4 Carga máxima por ejes en los países del TLC	7
Tabla 3.1 Indicadores de deformación	34
Tabla 3.2 Ventajas y desventajas de los dispositivos para medir tensión	39
Tabla 3.3 Características eléctricas de la celda de deformación	42
Tabla 5.1 Casetas de cobro en la ciudad de México.....	66
Tabla 5.2 Tarjetas de Adquisición de datos de la compañía National Instruments.....	67

Índice de Figuras

Figura 2.1 Diagrama de construcción de las placas de deformación.....	11
Figura 2.2 Ampliación de las deformaciones con el cambio en la incidencia de la luz	12
Figura 2.3 Diagrama de construcción de un sensor por microdeformaciones.....	12
Figura 2.4 Diagrama del diafragma utilizado en Hidrófono construido por USA	13
Figura 2.5 Extensómetro de Berry.....	15
Figura 2.6 Extensómetro de Huggenberger.....	16
Figura 2.7 Extensómetro tipo mikroktor.....	16
Figura 2.8 Extensómetro de Tuckerman	17
Figura 2.9 Extensómetro neumático.....	18
Figura 2.10 Sistema indicador de deformación acústica	19
Figura 2.11 Extensómetro de inductancia	20
Figura 2.12 Puente de capacitancia	22
Figura 2.13 Principio de extensometría eléctrica	23
Figura 2.14 Modelos de balanzas analíticas	26
Figura 2.15 Balanza de sustitución.....	26
Figura 2.16 Balanza de plato superior.....	27
Figura 2.17 Balanza de resorte (a) Principio básico de funcionamiento (b) Modelo real....	28
Figura 2.18 Modelos de balanzas mecánicas.....	28
Figura 3.1 Celdas de deformación del tipo rejilla del tipo (a) Alambre (b) Lámina.....	37
Figura 3.2 Celda de carga de puente completo de Wheatstone.....	40
Figura 3.3 Fotografía de la celda de carga con su conexión eléctrica.....	41
Figura 4.1 Diagrama de la fuente de alimentación.....	45
Figura 4.2 Amplificador diferencial.....	45
Figura 4.3 Amplificador de Instrumentación	47
Figura 4.4 Filtro pasa bajas.....	50
Figura 4.5 Configuración básica.....	52
Figura 4.6 Configuración para conversión de voltaje a corriente.....	53
Figura 4.7 Esquema a bloques de instalación.....	55
Figura 4.8 Esquema a bloques de circuito de acondicionamiento.....	56
Figura 5.1 Elementos Básicos de la Tablilla de Adquisición de datos.....	57

Figura 5.2 Diagrama a Bloques de los Elementos Básicos de la Tablilla	58
Figura 5.3 Onda senoidal digitalizada con resolución de 3 bits	61
Figura 5.4 Autopista México-Querétaro.....	66
Figura 5.6 Autopista México-Cuernavaca.....	66
Figura 5.8 Autopista México-Pachuca	67
Figura 5.9 Esquema general de operación.....	68
Figura 5.10 Modelo gráfico para el proceso de muestreo	70
Figura 5.11 Esquema simplificado de muestro	71
Figura 5.12 Esquema de las dimensiones de la plataforma.....	72
Figura 5.13 (a) Señal ideal del evento (b) Variaciones posibles de la señal ideal.....	73
Figura 6.1 Sistema típico de adquisición de datos basado en PC.....	74
Figura 6.2 Diagrama del flujo del programa	78
Figura 6.3 Ventana principal de la aplicación	79
Figura 6.4 Aviso de sobrepeso en alguno de los ejes	80
Figura 7.1 Configuración posible de eventos con detector de interrupción (a) Dos camiones con la misma separación (b) Un camión de doble semi-remolque.....	83

Objetivo

Desarrollar un sistema que permita determinar el peso de vehículos de carga que transitan en los caminos de cuota dentro del territorio de los Estados Unidos Mexicanos.

Resumen

Se describe el desarrollo de un dispositivo prototipo para estimar el peso de vehículos desplazándose a bajas velocidades. El diseño se basa en el concepto de flexión de placas en cantilibre y en la aplicación de la técnica de extensometría. Los sensores de deformación, comúnmente conocidos como galgas extensométricas, se disponen en un arreglo denominado puente de Wheatstone. Este arreglo brinda ventajas que se traducen en un mejor manejo de la señal eléctrica producida por cambios en la longitud de las galgas.

Además, se diseñó un programa para implementarse en una unidad central en las casetas de cobro de las autopistas, que genera un aviso cuando se excede el peso permitido en la caseta por donde circula el vehículo, calcula la tarifa que habrá que aplicarse y genera un histórico de los diferentes pesos de los vehículos que han pasado por el dispositivo. La tarifa y el peso límite pueden ser modificados por el usuario en la unidad central de procesamiento, pero no así por el operador de la caseta.

Abstract

A prototype to determine weight-in-motion of vehicles at low velocities is described in this work. The design is based on the concept of flexion of cantilibre beams and the use of strain gages techniques. The strain sensors are prepared in a Wheatstone bridge arrangement taking advantage of the management of electrical signal produced by the changes on the gages.

In addition, a software is included to be implemented in a central unit in the collection sheds of the highways, a notice generates when the allowed weight is bigger than limit weight, calculates the tariff that will be to apply and generates the historical one of the different weight from vehicles that have passed for a device. The tariff and the weight limit can be modified for the user in the central unit of processing, but not this way for the operator of the shed.

1. Introducción

Desde la antigüedad los humanos se han preocupado por la construcción de caminos para transportarse, se dice que el rey egipcio Keops construyó un camino pavimentado con piedras para facilitar la construcción de la Gran Pirámide aproximadamente en 3000 a.C. Los incas construyeron carreteras finas a través de los andes y los Mayas construyeron una red extensa de caminos pavimentados en México antes del descubrimiento del Nuevo Mundo. Aproximadamente 300 A.C., los Cesares del Imperio Romano construyeron carreteras fuertes de piedra por todas partes de Europa para sus campañas militares. Muchas de las rutas romanas son todavía empleadas en la actualidad. Siempre intentaron que las carreteras lograran soportar los efectos del transporte de distintos vehículos y materiales.

En la actualidad el daño que se ocasiona sobre los caminos y carreteras está dada principalmente por el tránsito de los vehículos automotores, el medio ambiente y el material del que esté hecho el camino. En este trabajo vamos a exponer una forma de medir el peso de los vehículos de manera dinámica, por lo que vamos a asumir que los vehículos viajan en una línea directa con la velocidad constante, de modo que las fuerzas del neumático sean principalmente verticales sin componentes apreciables laterales o longitudinales. Entonces, la fuerza aplicada en el pavimento de las carreteras por cada una de las llantas de un vehículo pueden ser separadas en dos componentes: la carga estática, debida al peso, y un componente fluctuante conocido como la fuerza dinámica de la llanta o carga dinámica (eje) de la llanta. La carga estática depende de la geometría y la distribución de masas del vehículo y la carga dinámica comparte las características del sistema de suspensión.

La carga desigual que comparten puede causar innecesariamente altas fuerzas medias del neumático con la consecuencia de altos esfuerzos y tensiones en la superficie de rodamiento y por tanto un daño adicional. Las fuerzas dinámicas de la llanta son causadas por la vibración del vehículo cuando está excitado por la brusquedad de la superficie del camino. Éstos normalmente ocurren en frecuencias debajo de 20 Hz. Las fuerzas dinámicas de la llanta generan esfuerzos y tensiones de la superficie de rodamiento que, como se

piensa, aceleran el deterioramiento de la carretera, aunque los mecanismos de daño no se han entendido bien.

Las superficies modernas de rodamiento (o pavimentos) pueden ser clasificadas como flexibles, compuestas o rígidas. Un **pavimento flexible** consiste en una o varias capas de asfalto apoyado por un subgrado granular. Los **pavimentos compuestos** consisten en una capa flexible superficial apoyada por un hormigón de Portland Cement Concrete (PCC) en la base; y los **pavimentos rígidos** consisten en una capa de PCC sobre una fundación granular. Los pavimentos rígidos pueden ser clasificados según su arreglo de refuerzo de acero y uniones.

Debemos tener claro que el daño del camino se refiere a la degradación de la integridad estructural o el perfil superficial de un camino cuando éste es transitado por vehículos. Ya que los caminos son diseñados para una vida de servicio finita y se espera que se deterioren con el tiempo, o por el uso. Los tipos más importantes de daños al camino debido a vehículos pesados son el rompimiento por fatiga y la deformación permanente (la formación de surcos longitudinales).

Se han concebido proyectos de investigación con el propósito de generar información sobre la magnitud y tipo de cargas aplicadas sobre el pavimento. Por ejemplo, en la República Federal Alemana se inició un proceso sistemático de pesaje de vehículos en movimiento, desarrollado en 1973 como parte de investigaciones referentes a la construcción de carreteras.

El proyecto Long-Term Observations at Selected Road Sections, llevado a cabo por el Federal Highway Research Institute (FHRI) desde 1967 hasta 1989, intentó desarrollar un método para realizar el pesaje de los vehículos de carga. Este método se basó en resultados obtenidos en pruebas realizadas en Estados Unidos por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) con objeto de extender su aplicación a Alemania. Primeramente, se enfocó la atención en conocer todas las influencias externas sobre el pavimento, incluyendo el conocimiento exacto de la carga real debida al tránsito.

Acorde con este propósito, se pretendió que los sistemas de pesaje desarrollados por el FHRI fueran capaces de medir las cargas en los ejes de los vehículos al circular a velocidades normales en carretera; es decir, hasta 120 km/h. Después de varios años de manufactura y prueba de prototipos, se prepararon tres diferentes detectores de carga por eje que entraron en producción en los años setenta. Estos dispositivos consistieron en pesadoras hidráulicas, en pesadoras con base en una placa sujeta a flexión y en el uso de un cable coaxial piezocerámico.

Australia ha sido pionera en el uso de este tipo de sensores en sus sistemas de monitoreo. El departamento de caminos desarrolló un sistema llamado AXWAY que se utilizaría bajo la estructura de un puente, basado en el uso de extensómetros. La experiencia que tomaron con este diseño los llevó a desarrollar el sistema llamado CULWAY, en donde los extensómetros fueron colocados en el techo de una alcantarilla. De esta manera, el peso era registrado midiendo el voltaje producido al doblarse la placa de la alcantarilla, causada por la carga del eje al pasar por encima.

En 1993, el Transport Research Laboratory del Departamento de Transporte en Crowthorne, Berkshire, Inglaterra, probó un sistema de pesaje en movimiento con múltiples sensores. Estas pesadoras dinámicas medían instantáneamente el peso del eje de un vehículo viajando a velocidad normal en una carretera. El peso bruto o peso por eje se estimó promediando el valor suministrado por los sensores. El uso de sólo dos sensores mostró una exactitud y una confiabilidad no satisfactorias, por lo que posteriormente se aplicaron sensores múltiples de pesaje en movimiento y, de este modo, promediar más pesos instantáneos de ejes, tendiendo así a mejorar la exactitud de los sistemas. Por un periodo de siete meses, en la autopista A34 de Abingdon se instaló un arreglo de ocho sensores con acceso a este sistema. El sistema probó que un 93 % de los vehículos fueron pesados dentro del 10% de su verdadero peso bruto estático

Aun cuando en otros países se han desarrollado diversos sistemas de pesaje para evaluar las cargas dinámicas, en México no se cuenta con una tecnología propia, aplicada a resolver los

problemas relacionados con la evaluación de las cargas transmitidas por los vehículos a los pavimentos. Desde hace más de 50 años se ha tenido la necesidad de evaluar el peso de los vehículos pesados por razones de diseño, mantenimiento y conservación de puentes y carreteras.

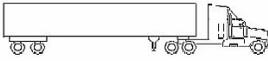
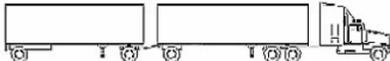
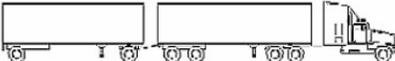
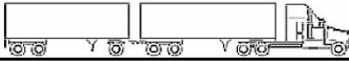
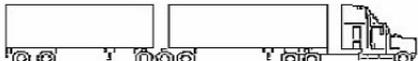
En la actualidad por razones de El Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) que entró en vigor el 1 enero de 1994, éste es el documento básico que gobierna el comercio entre Estados Unidos de América (EUA), Canadá y México. De acuerdo con las disposiciones del TLCAN, el autotransporte transfronterizo se abriría entre los 4 Estados fronterizos de EUA y los 5 Estados fronterizos de México, el 18 de diciembre de 1995. Sin embargo, el Gobierno de EUA retrasó la apertura de la frontera al autotransporte mexicano hasta que se atendieran aspectos adicionales sobre seguridad vehicular.

Algunos de los requerimientos clave para la operación de vehículos de carga, pueden ser categorizados de la manera siguiente:

- Permisos y licencias
- Impuestos sobre el combustible
- Dimensiones vehiculares
- Límites de peso bruto vehicular y por eje
- Obtención de permisos para cargas pesadas o voluminosas
- Inspección vehicular
- Obtención y conservación de la autorización
- Licencia de conductor de vehículos comerciales

Para cumplir con la normativa es importante conocer los límites de Peso Vehicular que aplican en los tres países, los tipos de vehículos y sus clasificaciones. En la tabla 1.1 se muestra la clasificación y nomenclatura de los transportes que son comunes en los tres países:

Tabla 1.1. Clasificación de los transportes por configuración de ejes

Clase	Nomenclatura		No. de llantas
Camión unitario	C3		8
	C3		10
Tractocamión Semirremolque	T3 – S2		18
	T3 – S3		22
Tractocamión Semirremolque Remolque	T3 – S1 – R2		22
	T3 – S2 – R2		26
	T3 – S2 – R3		30
Tractocamión Semirremolque Semirremolque	T3 – S3 – S2		30

Ahora bien, con base en la clasificación anterior podemos destacar el Peso Bruto Vehicular Máximo Autorizado en los tres países que se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Peso de los transportes por configuración de ejes

Clase	Nomenclatura	PBV ton. métrica (lb)		
		Canada	EUA	México
Camión unitario	C3	24.80 (54,625.38)	36.320 (80,000)	22.00 (48,458)
	C3		36.320 (80,000)	26.00 (57,268)
Tractocamión Semirremolque	T3 – S2	40.43 (89,049.44)	36.320 (80,000)	44.00 (96,916)
	T3 – S3	48.00 (105,726.55)	36.320 (80,000)	48.50 (106,827)
Tractocamión Semirremolque Remolque	T3 – S1 – R2	50.86 (112,019.79)	36.320 (80,000)	56.00 (123,348)
	T3 – S2 – R2	56.19 (123,756.70)	36.320 (80,000)	60.50 (133,260)
	T3 – S2 – R3	60.07 (132,315.51)	36.320 (80,000)	63.00 (138,766)
Tractocamión Semirremolque Semirremolque	T3 – S3 – S2	62.79 (138,294.10)	36.320 (80,000)	60.00 (132,158)

Existe otro criterio que también es aplicable para la determinación del peso. En algunos estados y caminos de los tres países es importante que se cumpla con el criterio del peso vehicular total pero también debe cumplirse con el peso permitido por eje, de tal manera que la carga total no sólo debe de ser menor a un límite sino que debe estar perfectamente distribuida para no sobrepasarse en cuanto al peso por eje.

Podemos definir cinco tipos de ejes que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1.3 Configuraciones de ejes

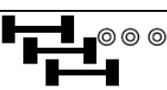
Nombre		Configuración esquemática	Nomenclatura
Direccional			Direccional
Sencillo			Sencillo
Tandem	6 llantas		Tandem-6
	8 llantas		Tandem-8
Tridem			Tridem

Tabla 1.4 Carga máxima por ejes en los países del TLC

Nomenclatura	Carga por ejes		
	kg. (lb)		
	CANADA	USA	MÉXICO
Direccional	7,132 (15,709)	5,448 (12,000)	6,500 (14,330)
Sencillo	9,357 (20,610)	9,080 (20,000)	10,000 (22,050)
Tandem-6	17,142 (37,759)	15,436 (34,000)	15,500 (34,180)
Tandem-8	17,442 (38,420)	15,436 (34,000)	18,000 (39,690)
Tridem	21,471 (47,293)	BFB	22,500 (49,100)

El valor para el eje Tridem de Estados Unidos de América esta determinado por la Fórmula Puente B “Bridge Formula B (BFB)” que se expresa de la siguiente manera:

Es una función del número de ejes y el espacio que existe entre ellos:

$$(1)W = [LN/N-1 + 12N + 36]$$

donde:

W = Es el peso máximo en libras que puede tener un Tandem

L = La distancia entre los ejes externos del grupo

N = el número de ejes considerados en el grupo

Si tomamos en cuenta las siguientes equivalencias:

1 ton = 1016.064 kg. = 2240 lb.

1 ton métrica = 1000 kg. = 2204 lb.

2. Sistemas de Pesaje

En los diversos campos de la ingeniería se hace uso de las propiedades de los materiales que pueden ser mecánicas, eléctricas, térmicas, químicas u ópticas, para la medición de variables físicas. En el caso de la determinación del peso de los vehículos, se han utilizado básicamente propiedades de los dos primeros grupos que, sin un mayor grado de complejidad para su instrumentación, son aplicables prácticamente de manera directa. Tal es el caso de la deformación que experimenta un cuerpo sometido a una fuerza o la variación de la presión hidráulica en un recipiente y el cambio de la resistencia o el voltaje en un componente eléctrico. A continuación se enumeran algunos transductores que son utilizados para medir la deformación, y por lo tanto el peso.

2.1 Indicadores de deformación fotoelásticos

Los materiales transparentes, como cristal y el plástico, cuando están deformados tienen doble poder de refracción; es decir, son birrefringentes¹. Este efecto, al ser observado con luz polarizada, revela franjas de interferencia en el material que son análogas a la deformación inducida. El aligeramiento de la deformación elimina las franjas. Pueden inducirse franjas permanentes calentando el material mientras se encuentra en tensión y manteniendo esta tensión hasta que se haya enfriado. El modelo o diseño de franja “congelada” así formado es permanente, de modo que la variación de tensión únicamente provoca el desplazamiento de la franja. Comercialmente, es posible disponer de indicadores circulares y rectangulares basados en este principio. Los indicadores son de construcción intercalada y constan de una pieza de plástico birrefringente, de aproximadamente 2.5 mm. de espesor, en un lado de la cual hay un recubrimiento reflector, y en el otro, un material que posee las características de un polariscopio. Montada encima va una escala de deformación calibrada y numerada.

¹ Este tipo de materiales cuando están sometidos a tensión, tienen la propiedad de dividir un rayo de luz polarizada plana (luz que vibra en un sólo plano), en cualquier punto, en dos componentes polarizados ortogonalmente, cada uno paralelo a una dirección de la tensión principal en dicho punto.

Los indicadores van unidos a las superficies mediante cementantes similares a los usados para los indicadores de alambre, aunque, debido a que son mucho menos flexibles, las superficies a las que pueden unirse deben ser una forma plana muy precisa. Para eliminar el efecto de Poisson y así asegurar que la deformación a lo largo del eje del indicador queda registrada, los indicadores van pegados con cemento por sus extremos y no por toda su longitud. Para determinar las tensiones principales en un campo de tensión biaxial, pueden usarse dos indicadores. Una tensión reducida de deformación transmitida al indicador desplaza ambas franjas hacia la derecha y la deformación de compresión motiva un desplazamiento de una franja particular en la escala, puede determinarse la magnitud de la deformación. Las deformaciones grandes ocasionan que las franjas rebasen la escala, pero, cada vez que desaparece una franja, es reemplazada por otra nueva que parece en el lado opuesto del indicador, por lo que debe tenerse gran cuidado en observar el orden de la serie de franjas. La flexión o torsión de una superficie hace girar las franja poniéndolas de través, lo cual invalida la medición de la deformación.

Los indicadores para la medición del cizallamiento puro disponen de franjas que se hacen girar un ángulo de 45° respecto al eje del indicador. Se utilizan de la misma manera que los indicadores normales, excepto que van pegados con cementos en toda su longitud.

Los indicadores circulares usados para la medición de la deformación principal disponen de franjas circulares que se tuercen por efecto de la deformación; también se desplazan a través de la cara del indicador, desapareciendo y siendo sustituidas por otras con un incremento de la deformación, aunque el modelo de franja visible en cualquier fase puede aparecer con forma muy compleja. Es esencial observar la serie de la franja como en el caso de los indicadores rectangulares, efectuándose esto cada vez que una nueva franja empieza a aparecer en el borde exterior del indicador. Este método se sigue en ambos ejes de las deformaciones principales y, por tanto, las tensiones principales.

Los indicadores de deformación fotoelásticos son aparatos de lectura directa, por lo que no requieren instrumentación. Son grandes, pues la longitud mínima de indicador que puede obtenerse es de unos 20 mm, limitando su estrechez las exigencias de la escala. Son

inflexibles, por lo que resultan sólo adecuados para superficies planas o casi planas. Su sensibilidad es del orden de 40 a 75 $\mu\text{m}/\text{m}$, y admiten una temperatura máxima de funcionamiento de 50°C. Pueden deducirse que sus principales aplicaciones se encuentran en el campo de los elementos transductores sensibles.

2.2 Sensor por microdeformaciones

Este tipo de sensores se basa en la eyección de la luz que viaja por el núcleo hacia la vaina, a través de deformaciones introducidas en la geometría del mismo. Para esto se hace pasar la fibra a través de un deformador.

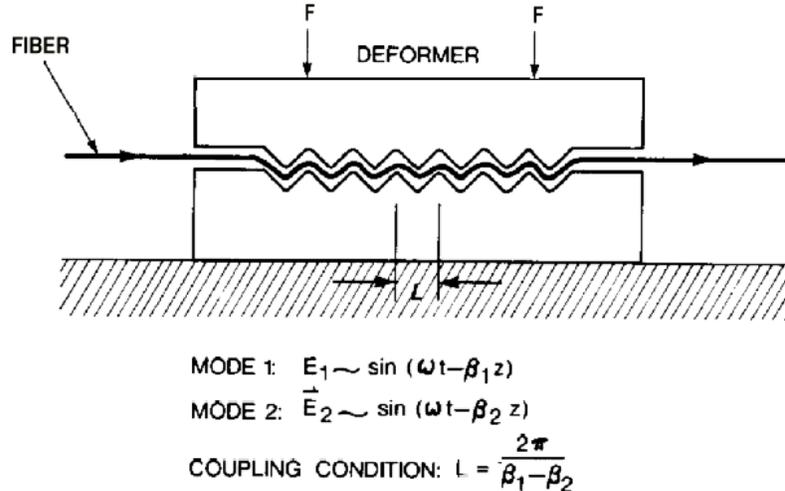


Figura 2.1 Diagrama de construcción de las placas de deformación

Al incrementar la fuerza (F) aplicada a las placas, la amplitud de la deformación puede ser incrementada. Al realizar estas deformaciones, causa que el ángulo de incidencia de la luz en el núcleo varía, provocando que la misma sea refractada hacia la vaina. Este proceso se muestra en la figura siguiente:

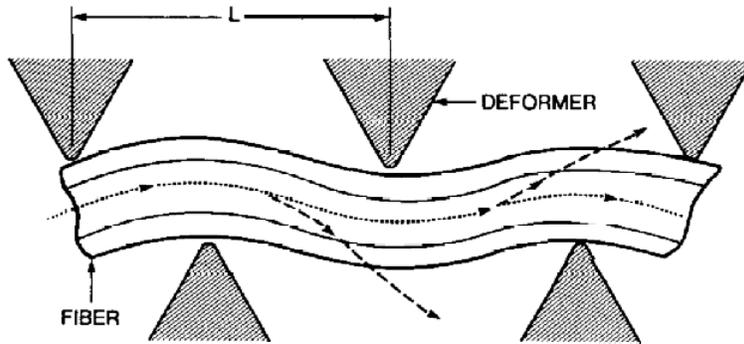


Figura 2.2 Ampliación de las deformaciones con el cambio en la incidencia de la luz

Los rayos que se propagan sobre el núcleo a un ángulo menor que el crítico, se mantienen atrapados en el núcleo, pero al aumentar la presión hace que éstos lo sobrepasen y sea parcialmente transmitida a la vaina.

Se han hecho una gran cantidad de estudios de este fenómeno. Por ejemplo, el sistema mostrado en la figura de abajo fue usado en los laboratorios de investigación Hughes.

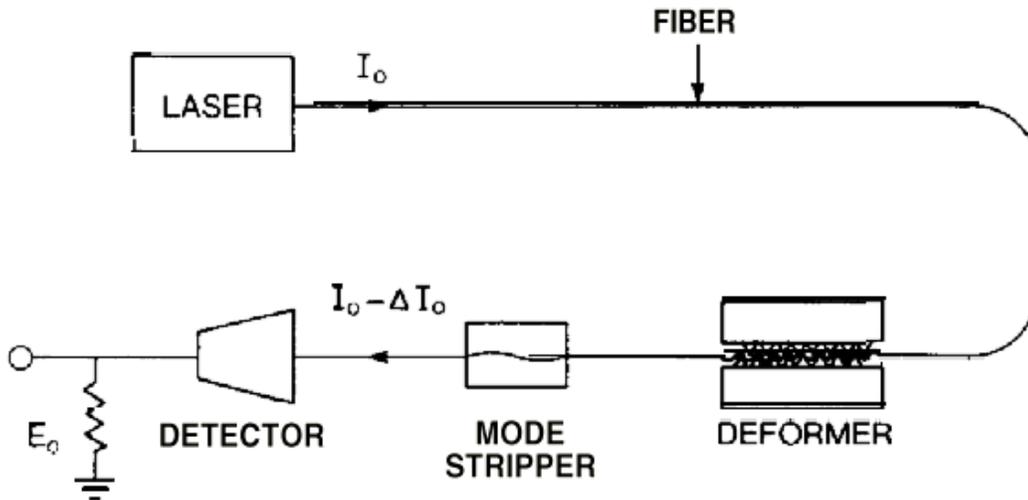
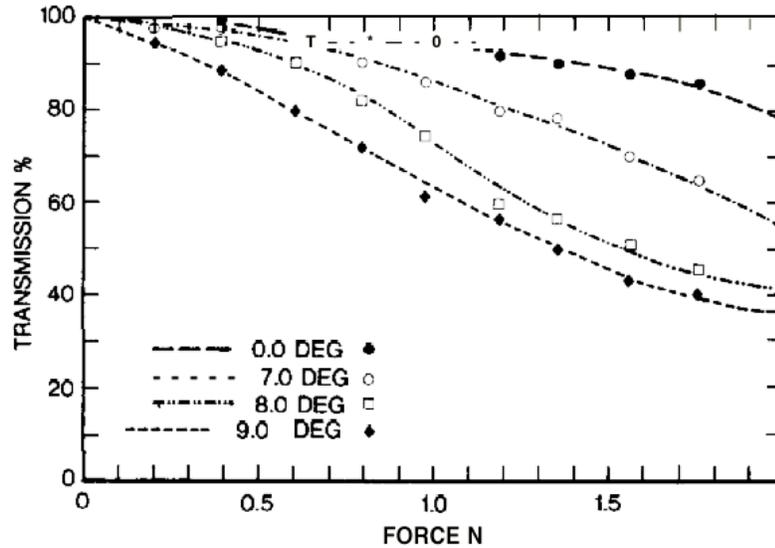


Figura 2.3 Diagrama de construcción de un sensor por microdeformaciones

Como se indica, la luz es inyectada en una fibra, la cual es pasada a través de un deformador. En este caso la intensidad de la luz es monitoreada por el otro extremo. Usando un láser de helio-neón con un haz muy contaminado, es posible variar el ángulo de incidencia de la luz en la fibra, y así utilizar los varios modos de propagación de la misma.

Usando este sistema, los laboratorios Hughes midieron la intensidad de luz transmitida como una función de la fuerza aplicada al transductor. Esto se hizo para diferentes ángulos de incidencia de la luz, y los resultados se muestran a continuación en la gráfica 1



Gráfica 1 Caracterización de la Fuerza (N) contra Porcentaje de transmisión

Como se desprende del gráfico, cuando el ángulo de incidencia es cero (viaja por el núcleo sin rebotes) una variación del 20% en la transmisión de luz, muestra una fuerza de 2 newton aplicada. Por el contrario, a medida que se va incrementando el ángulo es más propenso a pasar el ángulo crítico, con lo cual el sensor aumenta su sensibilidad. Usando los resultados de estas experiencias y otras similares, los laboratorios Hughes en colaboración con la rama para investigación Físico-Acústico de los laboratorios navales de USA, diseñaron y probaron un hidrófono con este principio.

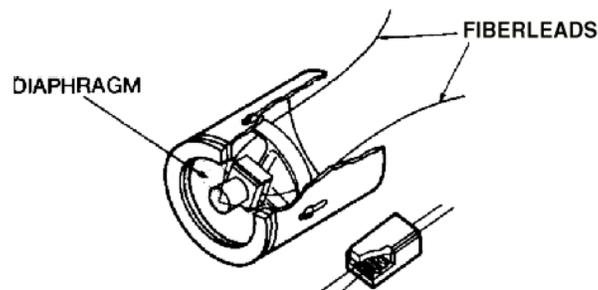


Figura 2.4 Diagrama del diafragma utilizado en Hidrófono construido por USA

La placa deformante fue rígidamente montada sobre una cubierta cilíndrica, mientras que el otro extremo fue ajustado a un pequeño diafragma.

Para conocer el peso de los vehículos tenemos dos tipos de sistemas: sistemas estáticos y sistemas dinámicos.

Los dispositivos usados para determinar el peso han sido principalmente pesadores estáticos, que requieren que los camiones sometidos a pesaje permanezcan inmóviles durante la operación. Los pesajes estáticos pueden hacerse de varias formas: pesando el camión entero en una sola maniobra, o por eje, grupos de ejes o por lados de eje, lo que requiere de maniobras adicionales.

Por esa razón, el pesaje estático se ha reconocido como un método poco eficaz para aplicarse a grandes volúmenes de vehículos. Razones como ésta sustentan la búsqueda de otras alternativas para conocer su peso, lo que permite explorar con técnicas aplicadas a vehículos en movimiento. En esta área se han realizado avances significativos que han llevado a la disponibilidad comercial de algunos dispositivos, los cuales han probado ser efectivos en la medición de cargas de la llanta en movimiento.

2.3 Extensómetros

Antes de inventar y desarrollar los indicadores de deformación por resistencia, el dispositivo más usado para determinar la deformación era el extensómetro. Los extensómetros se usan aún para ciertas finalidades, por ejemplo, en las piezas de ensayo a tracción y para aplicaciones estructurales en obras públicas donde se requieren indicadores de gran longitud y robustez. La principal limitación de los Extensómetros es su tamaño, que dificulta su aplicación, excepto en los caso de buena accesibilidad; además, los elementos a los cuales se unen deben ser geoméricamente sencillos, como varillas de longitud suficiente y de sección transversal uniforme para acomodar el instrumento. Su utilización está sobre todo limitada a la medición de la deformación estática, aunque, con algunos tipos, también es posible la medición dinámica. Los extensómetros se consideran a veces como si se tratara de indicadores de deformación, pero, en realidad, de acuerdo con su

denominación, son dispositivos de medición del alargamiento porque la longitud de calibrado del instrumento debe conocerse antes de que pueda calcularse su deformación.

Se aplican dos métodos similares para cerciorarse de que el aparato responde al unísono con el aumento o disminución de longitud de la pieza a la cual va asido: el de arista de cuchillo y el de penetrador cónico. Estos elementos se encastran en la superficie de la pieza, la cual, por consiguiente, sufre menos daño al introducir una concentración de esfuerzos, por lo que la fuente de error es menor. Existen tres tipos de extensómetro:

2.3.1 Extensómetros mecánicos

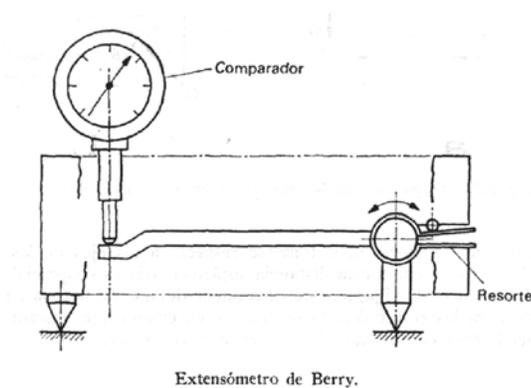


Figura 2.5 Extensómetro de Berry

El extensómetro de Berry representado en la figura 2.6 se usa para aplicaciones estructurales en obras públicas bajo condiciones de deformación aproximadamente lineal, con longitudes de calibrado de hasta 200 mm. Una característica interesante de este instrumento se refiere al husillo del pivote, el cual está cinemáticamente situado y cargado mediante el resorte, lo que elimina la holgura en el cojinete.

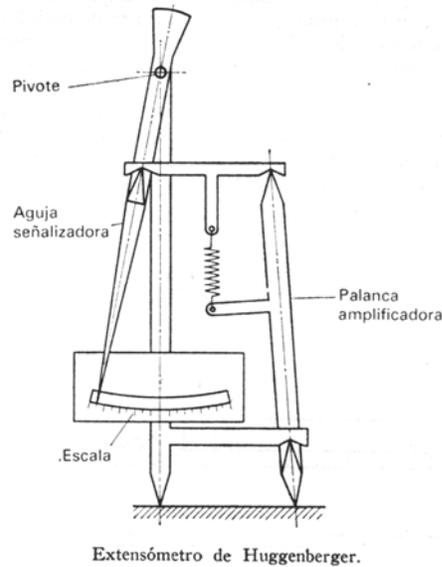


Figura 2.6 Extensómetro de Huggenberger

El aparato de Huggenberger es un instrumento de que existen diferentes modelos, siendo el de mayor aplicación capaz de trabajar con longitudes de calibrado entre 12 y 25 mm., aproximadamente. Este aparato se apoya totalmente sobre pivotes de arista de cuchillo, con rozamiento muy reducido, y, si se desea, puede reajustarse a cero después de cada lectura de alargamiento. Es posible obtener ampliificaciones de hasta 2000, lo cual depende del tipo utilizado.

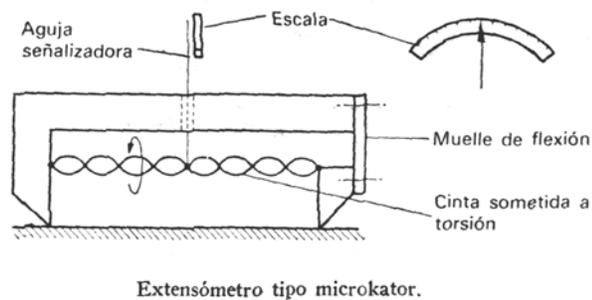


Figura 2.7 Extensómetro tipo microkator

En la figura 2.8 se muestra el extensómetro basado en el principio de Johanson; en este caso se usa una cinta de metal enroscada, sometida a torsión, a la que se une en el centro una ligera aguja indicadora. Un extremo de la cinta va unido al brazo fijo con arista de cuchillo, que, a su vez, está unido al cuerpo del aparato por un resorte

de lámina o muelle de flexión. El alargamiento hace que la cinta se desenrosque y, por lo tanto, motiva que la aguja indicadora gire frente a la escala. El rozamiento del instrumento se reduce prácticamente a cero y, según el modelo, pueden obtenerse amplificaciones de hasta 5000 con longitudes de calibrado entre 1 y 50 mm. Con el dispositivo de torsión se hace referencia a veces al principio del Microkator de Johansson. Una ventaja de este instrumento es su perfil poco elevado.

2.3.2 Extensómetro óptico

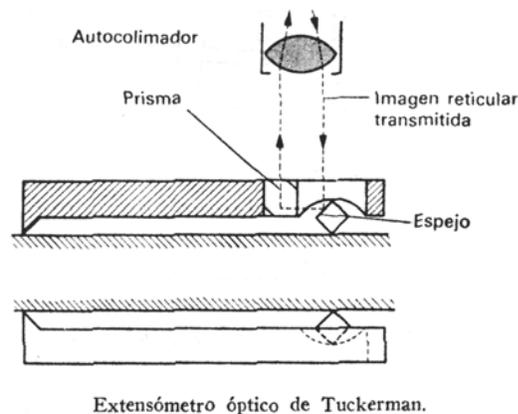


Figura 2.8 Extensómetro de Tuckerman

Otro instrumento de perfil bajo es el extensómetro óptico de Tuckerman, el cual requiere un autocolimador para tomar las lecturas de los alargamientos. Comporta un apoyo fijo con un arista de cuchillo y otro móvil de la misma forma, al cual va unido un espejo. Mediante el autocolimador se transmite una imagen reticular al espejo, el cual, a su vez, la refleja al prisma que va alejado en el aparato, y de aquí vuelve al autocolimador. Habiendo establecido inicialmente la posición de la imagen reflejada para un alargamiento cero, cualquier deformación hará girar el apoyo con arista de cuchillo y, por tanto, el espejo; el desplazamiento de la imagen reflejada sobre el autocolimador indica el alargamiento. El autocolimador posee la ventaja de que no es necesario ajustarlo a una distancia fija del espejo reflector y del prisma; así, si hace falta, las lecturas del instrumento pueden tomarse fácilmente a una distancia considerable (metros) de la pieza deformada. Este extensómetro puede usarse para la medición dinámica hasta 40 Hz utilizando un registrador fotográfico,

y pueden determinarse deformaciones de hasta $2 \mu\text{m/m}$. Según el modelo, las longitudes de calibrado varían entre unos 6 y 250 mm.

2.3.3 Extensómetro neumático

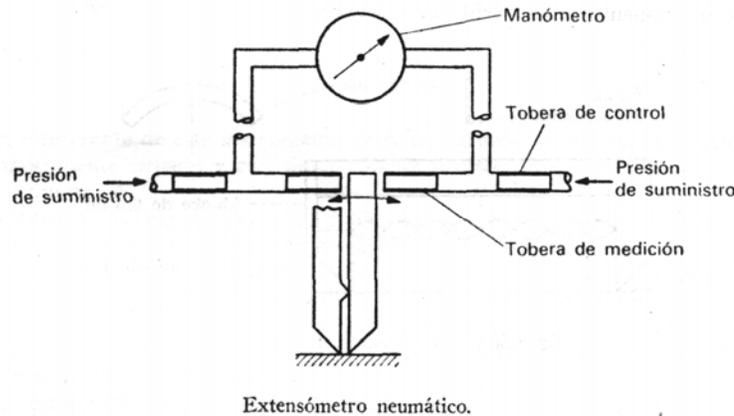


Figura 2.91 Extensómetro neumático

En la figura 2.10 se muestra un extensómetro de presión diferencial. En éste, el apoyo móvil con arista de cuchillo funciona como un batidor entre dos toberas de salida, siendo el área efectiva de cada una de ellas igual al área del cilindro comprendido entre la tobera y la cara del batido correspondiente. Ambas toberas reciben un caudal de aire igual, a presión constante y sin fluctuaciones. El efecto de la deformación es hacer girar el batidor y, así, reducir el área de una tobera mientras incrementa la de la otra. La presión en el lado estrangulado sube con dirección a la de suministro, y en el otro lado, baja hacia el valor de la presión atmosférica, registrándose la presión diferencial en el manómetro. Siempre que los espacios entre las toberas y el batidor sean pequeños, se obtienen valores prácticamente lineales. Son posibles amplificaciones de hasta 100 000 y longitudes de calibrado muy cortas, hasta de 1 mm. El manómetro puede situarse a cierta distancia del elemento sensor.

2.3.4 Extensómetro acústico o de cuerda vibrante

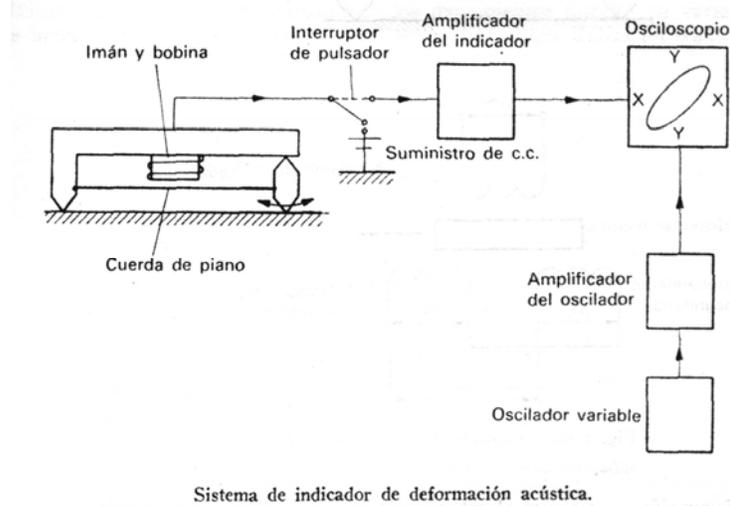


Figura 2.10 Sistema indicador de deformación acústica

Un alambre tensado vibra a su frecuencia natural. La frecuencia natural varía si, por ejemplo, aumenta o decrece la temperatura o la tensión. Cuando todas las condiciones que puedan afectar al alambre deformado permanecen estables, el único factor que variará la frecuencia de vibración es un aumento o una disminución de la tensión; tales variaciones de frecuencia son proporcionales a las variaciones de tensión y, por lo tanto, al alargamiento o deformación del alambre. Al objeto de usar la frecuencia de vibración del alambre del extensómetro como una fuente de información de deformación, es preciso disponer de un sistema vibracional previamente calibrado, tal como un oscilador variable, con el que pueda compararse. En la figura se muestra un sistema acústico de medición de la deformación.

Se monta una cuerda de piano de aproximadamente 0,3 mm de diámetro entre los apoyos fijo y móvil, con arista de cuchillo, del instrumento, y, encima de dicha cuerda de piano se sitúa un imán permanente cilíndrico sobre el que se enrolla una bobina. La disposición del interruptor de pulsador permite hacer llegar un impulso de corriente continua a la bobina, que hace vibrar el alambre a su frecuencia natural durante un periodo de tiempo, transmitiendo una débil corriente alterna al amplificador de señal del extensómetro y, de aquí, a las placas X de un osciloscopio. Las placas Y del osciloscopio reciben una señal de referencia desde el oscilador

variable (entre 200 y 2000 Hz), la cual se ajusta luego hasta que aparece en la pantalla una figura Lissajous circular o elíptica, que es cuando se igualan las frecuencias del instrumento y del oscilador, y cuando se conoce la frecuencia de vibración de la cuerda de piano. El oscilador variable puede comprobarse sustituyendo la señal del extensómetro por la señal de un diapasón normal.

Los extensómetros acústicos se usan principalmente en obras públicas y tienen las ventajas de robustez y seguridad de funcionamiento a largo plazo. Su sensibilidad llega a ser del orden de $0.5 \mu\text{m}/\text{m}$, habiéndose empleado longitudes de calibrado de 20 a 340 mm. Debido a que el sistema mide la frecuencia, las resistencias del interruptor y de los conductores no afectan a la señal de salida. Estos extensómetros se protegen fácilmente para usarlos en el exterior, en cualquier tipo de estructuras, y, en lugar de fijarlos sobre apoyos con arista de cuchillo, pueden sujetarse a la propia estructura, la cual sirve entonces de soporte del alambre.

2.3.5 Extensómetros electronicos

2.3.5.1 Extensómetro de Inductancia

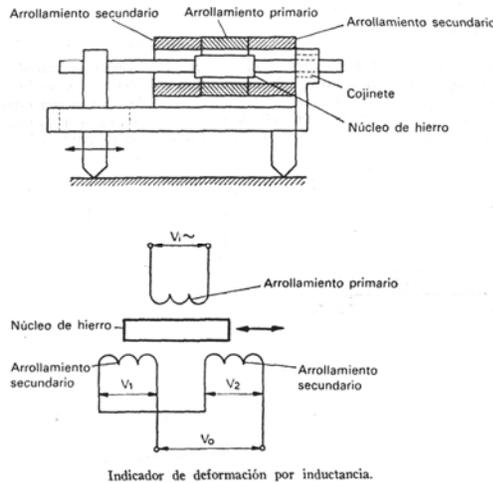


Figura 2.2 Extensómetro de inductancia

Existen varios medios de transformar los movimientos lineales en variaciones de inductancia. Un método bien experimentado es el que utiliza un transformador

diferencial de variación lineal. Comprende un arrollamiento primario de corriente alterna, en cada lado del cual se montan dos arrollamientos secundarios dispuestos en serie y en oposición. Sobre el eje de los tres arrollamientos va montado un núcleo de hierro unido a una varilla no magnética. Únicamente cuando la f.e.m. inducida en las dos bobinas secundarias es de diferente magnitud, se obtiene una señal de salida. El movimiento del núcleo de hierro debido al alargamiento del cuerpo que se ensaya provoca una variación de la f.e.m. en las bobinas secundarias y, debido a que están conectadas en serie y en oposición, su señal de salida combinada será la diferencia, si la hay, de la f.e.m. inducida. En el transformador diferencial práctico existe siempre un efecto capacitivo entre los arrollamientos primario y secundario, que da por resultado un pequeño voltaje de salida, incluso cuando la f.e.m. inducidas en las bobinas secundarias son iguales y en oposición, pero este suele representar menos del 1% del voltaje máximo.

Los transformadores de inductancia comerciales empleados para la medición de la deformación poseen longitudes de base entre 10 y 50 mm, aunque, para aplicaciones especiales, también pueden encontrarse transformadores de longitudes muy pequeñas, de hasta 0.5 mm. La fuerza de accionamiento requerida es inferior a 0.01 N, con lo que puede medirse la deformación dinámica siempre que la frecuencia del voltaje de la bobina primaria sea al menos diez veces la frecuencia medida.

En la figura 2.12 se muestra una disposición de un puente de inductancia que emplea un solo arrollamiento; que puede usarse con desplazamiento de un núcleo de hierro, actuando de forma similar al puente de resistencia. Cada brazo del puente puede ser activo, y es posible proveer la compensación de temperatura.

2.3.5.2 Extensómetro de Capacitancia

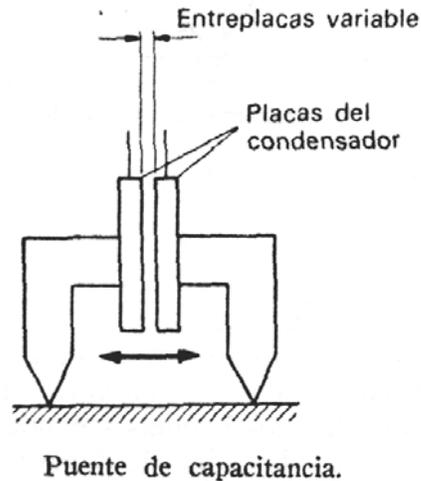


Figura 2.3 Puente de capacitancia

La capacitancia variable puede conseguirse mediante varios sistemas diferentes, pero el método más usual es hacer variar el resquicio de aire entre dos placas. Esta variación puede alcanzarse uniendo las placas a dos apoyos acodados con aristas de cuchillo, según se muestra en la figura.

En la práctica, este tipo de extensómetro no es muy usado para la medición de la deformación, ya que se presentan problemas de circuito y térmicos que contrarrestan las ventajas del método.

2.3.5.3 Extensómetro eléctrico (galga extensométrica)

Un extensómetro, también conocido como galga extensométrica o *strain gage*, es un elemento que actúa como transductor, transformando la variación de una magnitud mecánica como la fuerza o la deformación, en la variación de una magnitud eléctrica o el voltaje.

La técnica de la extensometría consiste básicamente en adherir una resistencia eléctrica deformable, llamada galga extensométrica, a un elemento estructural de

interés (Figura 3.1), que permita determinar las fuerzas actuantes en función de los esfuerzos presentes, de manera que la galga esté sujeta a la misma deformación que experimente el elemento estructural. Esta deformación producirá que el valor de la resistencia cambie debido a los cambios en su geometría. De esta forma, el cambio en la resistencia eléctrica indicará un cambio en la deformación, que a su vez se relaciona con las fuerzas que actúan sobre el elemento instrumentado.

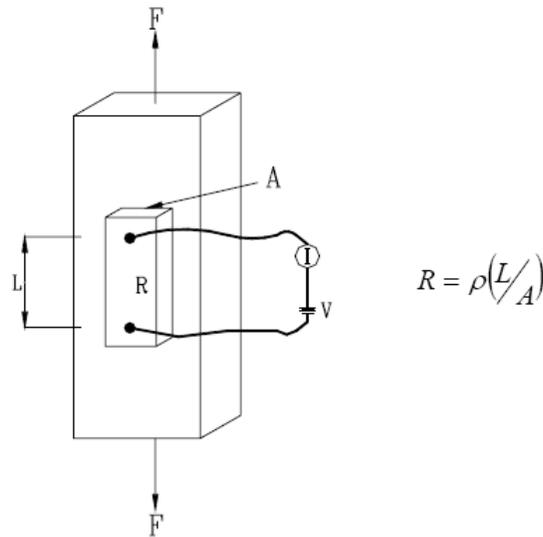


Figura 2.13 Principio de extensometría eléctrica

El extensómetro es un dispositivo físico simple, usado para medir la deformación unitaria (cambio en longitud referida a una longitud original), con base en la elasticidad mecánica y en la resistividad eléctrica de los materiales y su sensibilidad a la deformación. Este dispositivo es aplicado de una manera tal, que se deforma conjuntamente con el material objeto del estudio, modificando la resistencia eléctrica del extensómetro.

Existen dos métodos principales para determinar el peso, que bien pueden utilizar cualquier transductor de los mencionados anteriormente o cualquier otros, los sistemas se clasifican en: sistemas estáticos y sistemas dinámicos.

2.4 Sistemas Estáticos

Para conocer un poco la definición de báscula en el diccionario obtenemos:

2.4.1 Báscula: (del fran. *bascule*; del ant. *bacule*, deriv. de *baculer*, balancearse.) f. Balanza para medir pesos grandes. Aparato con plataforma para medir pesos grandes que, por medio de una combinación de palancas, se equilibran con el pilón de un brazo de romana en el punto correspondiente al peso.

En base a la definición anterior tenemos que definir lo que es una balanza.

2.4.2 Balanza: (del lat. *bilanx*, *-ancis*; de *bis*, dos y *lanx*, plato) f. Aparato destinado a la medición de masas. Consta, esencialmente, de dos brazos solidarios (cruz) apoyados sobre un soporte vertical mediante una cuchilla de material duro (acero o ágata), a modo de palanca de primer género. El punto de apoyo está situado en el centro de los brazos. Del centro de la cruz parte una aguja vertical (fiel) que se extiende hasta la parte inferior de soporte, situándose su extremo frente a una escala graduado. El soporte está sujeto a una plataforma horizontal provista de unos tornillos de ajuste con el fin de asegurar la horizontalidad. De los extremos de los brazos penden sendos platillos en los que se sitúan las masas a comparar. En las balanzas de precisión, en cada brazo existe una regla con diez divisiones en la que se sitúa un hilillo metálico denominado reiter, cuya masa es de un centigramo, y que permite apreciar masas del orden del miligramo. Instrumento para pesar, formado de una barra suspendida horizontalmente en su punto medio, y de cuyos extremos penden dos platillos.

Debemos de recordar que el principio básico es medir la masa de un cuerpo o sustancia, utilizando como medio de comparación la fuerza de la gravedad que actúa sobre el cuerpo. Se debe tener en cuenta que el peso es la fuerza que el campo gravitacional ejerce sobre la masa de un cuerpo, siendo tal fuerza el producto de la masa por la aceleración local de la gravedad. $[F = m \times g]$.

Las balanzas se diferencian entre sí por el diseño, los principios utilizados y los criterios de metrología que utilizan. En la actualidad podría considerarse que existen dos grandes grupos: las balanzas mecánicas y las balanzas electrónicas.

2.4.2.1 Balanzas y basculas mecánicas

Algunas de las más comunes son las siguientes:

2.4.2.1.1 Balanza analítica. Funciona mediante la comparación de masas de peso conocido con la masa de una sustancia de peso desconocido. Está construida con base en una barra o palanca simétrica que se apoya mediante un soporte tipo cuchilla en un punto central denominado *fulcro*. En sus extremos existen unos estribos o casquillos que también están soportados mediante unas cuchillas que les permiten oscilar suavemente. De allí se encuentran suspendidos dos platillos. En uno se colocan las masas o pesas certificadas y en el otro aquellas que es necesario analizar. Todo el conjunto dispone de un sistema de aseguramiento o bloqueo que permite a la palanca principal reposar de forma estable cuando no es utilizada o cuando se requieren modificar los contrapesos. Dispone de una caja externa que protege la balanza de las interferencias, como corrientes de aire, que pudieran presentarse en el lugar donde se encuentra instalada. En la actualidad, se considera que una balanza analítica es aquella que puede pesar cien microgramos (100 μg) o diez microgramos (10 μg); tienen una capacidad que alcanza generalmente hasta los 200 gramos.

Para utilizarlas se requiere disponer de un juego de masas certificadas, el cual dispone de piezas con masa de diversa magnitud.

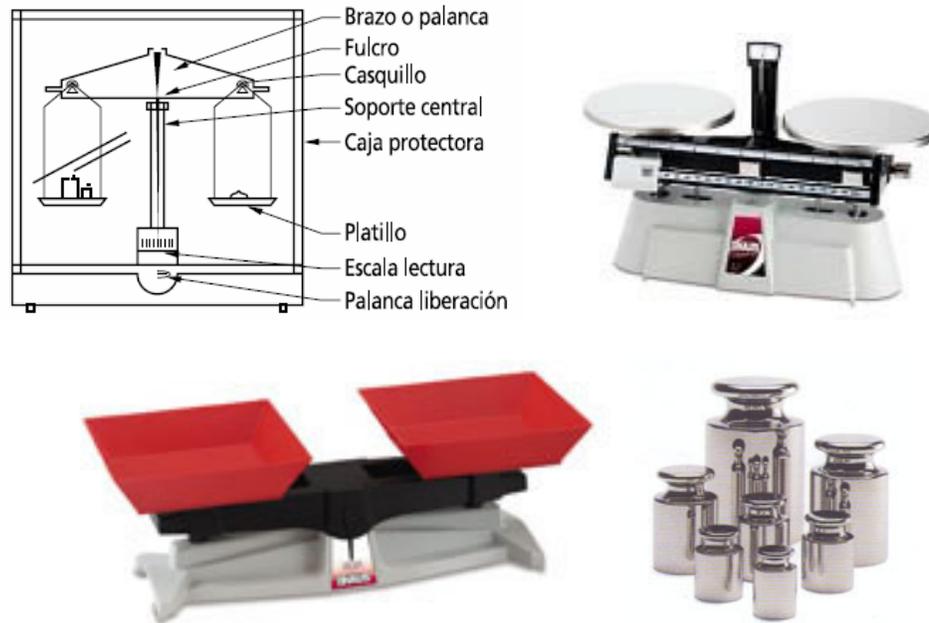


Figura 2.14 Modelos de balanzas analíticas

2.4.2.1.2 Balanza de sustitución. Es una balanza de platillo único. Se coloca sobre el platillo de pesaje una masa desconocida que se equilibra al retirar, del lado del contrapeso, masas de magnitud conocida, utilizando un sistema mecánico de levas hasta que se alcance una posición de equilibrio. El fulcro generalmente está descentrado con relación a la longitud de la viga de carga y colocado cerca del frente de la balanza. Cuando se coloca una masa sobre el platillo de pesaje y se libera la balanza del mecanismo de bloqueo, el movimiento de la viga de carga se proyecta mediante un sistema óptico a una pantalla localizada en la parte frontal del instrumento.

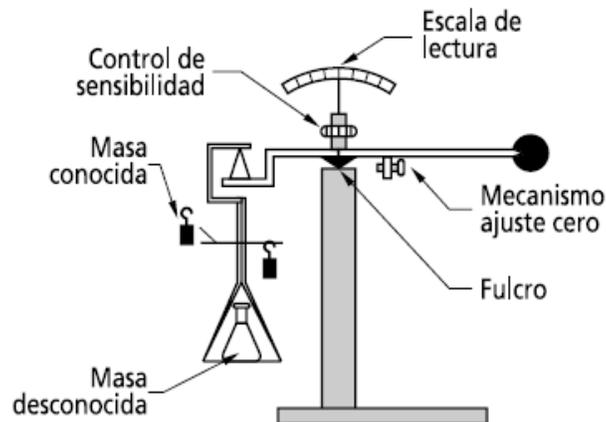


Figura 2.4 Balanza de sustitución

2.4.2.1.3. Báscula de plato superior. Este tipo de balanza dispone de un platillo de carga colocado en la parte superior, el cual es soportado por una columna que se mantiene en posición vertical por dos pares de guías que tienen acoples flexibles. El efecto de la fuerza, producido por la masa, es transmitido desde algún punto de la columna vertical o bien directamente o mediante algún mecanismo a la celda de carga. La exigencia de este tipo de mecanismo consiste en mantener el paralelismo de las guías con una exactitud de hasta $\pm 1 \mu m$. Las desviaciones de paralelismo causan un error conocido como de carga lateral que se presenta cuando la masa que está siendo pesada muestra diferencias, si la lectura se toma en el centro del platillo o en uno de sus extremos. El esquema que se incluye a continuación explica el principio de operación, el cual algunos fabricantes han introducido a las balanzas electrónicas.

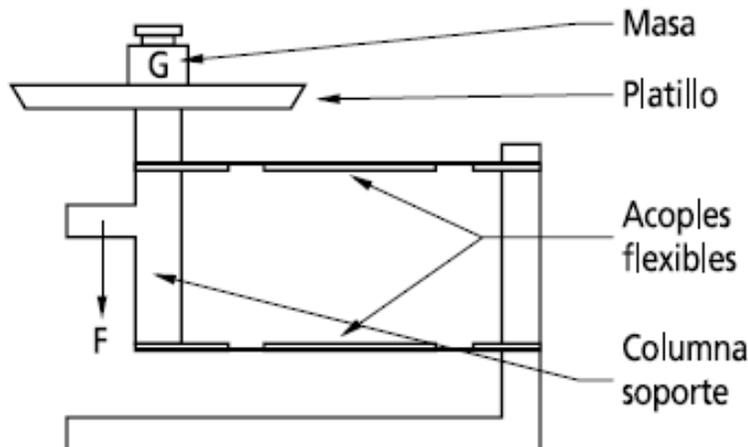


Figura 2.5 Balanza de plato superior

2.4.2.1.4. Báscula de resorte. Su funcionamiento está basado en una propiedad mecánica de los resortes, que consiste en que la fuerza que ejerce un resorte es proporcional a la constante de elasticidad del resorte $[k]$ multiplicada por la elongación del mismo $[x]$ $[F = -kx]$. Lo anterior implica que mientras más grande sea la masa $[m]$ que se coloca en el platillo de la balanza, mayor será la elongación, siendo la misma proporcional a la masa y a la constante del resorte. La calibración de una balanza de resorte depende de la fuerza de gravedad que actúa sobre el objeto, por lo que deben calibrarse en el lugar de empleo. Se utilizan si no se requiere gran precisión.

En la figura 2.1 de la izquierda se muestra el principio por el que se rigen, mientras que en la derecha vemos algunos modelos reales.

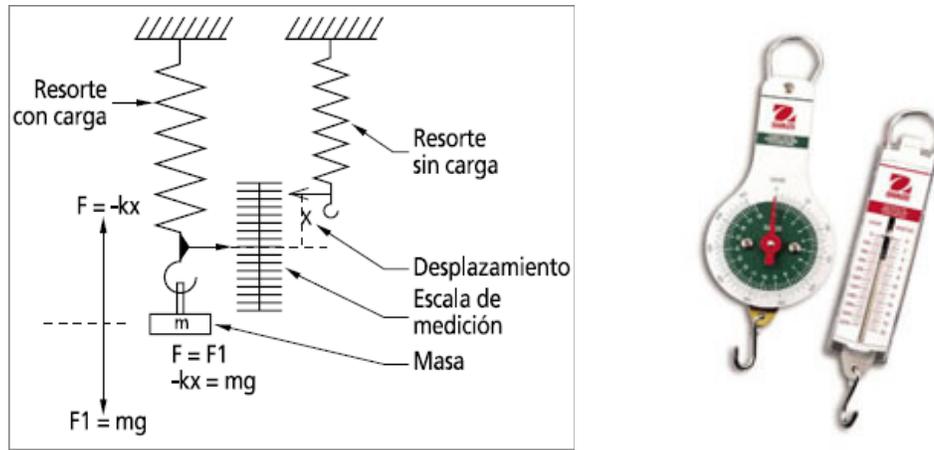


Figura 2.17 Balanza de resorte (a) Principio básico de funcionamiento (b) Modelo real

2.1.2.1.5 Balanza de pesa deslizante. Dispone de dos masas conocidas que se pueden desplazar sobre escalas –una con una graduación macro y la otra con una graduación micro–; al colocar una sustancia de masa desconocida sobre la bandeja, se determina su peso deslizando las masas sobre las escalas mencionadas hasta que se obtenga la posición de equilibrio. En dicho momento se toma la lectura sumando las cantidades indicadas por la posición de las masas sobre las escalas mencionadas.

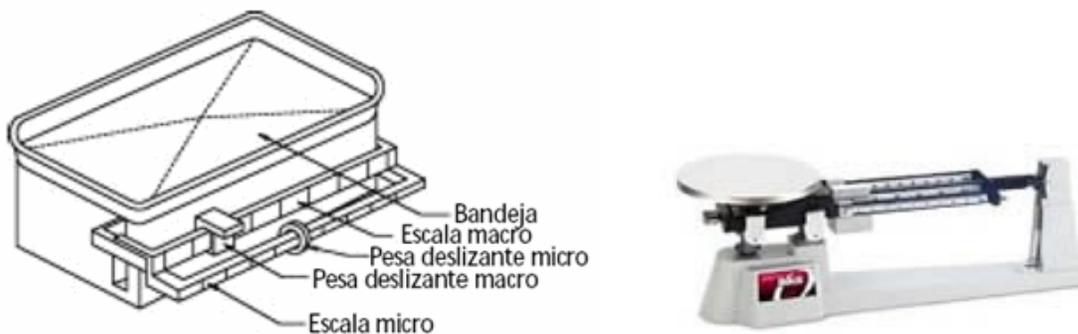


Figura 6.18 Modelos de balanzas mecánicas

2.1.2.1.6 Balanzas electrónicas

Las balanzas electrónicas involucran tres elementos básicos:

1. El objeto a ser pesado que se coloca sobre el platillo de pesaje ejerce una presión que está distribuida de forma aleatoria sobre la superficie del platillo. De allí, mediante un mecanismo de transferencia –palancas, apoyos, guías, se concentra la carga del peso en una fuerza simple [F] que puede ser medida. $[F = \int P \delta a]$ La integral de la presión sobre el área permite calcular la fuerza.
2. Un transductor de medida, conocido con el nombre de *celda de carga*, produce una señal de salida proporcional a la fuerza de carga, en forma de cambios en el voltaje o de frecuencia.
3. Un circuito electrónico análogo digital que finalmente presenta el resultado del pesaje en forma digital.

Las balanzas de laboratorio operan de acuerdo al principio de compensación de fuerza electromagnética, aplicable a desplazamientos o torques donde se combina la exactitud de los componentes mecánicos con los sistemas automáticos de lectura.

Funcionamiento. Las partes móviles (platillo de pesaje, columna de soporte [a], bobina, indicador de posición y carga [G] –objeto en proceso de pesaje) son mantenidas en equilibrio –en flotación – por una fuerza de compensación [F] que es igual al peso. La fuerza de compensación es generada por el flujo de una corriente eléctrica, a través de una bobina ubicada en el espacio de aire existente en un electroimán –magneto – cilíndrico. La fuerza F es calculada mediante la ecuación $[F = I \times l \times B]$, donde: I = corriente eléctrica, l = longitud total del alambre de la bobina y B = intensidad de flujo magnético en el espacio de aire del electroimán. Con cualquier cambio en la carga –peso/masa –, el sistema móvil – mecánico – responde, desplazándose verticalmente una fracción de distancia, detectada por

un fotosensor [e], que como resultado envía una señal eléctrica al servoamplificador [f] que cambia el flujo de corriente eléctrica que pasa por la bobina del magneto [c], de forma que el sistema móvil retorne a la posición de equilibrio al ajustarse el flujo magnético en el electroimán. En consecuencia, el peso de la masa G se puede medir de forma indirecta, a partir del flujo de corriente eléctrica que pasa por el circuito midiendo el voltaje [V], a través de una resistencia de precisión [R]. $[V = I \times R]$.

A la fecha han sido desarrollados muchos sistemas que utilizan la electrónica para efectuar mediciones muy exactas de masa y peso. El esquema que se presenta a continuación explica la forma en que funciona la balanza electrónica.

Sistema de procesamiento de la señal

El sistema de procesamiento de la señal está compuesto por el circuito que transforma la señal eléctrica, emitida por el transductor de medida en datos numéricos que pueden ser leídos en una pantalla. El proceso de la señal comprende las siguientes funciones:

1. *Tara.* Se utiliza para colocar en cero el valor de la lectura, con cualquier carga dentro del rango de capacidad de la balanza. Se controla con un botón ubicado generalmente en el frente de la balanza.
2. *Control para ajuste del tiempo de integración.* Los valores de peso son promediados durante un período predefinido de tiempo. Dicha función es muy útil cuando se requiere efectuar operaciones de pesaje en condiciones inestables. Por ejemplo: presencia de corrientes de aire o vibraciones.
3. *Redondeo del resultado.* En general las balanzas electrónicas procesan datos internamente de mayor resolución que aquellos que se presentan en la pantalla. De esta forma se logra centrar exactamente la balanza en el punto cero, cuando la balanza es tarada. El valor interno neto se redondea en la pantalla.

4. *Detector de estabilidad.* Se utiliza en operaciones de pesaje secuencial y permite comparar los resultados entre sí. Cuando el resultado se mantiene, es liberado y puesto en pantalla, aspecto que se detecta al encenderse el símbolo de la unidad de peso seleccionada.
5. *El procesamiento electrónico de las señales* permite disponer de otras funciones tales como conteo de partes, valor porcentual, valor objetivo, entre otras. Dichos cálculos son realizados por el microprocesador, de acuerdo con las instrucciones que el operador ingresa a través del teclado de la balanza.

2.5 Sistemas Dinámicos

La historia del desarrollo de los sistemas de pesaje dinámico ha mostrado los diversos intentos realizados para conocer el peso de los vehículos, sin recurrir a básculas estáticas. Los dispositivos han variado con respecto a los principios de medición utilizados, a la forma de los instrumentos y a las adaptaciones y adecuaciones de estructuras existentes en las carreteras. Estos desarrollos responden a las necesidades de los respectivos departamentos de transporte para establecer una armonía entre los vehículos y las carreteras y puentes.

Los primeros sistemas que se desarrollaron consistieron en pesadoras hidráulicas, en pesadoras con base en una placa sujeta a flexión y en el uso de un cable coaxial piezocerámico. La contribución de estos sistemas fue muy diversa.

La instalación para las pesadoras hidráulicas (se usaron cerca de 30 dispositivos) requirió de un cimiento muy costoso, a una profundidad de 90 cm. que en ocasiones alcanzaba zonas de la estructura con variaciones en la rigidez, produciendo alteraciones en las lecturas. Aunado a estas perturbaciones, la viscosidad del aceite hidráulico, que variaba con la temperatura, condujo a errores continuos en mediciones realizadas a altas temperaturas, mostrando además poca sensibilidad en temperaturas bajas, influyendo sobre los pesos indicados por el dispositivo. Conforme con estos resultados, este tipo de dispositivo no fue

recomendado, pues presentó un comportamiento variable para un intervalo de temperatura de 5 °C a 20 °C.

Para el caso de sistemas de pesaje del tipo de placa en flexión, que consistía en una placa instrumentada con elementos sensibles a la deformación (extensómetros), soportada por dos apoyos extremos, los resultados de pruebas de los cerca de 70 dispositivos instalados mostraron que fueron los detectores de peso más exactos y confiables. Algunas de las ventajas observadas fueron la relativa poca profundidad para su instalación y operación (de 4 a 8 cm.), la independencia de las lecturas con la temperatura y la dependencia lineal del voltaje con la carga aplicada. Además de lo anterior, mostraron una aceptable capacidad de carga asociada a la resistencia y rigidez de sus elementos. Sin embargo, su uso requirió de una preparación del sitio de colocación que facilitara la adaptación óptima de los elementos de pesaje a la superficie de la carretera.

Esta condición se derivó de la necesidad de minimizar la ocurrencia de fuerzas dinámicas adicionales, como es el caso de las perturbaciones ocasionadas por irregularidades en la superficie del pavimento previo al paso del vehículo sobre el dispositivo de pesaje. Durante el uso de estos dispositivos con placas instrumentadas con extensómetros hubo poca ocurrencia de fallas, raramente reportadas. Sin embargo, la estrategia para resolver este tipo de situaciones fue la de reemplazar con una placa nueva instrumentada de la misma manera, aquella que contenía los extensómetros. Este reemplazo implicaba una operación relativamente rápida, estimándose de 2 a 3 h.

Para probar otras alternativas de medición del peso, se instalaron equipos que empleaban un cable coaxial piezoeléctrico. Desde el inicio de la investigación, los dispositivos con cable coaxial piezoeléctrico se utilizaron sólo para identificar los ejes de vehículos de carga de los de pasajeros, limitados por la dependencia de su comportamiento con la temperatura. Esto fue evidente debido a que los dispositivos que funcionaban perfectamente bien durante la mañana, presentaban un comportamiento completamente fuera de ajuste después de pocas horas de exposición a los rayos del sol. También se observó que las vibraciones del

vehículo debidas a irregularidades del camino, conducían a señales adicionales no deseadas.

Identificadas las ventajas sobresalientes con el uso de medidores de deformación en dispositivos de medición del peso, se buscaron otras formas de aplicación de extensómetros que pudieran aplicarse para el mismo fin. Australia ha sido pionero en el uso de este tipo de sensores en sus sistemas de monitoreo. El departamento de caminos desarrolló un sistema llamado AXWAY que se utilizaría bajo la estructura de un puente, basado en el uso de extensómetros. La experiencia que tomaron con este diseño los llevó a desarrollar el sistema llamado CULWAY, en donde los extensómetros fueron colocados en el techo de una alcantarilla. De esta manera, el peso era registrado midiendo el voltaje producido al doblarse la placa de la alcantarilla, causada por la carga del eje al pasar por encima. Esta señal era medida y registrada por un sistema de adquisición de datos portátil, al momento en que el vehículo pasaba.

3. Descripción del principio de funcionamiento de las celdas de deformación.

Como ya hemos visto, uno de los problemas más difíciles con que se enfrenta cualquier aplicación de ingeniería es hallar la acción que las tensiones ejercen sobre un cuerpo, mediante la aplicación directa de dispositivos de medición. Antes del invento del indicador de deformación por resistencia eléctrica, el medio más importante de que se disponía para este fin era el del extensómetro con sus diversas variantes (mecánico, óptico, etc.) pero este instrumento presenta un cierto número de incorrecciones, entre las que destacan el tamaño relativo que hace imposible su aplicación en condiciones de espacio limitado, y la longitud de medición requerida para dicha aplicación, que normalmente no es inferior a 12 mm.

El principio en el que se basan los indicadores de deformación por resistencia eléctrica fue establecido por Lord Kelvin en 1856 cuando observó que, al aplicar un esfuerzo en un hilo de metal, además de variar su longitud y diámetro, también variaba su resistencia eléctrica. En 1930 este efecto fue utilizado para desarrollar independientemente el indicador de deformaciones por resistencia eléctrica en un alambre trabado, el cual va unido, por medio de un cemento adecuado, a la superficie a ensayar, estando sometido a la misma deformación. Desde que se implantó este tipo de indicador, se han ido desarrollando otros basados en efectos distintos al de la variación de la resistencia eléctrica, pero el indicador de resistencia sigue siendo, con mucho, el más usado. Los indicadores más importantes empleados en la determinación de la deformación, son los siguientes:

Tabla 3.1 Indicadores de deformación

Tipos de Indicador	Efecto de la deformación
Alambre Trabado	Variación de la resistencia eléctrica
Laminilla Trabada	
Semiconductor	
Fotoelástico	Desplazamiento de la franja
Extensómetro	Incluye una gran variedad de métodos para medir la dilatación: mecánicos, ópticos, neumáticos, inductancia, capacitancia y respuestas acústicas.

3.1 Indicadores de deformación semiconductores o piezorresistivos

Los indicadores semiconductores se tallan de cristales simples de silicio o germanio, los cuales llevan combinados cantidades exactas de impurezas especiales, tales como boro, que imparten ciertas características deseables. Tales cristales se conocen como cristales “dopados”.

La ventaja esencial de los indicadores semiconductores es su gran sensibilidad a la deformación que permite medir con precisión deformaciones muy pequeñas y, mientras que los indicadores de alambre o de lámina poseen factores de indicador del orden de 2, el factor de la mayoría de los indicadores semiconductores oscila entre 100 y 200. La variación de resistencia eléctrica de los semiconductores puede ser positiva, o bien, negativa, esto es, un indicador cuya resistencia eléctrica aumenta en respuesta a la deformación de tracción se conoce como indicador positivo o tipo-p y uno cuya resistencia decrece en respuesta a la deformación de tracción se conoce como indicador negativo o tipo-n.

El indicador consta de un solo filamento rectangular, de aproximadamente 0.05 mm de espesor por 0.25 mm de anchura, cuyas longitudes varían entre 1.5 y 12 mm. Se construyen lo más delgados posible, ya que la tensión de rotura del material aumenta al decrecer la sección transversal y, además, el indicador puede doblarse sin fractura hasta curvaturas de radios muy pequeños. El elemento puede estar unido a un soporte plástico o de acero inoxidable, el cual puede soldarse en posición, o bien, desunirse, en cuyo caso deben tomarse especiales precauciones para el manejo.

Los indicadores ligeramente “dopados” poseen una gran sensibilidad, esto es, factores de indicador elevados y, también, alta resistencia eléctrica, del orden de 200 Ω , aunque también se fabrican indicadores con resistencias de 1000 Ω e, incluso, de 10 k Ω . Los indicadores fuertemente “dopados” que poseen una resistencia eléctrica baja tienen también factores de indicador reducidos, del orden de 50. A temperatura ambiente constante, la variación de resistencia, dada como una relación respecto a la resistencia sin deformación,

es una curva casi parabólica, esto es, el voltaje de salida es claramente no lineal, de modo que un indicador de silicón del tipo-p ligeramente “dopado” puede tener una curva de variación de resistencia/deformación.

3.4 Indicadores adheridos para medir la deformación por medio de la resistencia eléctrica

Los instrumentos que miden la deformación por resistencia eléctrica poseen las siguientes características:

- a) Las longitudes de estos indicadores son tan pequeñas que pueden no exceder de 0.127 mm, aunque, en los de uso más común, la longitud oscila entre 5 mm y 25 mm. El respaldo al cual va fijado el indicador incrementa la longitud total.
- b) El peso es despreciable y la unión a cuerpo que se ensaya es bastante fácil.
- c) La sensibilidad a la deformación es más bien baja; por ejemplo, un indicador de alambre de constantán de una resistencia de 100 Ω mostraría un incremento de aproximadamente 0.25 Ω en un acero de bajo contenido de carbono deformado hasta el límite elástico.
- d) La temperatura, la presión y la humedad, el comportamiento en ambientes líquidos, etc., afectan el rendimiento, pero por lo general, es posible proveer una protección o compensación.
- e) Los indicadores de deformación pueden señalar deformaciones estáticas, transitorias y dinámicas (50 000 Hz o más) presentando poca dificultad la indicación y el registro a distancia.
- f) Los indicadores de alambre y lámina son de precio similar, el cual depende de su complejidad.

Los indicadores de deformación por resistencia metálica se construyen en dos tipos básicos: alambre y lámina. Los del tipo de lámina que se obtienen por ataque químico o por prensado partiendo de chapa fina, tienen la ventaja de que pueden tomar cualquier forma capaz de obtenerse por estirado; también pueden tener un perfil más bajo, así como una

sensibilidad transversal y lineal muy buena; por otra parte, debido a que la rejilla es de forma rectangular y muy delgada, el calor se disipa más rápidamente que en los indicadores de alambre. En virtud de que su calidad suele ser superior, los indicadores de lámina han sustituido ampliamente a los de alambre, excepto para aplicaciones que tienen lugar una vez alcanzado el límite elástico y donde se requiere una rejilla que supere los 150 mm de longitud.

La resistencia R de un metal depende de su resistividad eléctrica ρ , su superficie a y su longitud L , según la ecuación siguiente:

$$R = \rho \frac{L}{a}$$

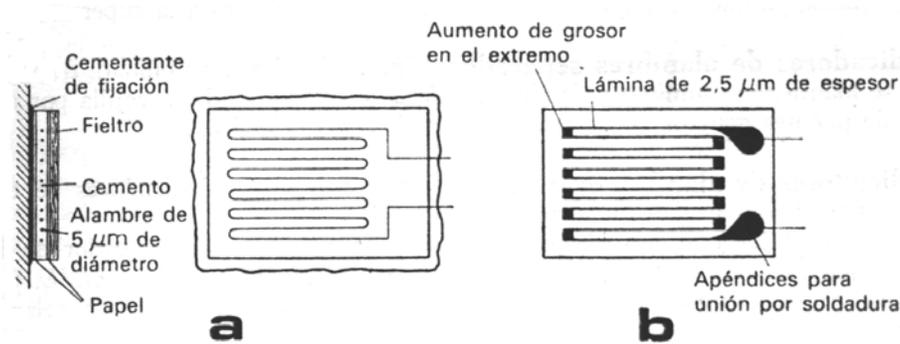


Figura 3.1 Celdas de deformación del tipo rejilla del tipo (a) Alambre (b) Lámina

Así, para obtener un indicador de alta resistencia que ocupe poca superficie, el metal elegido ha de tener una resistividad elevada, el número de espiras en la rejilla ha de ser grande y el área transversal debe ser pequeña. Los indicadores de alambre van empotrados en cementos plásticos y colocados entre capas de papel fino o de aislante plástico, previéndose a veces una cubierta de fieltro para proporcionarles más protección. El cemento retiene rígidamente el alambre sobre el respaldo, de modo que no se doble bajo la deformación. Los indicadores de lámina suelen adherirse con cemento a un respaldo, pero también se puede, mediante un proceso especial, transferirlos directamente a una superficie aislada, la cual elimina las limitaciones de temperatura de funcionamiento propias del papel

o de los traleros-soporte de plástico. Dos características importantes de los indicadores de lámina, que no están presentes en los de alambre, son:

- 1) El aumento de grosor del extremo de cada espira, el cual, al introducir una baja resistencia eléctrica transversal, reduce la sensibilidad transversal a proporciones casi despreciables
- 2) La presencia de apéndices relativamente grandes unidos a la rejilla, que permiten soldar con facilidad los conductores y reducen el peligro de avería por fatiga.

Además de los indicadores convencionales de alambre y de lámina, existe un número de otros tipos de mucha menor aplicación

Indicadores de enrollamiento circular. La ventaja de este tipo de indicadores que pueden fabricarse en longitudes cortas, normalmente de 2 a 6 mm, pero también se hacen hasta 12 mm. La sensibilidad transversal es pequeña, ya que las espiras extremas son perpendiculares a la superficie.

Indicadores de alambres separados. La sensibilidad transversal se mantiene al mínimo uniendo los diferentes alambres de la rejilla por medio de puentes gruesos de cobre de baja resistencia eléctrica.

Indicadores de alambre entretejido. Estos indicadores se emplean para medir grandes deformaciones en tejidos, etc.

Es muy deseable que la variación de resistencia $\delta R/R$ de un indicador de deformación presente una relación lineal con la deformación medida $\delta L/L$, exigencia que satisfacen los indicadores de deformación metálicos. Esta relación se denomina factor de indicador λ .

Las principales características de los diferentes dispositivos que nos permiten medir la tensión se enmarcan en la siguiente tabla 2:

Tabla 3.2 Ventajas y desventajas de los dispositivos para medir tensión

	Ventajas	Desventajas
Semiconductores y piezorresistivos	<ul style="list-style-type: none"> Alta precisión Variación de la Resistencia Factor de indicador entre 100 y 200 	<ul style="list-style-type: none"> Variación no lineal (tipo parabólica)
Anillos Deslizantes	<ul style="list-style-type: none"> Medición de la deformación en objetos que giran 	<ul style="list-style-type: none"> Alta variación de la resistencia en los anillos y escobillas
Extensómetros mecánicos		
Berry	<ul style="list-style-type: none"> Mide deformaciones lineales Calibración de hasta 200 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> Lentitud de lectura Imposibilidad de automatizar el proceso
Huggenberger	<ul style="list-style-type: none"> Alta ampliación (hasta 2000) 	<ul style="list-style-type: none"> Lentitud de lectura Imposibilidad de automatizar el proceso
Johanson	<ul style="list-style-type: none"> Amplificación muy alta (hasta 5000) Calibrado entre 1 y 50 mm. 	<ul style="list-style-type: none"> Lentitud de lectura Imposibilidad de automatizar el proceso
Extensómetro Óptico	<ul style="list-style-type: none"> Medición dinámica de hasta 40 Hz Deformaciones de hasta $2 \mu\text{m/m}$. 	<ul style="list-style-type: none"> Registros fotográficos
Extensómetro Neumático	<ul style="list-style-type: none"> Valores lineales Amplificación de hasta 100,000 veces 	<ul style="list-style-type: none"> Inyección de aire a presión constante
Extensómetro Acústico	<ul style="list-style-type: none"> Robustez y seguridad de funcionamiento Sensibilidad de $0.5 \mu\text{m/m}$. 	<ul style="list-style-type: none"> La frecuencia natural del alambre Utilización de osciloscopio Frecuencia de referencia
Extensómetro de Inductancia	<ul style="list-style-type: none"> Sensibilidad de $0.01 \mu\text{m/m}$. Dinámica $f_{VB} \geq 10 f_m$ 	<ul style="list-style-type: none"> Señal de alterna bien calibrada
Extensómetro de Capacitancia	<ul style="list-style-type: none"> Precisión entre $\pm 0.2\%$ y $\pm 0.5\%$ Amplio voltaje de operación 	<ul style="list-style-type: none"> Problemas térmicos y de circuito.
Deformadores fotoelásticos	<ul style="list-style-type: none"> Los medidores no requieren instrumentación, pueden acutar directamente con el operador. Buena precisión dentro de un rango predeterminado 	<ul style="list-style-type: none"> Alto costo por la implementación de dispositivos ópticos y material de transmisión Adherencia en materiales de planicidad muy precisa
Celdas de deformación	<ul style="list-style-type: none"> Dimensiones y peso muy pequeño Mediciones de deformaciones relativas, alta precisión y sensibilidad Posibilidad de mediciones remotas 	<ul style="list-style-type: none"> Baja tensión de salida Voltaje y corriente pequeña para evitar daño

Como se ha explicado anteriormente la gama de celdas de deformación existente en el mercado es muy extensa, siendo las de hilo o lámina metálica las más utilizadas en ingeniería civil. Para su correcto funcionamiento como transductor de deformaciones, la celda de deformación debe pegarse firmemente a la estructura para que las deformaciones de ésta se transmitan al hilo conductor.

Su utilización presenta una amplia variedad de ventajas enumeradas anteriormente, como su gran sensibilidad y precisión en las medidas, la posibilidad de concentrar la medición en un entorno reducido de un punto de la estructura, la automatización del proceso, que, además, puede realizarse a distancia y su bajo costo por punto de medida. Puede operar también en condiciones de temperaturas extremas y tienen una buena respuesta frente a efectos dinámicos y transitorios. Como inconvenientes puede citarse su alta sensibilidad a cambios de humedad o a la poca estabilidad que presentan en medidas a largo plazo. No obstante, dada la difusión general y su economía, es el mejor método para este proyecto.

Utilizaremos un celda de carga construida por un puente de Wheatstone, esto es, una configuración de 4 celdas de deformación conectadas como se muestra en la figura 7:

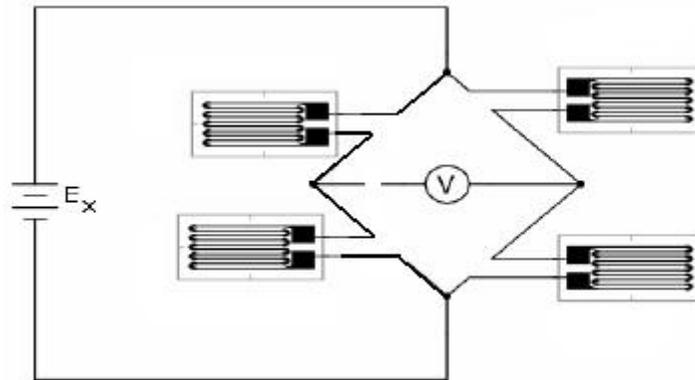


Figura 3.2 Celda de carga de puente completo de Wheatstone

Ésta es la configuración más común, sin embargo, existen algunas celdas de carga que usan 8, 16, 32 ó más celdas de deformaciones. Este tipo de configuración tiene la ventaja de que tiene la capacidad de compensación del efecto de temperatura, ya que los efectos se aplican sobre las cuatro celdas y se anulan entre sí, además que la sensibilidad se incrementa.

En el mercado encontramos una celda de carga fabricada por la empresa UtilCell en España, el modelo 270 que resiste un peso máximo de 300 kgf, viene adherido a una estructura de duraluminio, su conexión eléctrica y una fotografía de ellos se muestran en la figura 3.8.



Figura 3.3 Fotografía de la celda de carga con su conexión eléctrica

Los parámetros básicos de un sensor son: margen o campo de medida, sensibilidad, resolución y exactitud. La sensibilidad es la relación entre la magnitud de salida y la de entrada, en ausencia de errores. Si la sensibilidad es constante en todo el margen de medida, se dice que el sensor es lineal. La resolución es el menor cambio en la magnitud de entrada que se puede detectar a la salida; viene limitada en último término por las fluctuaciones aleatorias presentes en todo elemento (mecánico o eléctrico) que disipe energía, como es el caso de los sensores. La exactitud describe el grado de coincidencia entre el valor real de la entrada y su valor deducido a partir de la salida actual y de la sensibilidad. Su estudio detallado se expondrá más tarde.

La salida de los sensores es normalmente, aunque no exclusivamente, en forma de señal analógica (continua en cuanto a amplitud y en el tiempo). En algún punto dicha señal hay que convertirla en digital, por cuanto los elementos de procesamiento y muchos de los de presentación requieren entradas digitales.

Las características de la celda de carga se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Características eléctricas de la celda de deformación

ESPECIFICACIONES			SPECIFICATIONS
Cargas nominales (Ln)	100-200-300	kg	Nominal capacities (Ln)
Clase de precisión	3000	n. OIML	Accuracy class
Carga mínima	0	%Ln	Minimum dead load
Carga de servicio	120	%Ln (1)	Service load
Cargas límite	150	%Ln (1)	Safe load limit
Error combinado	< ±0.017	%Sn (2)	Total error
Error repetibilidad	< ±0.01	%Sn	Repeatability error
Efecto de la temperatura: en el cero en la sensibilidad	< ±0.01 < ±0.006	%Sn/5°K %Sn/5°K	Temperature effect: on zero on sensitivity
Error de fluencia (30 minutos)	< ±0.016	%Sn	Creep error (30 minutes)
Compensación de temperatura	-10...+40	°C	Temperature compensation
Límites de temperatura	-20...+70	°C	Temperature limits
Sensibilidad nominal (Sn)	2 ±10%	mV/V	Nominal sensitivity (Sn)
Tensión de alimentación nominal	10	V	Nominal input voltage
Tensión de alimentación máxima	15	V	Maximum input voltage
Resistencia de entrada	400 ±20	Ω	Input impedance
Resistencia de salida	350 ±3	Ω	Output impedance
Desequilibrio inicial	< ±2	%Sn	No load output
Resistencia de aislamiento	> 5000	MΩ	Insulation resistance
Deformación máxima (a Ln)	0.3-0.5	mm	Maximum deflection (at Ln)
(1) En carga centrada sobre la célula. No para cargas excéntricas Only central loads on the load cell. Not for off-center loads			
(2) Error combinado: No Linealidad e Histéresis / Total error: Non Linearity and Hysteresis			

4. Circuitos de Acondicionamiento de la Señal

La señal de salida del sensor de un sistema de medición en general se debe procesar de una forma adecuada para la siguiente etapa de la operación. La señal puede ser, por ejemplo, demasiado pequeña y sería necesario amplificarla; podría contener interferencias que eliminar; ser no lineal y requerir su linealización; ser analógica y requerir su digitalización; ser digital y convertirla en analógica; ser un cambio en el valor de la resistencia y convertirla a un cambio de corriente de magnitud adecuada, etcétera. A todas estas modificaciones se les designa en general con el término acondicionamiento de señal. Por ejemplo, la salida de un deformímetro es un cambio en el valor de su resistencia. Por lo tanto, es necesario utilizar un módulo acondicionador de señal para modificar dicha salida y convertirla en una variación de voltaje con mayor amplitud, contar con un medio para rechazar el ruido y una compensación por temperatura.

Los siguientes son algunos de los procesos que se pueden presentar en el acondicionamiento de una señal:

1. **Protección** para evitar daño al siguiente elemento, por ejemplo un microprocesador, como consecuencia de un voltaje o una corriente elevados. Para tal efecto, se colocan resistencias limitadoras de corriente, fusibles que se funden si la corriente es demasiado alta, circuitos para protección de polaridad y limitadores de voltaje.
2. **Convertir** una señal en un tipo de señal adecuado. Sería el caso cuando es necesario convertir una señal a un voltaje de DC, o a una corriente. Por ejemplo, el cambio de la resistencia de un deformímetro se debe convertir en un cambio de voltaje. Para ello se utiliza un puente Wheatstone y se aprovecha el voltaje de desbalance. Aquí también podría necesitarse una señal analógica o digital.
3. **Obtención del nivel adecuado** de la señal. En un termopar, la señal de salida es de unos cuantos milivolts. Si la señal se va a alimentar a un convertidor analógico a digital para después entrar a un microprocesador, será necesario ampliarla en forma considerable, haciéndola de una magnitud de milivolts a otra de volts. En la amplificación es muy común utilizar amplificadores operacionales.

4. Eliminación o reducción del **ruido**. Por ejemplo, para eliminar el ruido en una señal se utilizan filtros.
5. **Manipulación** de la señal, por ejemplo, convertir una variable en función lineal. Las señales que producen algunos sensores, por ejemplo los medidores de flujo, son alinéales y hay que usar un acondicionador de señal para que la señal que se alimenta, en el siguiente nivel sea lineal.

Todas estas operaciones hay que hacerlas manteniendo los errores dentro de márgenes aceptables. El procesamiento analógico es más rápido pero menos flexible y más caro en componentes que el procesamiento por software. Si los sensores necesitan una señal de alimentación externa, los circuitos de acondicionamiento de señal deben proporcionársela.

Dado que manejan sólo señales eléctricas sin convertirlas en otras formas físicas, los acondicionadores de señal constituyen lo que se denomina una interfaz. Otras interfaces del sistema son las necesarias para enviar la información a través de los canales o líneas de comunicación. Su función y estructura dependen tanto del medio de comunicación como del código empleado para el mensaje.

4.1 Conversor de señal analógico a digital

Como se explicó en el capítulo anterior nuestro sensor es un arreglo de puente de Wheatstone, con lo que lograremos convertir la variación de la celdas de deformación en un cambio de voltaje, para ello se alimentó la celda de carga con una fuente de corriente directa regulada de 10 V. Además se integró al mismo circuito la fuente que alimentará a todo nuestro circuito de acondicionamiento. La figura 1 nos muestra el esquema de la fuente que alimenta el circuito de acondicionamiento.

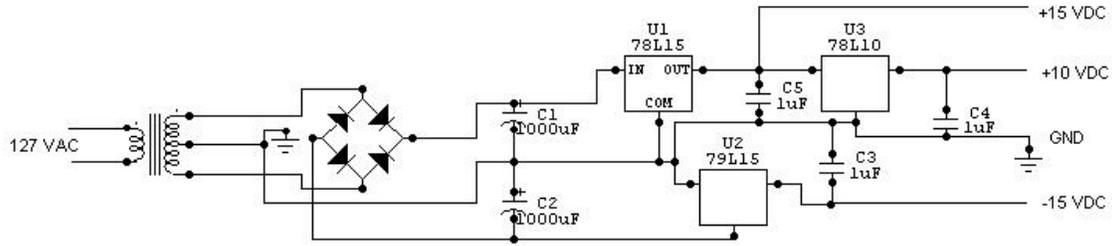


Figura 4.1 Diagrama de la fuente de alimentación

Los voltajes de +15 y -15 VDC son para alimentar los amplificadores operacionales, mientras que los 10 VDC son para alimentar el puente de Wheatstone para la celda de carga.

En la etapa de la obtención de un nivel adecuado se pueden utilizar dos configuraciones con amplificador operacional:

- Modo Diferencial
- Amplificador de instrumentación

La diferencia entre uno y otro es que la relación de rechazo en modo común (RRMC) es más grande en el amplificador de instrumentación. A continuación se da una explicación de cada uno de ellos.

4.1.1 Modo Diferencial

El amplificador diferencial amplifica la diferencia entre dos voltajes de entrada. En la figura se muestra el circuito correspondiente.

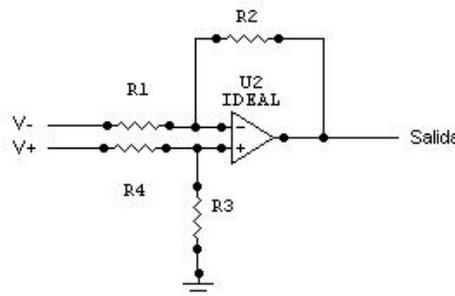


Figura 4.2 Amplificador diferencial

Por lo que tendremos que las expresiones para la salida están dadas:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} V_2 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1\right)$$

Si hacemos que se verifique la siguiente relación de resistencias:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4}$$

Se obtiene la expresión simplificada que indica cómo la tensión de salida es función de la diferencia de las tensiones de entrada:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1)$$

En realidad también se agrega el voltaje en modo común, V_{MC}, ya que es común en las dos entradas. Esto sucede porque las dos entradas no se encuentran acopladas con perfección y la ganancia no es la misma, por lo que la salida no es del todo proporcional a la diferencia entre los dos voltajes de entrada. Por lo tanto, la salida es:

$$V_o = G_d \Delta V + G_{MC} V_{MC}$$

donde G_d es la ganancia de la diferencia en voltaje ΔV, G_{MC} la ganancia del voltaje en modo común, V_{MC}.

4.1.2 Amplificador de instrumentación

En un amplificador para instrumentación típico se utilizan tres amplificadores operacionales como se muestra en la figura, en vez de uno solo circuito que se puede obtener como circuito integrado. Este tipo de circuito tiene una impedancia de entrada alta en general de unos 300 MΩ, una ganancia de voltaje alta y una RRMC excelente, de más de 100 dB. En la primera etapa (Figura 3) se encuentran los amplificadores U1A y U1B, uno de los cuales está conectado como amplificador inversor y el resto como no inversor. El U1C es un amplificador diferencial cuyas entradas provienen de U1A y de U1B.

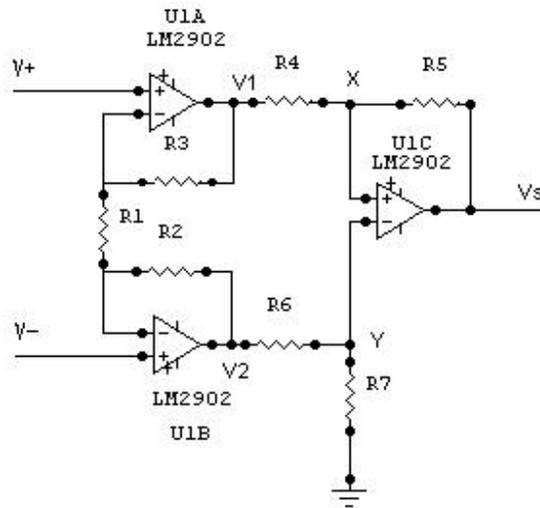


Figura 4.3 Amplificador de Instrumentación

Dado que por U1C casi no pasa corriente, la que pasa por R4 es igual a la de R5. Por lo tanto:

$$\frac{V_1 - V_X}{R_4} = \frac{V_1 - V_S}{R_5}$$

La entrada diferencial en U1C es de hecho cero, por lo que $V_Y = V_X$. Por ello, la ecuación anterior se puede expresar como:

$$V_S = \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) V_Y - \frac{R_5}{R_4} V_1$$

R6 y R7 forman un divisor del voltaje en V2, por lo tanto:

$$V_Y = \frac{R_6}{R_6 + R_7} V_2$$

Con base en la ecuación anterior:

$$V_S = \frac{1 + \frac{R_5}{R_4}}{1 + \frac{R_7}{R_6}} V_2 - \frac{R_5}{R_4} V_1$$

Y si hacemos que $R_4/R_5 = R_6/R_7$ tenemos que $V_s = V_2 - V_1$

Los voltajes en V_1 y V_2 están dados por:

$$V_1 = \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right)V_+ - \left(\frac{R_3}{R_1}\right)V_- + \left(1 + \frac{R_3}{R_1}\right)V_{MC}$$

$$V_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_- - \left(\frac{R_2}{R_1}\right)V_+ + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_{MC}$$

La entrada diferencial en U1C es $V_1 - V_2$ y, por lo tanto:

$$V_2 - V_1 = \left(1 + \frac{R_3}{R_1} + \frac{R_2}{R_1}\right)V_+ - \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_3}{R_1}\right)V_- + \left(\frac{R_3}{R_1} - \frac{R_2}{R_1}\right)V_{MC}$$

Si $R_2 = R_3$ desaparece el término del voltaje en modo común y, por lo tanto:

$$V_s = V_2 - V_1 = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)(V_+ + V_-)$$

Por lo que con esto eliminaremos el valor común de voltaje en corriente directa que nos puedan presentar las celdas de deformación (aproximadamente 5V) además, amplificaremos la diferencia de estas señales en valor absoluto. Para la calibración en sitio se colocará un potenciómetro en R_1 .

4.2 Protección

Existen diversas situaciones en las que la conexión de un sensor con la unidad siguiente, por ejemplo un microprocesador, entraña la posibilidad de causar daños como resultado quizás de un voltaje o corrientes elevados. Para protegerse contra corrientes grandes en la línea de entrada se incorpora una serie de resistencias que limiten la corriente a un nivel aceptable y un fusible que se funda cuando la corriente exceda a un nivel seguro. Contra los altos voltajes y polaridades equivocadas se utiliza un circuito con diodo Zener.

En algunas situaciones es deseable aislar del todo los circuitos y eliminar todas las conexiones eléctricas entre ellos. Para ello se utiliza un optoaislador; implica convertir una señal eléctrica en una señal óptica; ésta pasa a un detector que, a su vez, la vuelva a convertir en señal eléctrica.

4.3 Filtrado

El término filtrado se refiere al proceso de eliminación de cierta banda de frecuencias de una señal y permite que otras se transmitan. El rango de frecuencias que pasa por un filtro se conoce como *banda de paso*, y el rango que no pasa como *banda de supresión*; la frontera entre lo que se suprime y lo que pasa se conoce como frecuencia de corte. Los filtros se clasifican de acuerdo con los rangos de frecuencia que transmiten o rechazan. Un *filtro pasa bajas* tiene una banda de paso que acepta la transmisión de todas las frecuencias desde 0, hasta cierto valor. El *filtro pasa altas* tiene una banda de paso que permite la transmisión de todas las frecuencias a partir de un determinado valor hasta un valor infinito. El *filtro paso bandas* permite la transmisión de todas las frecuencias que están dentro de una banda especificada. El *filtro supresor de banda* rechaza e impide la transmisión de todas las frecuencias de cierta banda. En todos los casos, la frecuencia de corte se define como aquella para la cual el voltaje de salida es 70.7 % del de la banda de paso.

Se tienen dos grupos principales de filtros: *pasivos*, donde el término pasivo describe un filtro en el cual sólo hay resistencias, capacitores e inductores, y los *activos*, donde término activo se refiere a un filtro en el que también hay un amplificador operacional. Los filtros pasivos tienen la desventaja de que la corriente que absorbe el siguiente elemento puede modificar las características de frecuencia del filtro. Estos problemas no se presentan en los filtros activos.

Es muy común que los filtros pasa bajas se utilicen en parte del acondicionamiento de las señales, debido a que la mayor parte de la información útil que se transmite es de baja frecuencia. Dado que el ruido tiende a producirse a frecuencias mayores, el filtro pasa bajas puede ser útil para bloquearlo. De esta manera, el filtro pasa bajas se elige con una

frecuencia de corte de 40 Hz para bloquear las señales de interferencia de la línea de alimentación comercial y el ruido en general.

Se utilizará un filtro activo pasa bajas de primer orden con frecuencia de corte de 40 Hz, esta configuración con un resistor y un capacitor como el de la figura 4.4, tiene una práctica de 20 dB por década. La ganancia de voltaje abajo de la frecuencia de corte es constante igual a

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Mientras que la frecuencia de corte está dada por

$$f_{o,H} = \frac{1}{2\pi R_3 C_1}$$

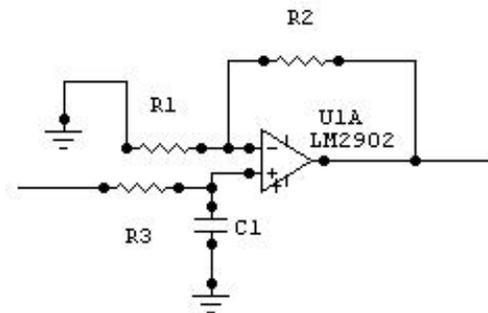


Figura 4.4 Filtro pasa bajas

Para la frecuencia de corte que queremos de 40 Hz se calcularán los valores de R_3 y C_1 , en este caso fijaremos el valor del capacitor a un valor comercial de 100 μF , entonces tenemos que, despejando R_3 ,

$$R_3 = \frac{1}{2\pi C_1 f}$$

$$R_3 = \frac{1}{2\pi C_1 f} = \frac{1}{2\pi(100 \times 10^{-6})40} = 39.8\Omega$$

Aproximándolo a un valor comercial se tiene que es 39 Ω .

Además, la ganancia que se quiere de este circuito es pequeña, casi cercana a uno por lo que los valores de las resistencias R_1 y R_2 serán de la siguiente manera:

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1} \approx 1$$

Si se acerca el valor a 1, por ejemplo 1.1 se tiene que

$$\frac{R_2}{R_1} = A_v - 1 = 1.1 - 1 = .1$$

Por lo tanto el valor de R_1 tiene que ser 10 veces mayor a R_2 , si fijamos el valor de R_2 en $10\text{k}\Omega$ se tiene que $R_1 = 100\text{k}\Omega$.

Con esto se eliminará el ruido que pueda producir la línea y algunas deformaciones que pueda tener la señal por el medio ambiente en el cual se va a colocar.

4.4 Transmisión

La parte del sensor y el actuador se encuentran a una distancia considerable de la tarjeta de adquisición de datos por lo que la señal se hará llegar por medio de un cable con configuración de lazo de corriente que alimentará la tarjeta en cada una de los carriles de cobre. La configuración de lazo de corriente nos permite realizar la transmisión de datos por varios metros a través de ambientes ruidosos.

4.4.1 Transmisión por lazo de corriente

Para transmitir señales de baja frecuencia y amplitud por varios cientos de metros en un ambiente con ruido, la corriente es preferida sobre el voltaje, porque la corriente se mantiene constante en cualquier instante sobre la longitud completa del cable. La transmisión por voltaje no es recomendada, porque el voltaje en cualquier punto depende de la resistencia y la capacitancia del cable que se ve afectada en cualquier punto de la longitud del cable. La transmisión por corriente también permita a un solo cable de dos pares llevar la potencia y la señal al mismo tiempo. Al final de la línea de transmisión, una

resistencia precisa de terminación convierte la corriente de lazo a un voltaje exacto. Esta resistencia (típicamente de 50Ω a 750Ω) establece la impedancia de entrada del receptor del lazo de corriente. Una alta impedancia de la fuente de señal reduce las variaciones del voltaje a través de la resistencia de terminación causada por variaciones en la resistencia de la línea, pero esto también recoge más interferencia electromagnética (EMI) y otras interferencias industriales. Los capacitores de gran valor configurados como by-pass reducen la recolección de EMI ayudando a bajar la impedancia de la fuente de señal.

En resumen, los lazos de corriente ofrecen cuatro ventajas principales:

- Transmisión a largas distancias sin la pérdida de amplitud
- Detección de sensores autónomos, líneas de transmisión rotas y otras fallas
- Cables baratos de 2 conductores
- Bajan la sensibilidad hacia la interferencia electromagnética

Existen en la industria diferentes dispositivos que nos permiten hacer la transmisión por lazo de corriente, reciben la señal en un rango de voltaje y hacen la conversión respectiva a corriente en un amplio rango, sin embargo el funcionamiento se basa principalmente en un amplificador operacional en configuración para convertir las variaciones de voltaje en su entrada positiva a variaciones de corriente en la salida, el esquema esencial se muestra en la figura 4.5.

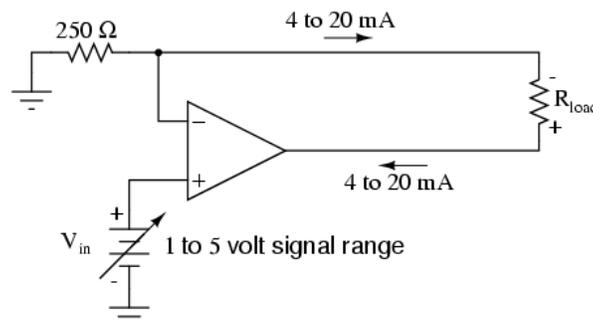


Figura 4.5 Configuración básica

Sin embargo, en este trabajo utilizamos una variante para que el rango de voltaje en la entrada pueda ser más grande, esto es, de 0 a 10 V que corresponde a la salida que obtenemos del puente de Wheatstone del transductor en la celda de deformación. Además

agregamos un transistor en la salida del amplificador operacional para que éste sea el que maneje la demanda de corriente, el esquema de la configuración se muestra en la figura 4.6.

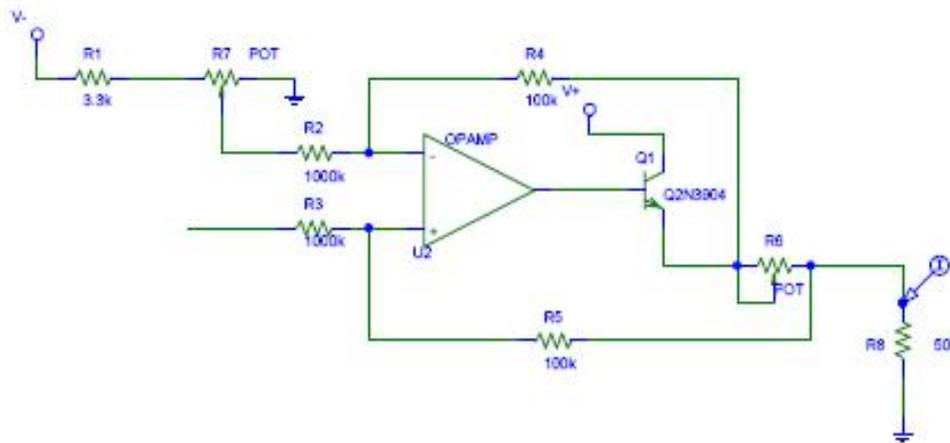


Figura 4.6 Configuración para conversión de voltaje a corriente

En este circuito el voltaje de entrada (V_{in}) menos el voltaje de referencia (V_{ref}) es igual a la corriente en la carga (I_L) que pasa por el potenciómetro R_6 , esto es:

$$V_{in} - V_{ref} = I_L R_6$$

Por lo tanto, la corriente en la carga es:

$$I_L = \frac{V_{in}}{R_6} - \frac{V_{ref}}{R_6}$$

El primer término es proporcional al voltaje de entrada (V_{in}) y el segundo término es una constante, donde (V_{ref}) está derivado desde el voltaje negativo de la fuente por medio del potenciómetro R_7 .

$$I_L = \frac{V_{in}}{R_6} + \frac{-V_{ref}}{R_6}$$

R_6 se selecciona para que el primer término nos proporcione 16 mA para el máximo voltaje de entrada ($V_{in} = 10V$) y el potenciómetro R_7 es ajustado para que el segundo término nos proporcione una corriente constante de 4 mA. Por lo que finalmente tenemos un rango de

salida de 4 hasta 20 mA que corresponden con el cero y los 10 V de la entrada de voltaje (V_{in}) respectivamente.

El valor en que quedará el potenciómetro, se calculará cuando el V_{in} sea el máximo (10 V), es:

$$R_6 = \frac{V_{in}}{I_L} = \frac{10V}{16mA} = 625\Omega$$

Mientras que el valor del voltaje de referencia, será calculado cuando el V_{in} sea el mínimo (0 V), que será ajustado con el potenciómetro R7 es:

$$V_{ref} = R_6 \cdot I_L = (625\Omega)(4mA) = 2.5V$$

Se utilizan los potenciómetros para poder hacer ajustes en sitio.

Esta configuración es dependiente de la fuente negativa de voltaje, por lo que cualquier falla en ella causaría error en las mediciones. Existen en el mercado circuitos integrados que ya realizan la conversión de voltaje a lazo de corriente solamente con algunos componentes adicionales que ayudan a configurarlos, los siguientes circuitos son algunos ejemplos.

XTR110: es un convertidor preciso de voltaje a corriente para la transmisión de señales análogas. Acepta entradas de 0 a 5 V ó 0 a 10 V y puede ser conectado a salidas de 4 a 20mA, 0 a 20 mA, 5 a 25 mA y muchos otros rangos usados comúnmente.

Una red precisa de resistencias en el chip proporciona el escalamiento de entrada y el ajuste de corriente. Un voltaje de referencia interno de 10V puede ser usado para manejar un circuito externo. El circuito XTR110 está disponible en empaque de plástico DIP de 16 pines, empaque de cerámica y empaque SOL-16 de montaje superficial. Además, de tener rangos de temperatura comercial e industrial.

AM462: es un convertidor preciso de bajo costo de voltaje a corriente para la transmisión de señales análogas. El AM462 está disponible en versiones de 2 ó 3 cables, que permite aplicaciones con flexibilidad en rangos de voltaje de entrada para ser usados en una salida de corriente estándar.

El rango de corriente en la salida y el nivel de compensación son libremente ajustables por resistencia externas. El circuito integrado consiste de 3 secciones básicas: un amplificador operacional en la etapa de entrada para señales de 0.5 a 4.5V, 0 a 10V u otras, una referencia programable en un rango de 4.5 a 10V para el transductor de excitación y una salida de corriente libremente ajustable en un amplio rango de 4 a 20mA, 0 a 20mA u otro valor. Con el amplio espectro de posibles señales de entrada el AM426 es un convertidor de voltaje a corriente multipropósito y flexible para transductores de terminación simple o transmisores de voltaje.

La transmisión se hará por medio de un cable multipar, de tal manera que se transmitirá la línea de corriente alterna de 127V de la caseta a la plataforma y la transmisión de los datos por medio de lazo de corriente desde la plataforma hasta la tarjeta de adquisición de datos. Por lo tanto, el cable será de por lo menos 4 líneas que soporten 127V. El esquema general de operación se muestra en la figura 4.7, como se puede ver junto a la plataforma se encuentra el circuito de acondicionamiento y en la caseta se encuentra la tarjeta de adquisición de datos.

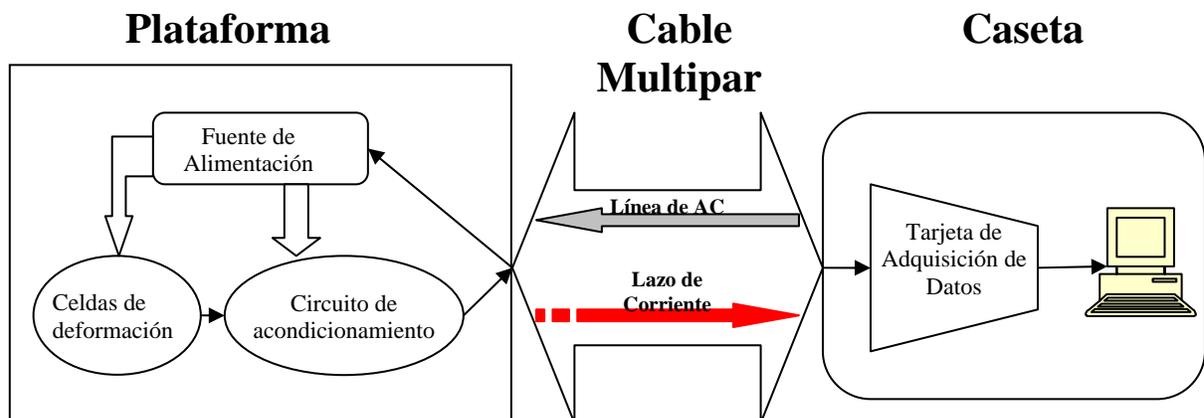


Figura 4.7 Esquema a bloques de instalación

El diagrama a bloques de la tarjeta de acondicionamiento se muestra a continuación en la figura 4.8, mientras que el diagrama de componentes se muestra en el apéndice A:

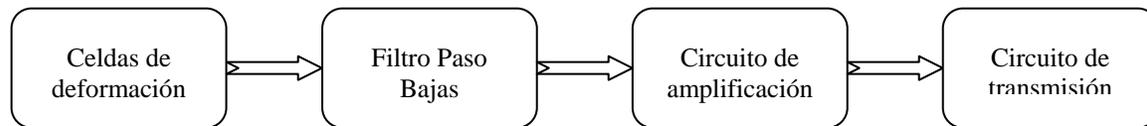


Figura 4.8 Esquema a bloques de circuito de acondicionamiento

5. Tarjeta de adquisición de datos

Los sistemas de adquisición de datos de señales son un tipo particular de sistema electrónico, es un conjunto de elementos o partes organizadas para realizar una función determinada.

El término adquisición de datos, o AD, describe el proceso que consiste en tomar datos de los sensores e introducirlos en una computadora para procesarlos. Se trata de una tablilla de circuito impreso que, para entradas analógicas, cuenta con circuitos para realizar funciones de multiplexión, amplificación, conversión analógica a digital, registro y control, a fin de alimentar las señales digitales muestreadas en el sistema de computación. En la figura se muestran los elementos básicos de estas tablillas.

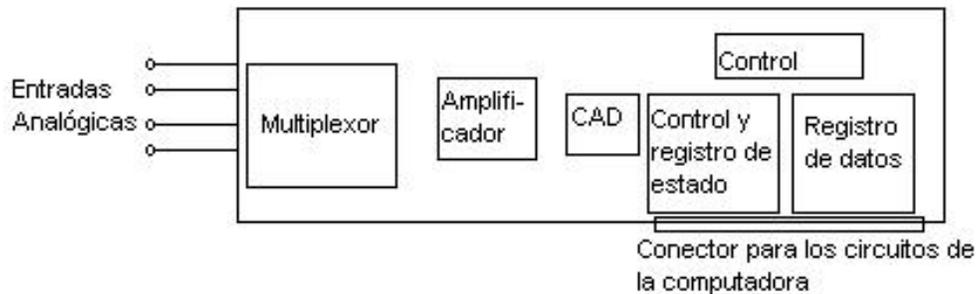


Figura 5.1 Elementos Básicos de la Tablilla de Adquisición de datos

En un sistema de adquisición de datos para medida y control, las entradas son en forma de variables físicas, eléctricas o no, y las salidas son en forma de variables físicas o de presentación visual o acústica. En los sistemas para tratamiento de datos y textos, en cambio, las entradas y salidas son directamente a través de equipos periféricos de ordenador (teclado, pantalla, impresora, entre otros...) no hay interacción con otras variables físicas más que las propias de interfaz con el usuario y se pueden realizar tareas diversas pues son programables por el usuario.

El diseño de un sistema de adquisición de datos implica considerar las partes que lo integran y sus tareas respectivas. En algunas ocasiones el coste estimado de un sistema electrónico de medida con complejidad media es: circuitos electrónicos, 35-15%; de

software 45-55%; cableado y conectores 15-20%; y mantenimiento 5-10%. La preponderancia del software es común a otros campos de las tecnologías de la información. Es conveniente recordar que para lograr un software de calidad son muy importantes la estructuración, la documentación y el mantenimiento.

La arquitectura o estructura de un sistema se refiere a la organización de sus partes. Para estudiarla se representa el sistema mediante un modelo que describe la función de cada una de sus partes y las interrelaciones entre ellas. Dicha descripción admite distintas opciones; puede ser meramente verbal, gráfica, matemática, física o una combinación de ellas.

En un sistema de medida, como el de este trabajo, hay que adquirir la información (en forma de señales analógicas o digitales) procesarla y presentarla. A veces, además, hay que registrarla. Esto requiere la generación de tensiones de salidas analógicas y digitales, y el control de la potencia a aplicar.

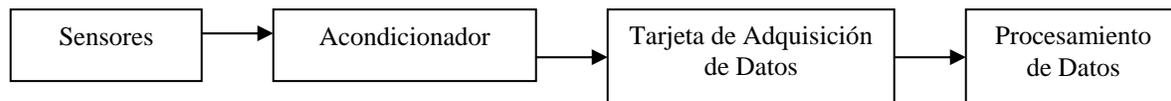


Figura 5.2 Diagrama a Bloques de los Elementos Básicos de la Tablilla

El primer elemento de un sistema de adquisición de datos es el que mide la magnitud de interés. Ésta puede ser mecánica, térmica, eléctrica, magnética, óptica o química. Salvo en el caso de que las magnitudes a controlar sean todas eléctricas (por ejemplo, en una fuente de alimentación) el elemento de medida es un transductor (de entrada) que convierte energía de una forma física en otra forma distinta; en nuestro caso se convertirá la energía mecánica de la deformación provocada en un cuerpo por la presión a niveles de tensión (energía eléctrica). Un transductor se denomina también un sensor por la capacidad que ofrece de percibir, tras el procesamiento oportuno, fenómenos que de otra forma serían inaccesibles a nuestros sentidos.

La cantidad de energía convertida por un transductor es pequeña, de manera que la salida hay que acondicionarla para adaptarla a las etapas siguientes. Si la cantidad de energía

convertida y, por lo tanto extraída del proceso, fuera grande, se podría llegar a perturbar el funcionamiento del proceso de una forma no deseada.

El software de la computadora controla los datos de adquisición a través de la tablilla de AD. Cuando el programa requiere la entrada de un sensor en particular, activa la tablilla mediante el envío de una palabra de control al registro de control y de estatus. En esta palabra se especifica el tipo de operación que la tablilla debe realizar. Ésta conmuta al multiplexor con el canal de entrada respectivo. La entrada del sensor conectada al canal de entrada en cuestión pasa por un amplificador y llega al convertidor analógico a digital. Después de la conversión, la señal digital obtenida pasa al registro de datos y la palabra que se encuentra en el registro de control y estado se modifica para iniciar la llegada de la señal. A continuación la computadora envía una señal para que los datos sean leídos e introducidos en la computadora para su procesamiento. Esta señal es necesaria para asegurar que la computadora no estará en espera sin hacer nada, en tanto la tablilla realiza su adquisición de datos y aprovecha para indicar a la computadora en qué momento concluye una adquisición; la computadora procede a interrumpir los programas que esté implantando, lee los datos de AD y continúa con sus programas.

5.1 Características principales de una Tarjeta de Adquisición de Datos

Entre las especificaciones de una Tarjeta de Adquisición de Datos (TAD) figura la velocidad de muestreo de las entradas analógicas, que está dado por muestras por segundos (kS/s), cantidad de entradas y salidas analógicas, temporizadores, contadores que se utilizan como disparadores del sistema sensor, entradas digitales y salidas digitales.

5.1.1 Entradas Analógicas

Las especificaciones de una entrada analógica pueden dar información de la capacidad y exactitud de la tarjeta. Las especificaciones básicas, que son las más comunes en todas las tarjetas de AD son: el número de entradas analógicas, rango de muestreo, resolución y el rango de entrada. El número de entradas analógicas será especificado para entradas tanto

sencillas como diferenciales, las entradas sencillas significa que todos los valores estarán referenciados a la tierra común. Esta configuración se utiliza normalmente cuando la señal de entrada tiene valores altos mayores a 1V, la toma de la lectura no excede los 5 metros y todas las señales de entrada están referenciadas a una tierra común. Si la señal no cumple con los criterios anteriores se deberá utilizar la entrada diferencial. Con las entradas en modo diferencial, cada entrada tiene su propia referencia a tierra, el error producido por el ruido es reducido porque en modo común el ruido es el mismo en las dos puntas de medición por lo que se cancela.

Rango de Muestreo. Este parámetro determina cuantas conversiones pueden tomarse en un determinado tiempo. Un rango de muestreo más rápido adquiere más puntos en un tiempo dado y por lo tanto a menudo puede formar una mejor representación de la señal original.

Multiplexeo. Una técnica común para mediciones en varias señales con un solo convertidor analógico digital (CAD) es el multiplexeo. El CAD toma la muestra de un canal, selecciona el siguiente canal, toma la muestra y vuelve a cambiar al siguiente canal, así sucesivamente, por lo que la velocidad de muestreo para cada canal es inversamente proporcional al número de canales muestreados.

$$\frac{\text{Velocidad_muestreo}(S/s)}{\#canales} = \text{velocidad_de_muestreo_por_canal}$$

Resolución. Es el número de bits que el CAD usa para representar la señal analógica. Entre más grande es la resolución más grande es el número de divisiones que se pueden hacer a la señal de entrada por lo que se puede detectar un cambio más pequeño de voltaje. La figura muestra una señal senoidal y su imagen digital correspondiente al adquirirse con un DAC ideal de 3 bits. Con un convertidor de 3 bits el número de divisiones de la señal analógica es 2^3 , esto es 8 divisiones.

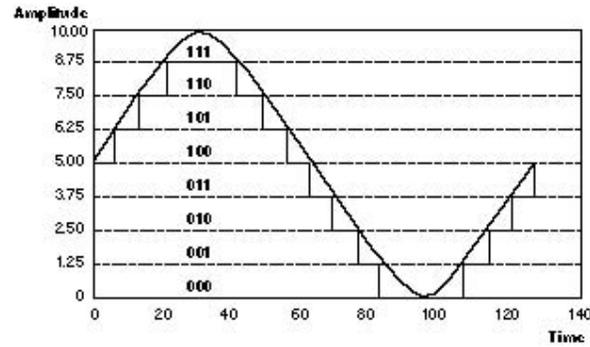


Figura 5.3 Onda senoidal digitalizada con resolución de 3 bits

Generalizando, para conocer la resolución de cualquier tarjeta tenemos:

$$\text{Resolución} = 2^n; \text{ donde } n \text{ representa el número de bits}$$

Rango. El rango se refiere al valor de voltaje máximo y mínimo que el CAD puede cuantificar. Las tarjetas de adquisición de datos ofrecen una amplia selección de rangos que permiten configurar la tarjeta para diferentes niveles de voltajes, esta flexibilidad permite asignar el rango exacto para aprovechar las ventajas de la resolución posible para medir con exactitud la señal. El rango, la resolución y la ganancia disponible en la tarjeta de adquisición de datos determinan el nivel más pequeño de voltaje que se puede detectar.

Este cambio del voltaje representa el bit menos significativo (LSB) del valor digital, y a menudo se llama a la amplitud del código. La amplitud del código ideal es encontrada dividiendo el rango de voltaje entre la ganancia por la resolución, esto es

$$Ideal = \frac{Rango}{Ganancia \times Resolución}$$

Para una evaluación completa de las tarjetas de adquisición de datos también se deben considerar el DNL, la exactitud relativa, el tiempo de selección del amplificador de instrumentación, y el ruido, porque no se saben las consideraciones acerca de la tarjeta de adquisición de datos para no dañar algunas mediciones.

Idealmente, si se incrementa el nivel de voltaje aplicado a la tarjeta, el código digital del CAD deberá incrementarse linealmente. Si se dibuja el voltaje contra la salida del código digital de un CAD ideal, la gráfica será una línea recta. Las desviaciones con respecto a la

línea del conversor ideal no son lineales. DNL es una medición en el bit menos significativo (LSB) de la desviación del error del código digital con respecto al valor de 1 bit LSB. Una tarjeta de adquisición de datos ideal tiene un valor de DNL de 0 LSB. Prácticamente, una buena tarjeta de adquisición de datos tendrá un valor de DNL de ± 0.5 LSB. Una tarjeta con un funcionamiento pobre podrá tener una amplitud de código digital igual o muy cercana a cero, que indica un código que falla. Cueste lo que cueste el voltaje que usted introduce a la tarjeta de AD con un código que falla, la tarjeta nunca cuantificará el voltaje al valor representado por este código. A veces el DNL es especificado declarando que una tarjeta de DAQ no tiene pierdes códigos, que quieren decir que el DNL definido por debajo de 1 LSB, pero no hace ningún dato específico sobre las fronteras superiores.

Exactitud relativa. Ésta es una medición en los bits menos significativos de la desviación de los casos de error contra el caso ideal de una tarjeta de adquisición de datos, una línea recta. El software de la tarjeta de AD convertirá el valor del código binario del CAD a un voltaje multiplicado por una constante. Una buena exactitud relativa es importante para una tarjeta de AD porque esto asegura que la conversión es exacta. La obtención de una buena exactitud relativa requiere que tanto el DAC como el circuito análogo periférico sean diseñados correctamente.

Tiempo de establecimiento. Sobre una conexión típica de una tarjeta de AD, una señal analógica es seleccionada primero por un multiplexor y luego amplificada por un amplificador de instrumentación antes de ser convertida a una señal digital por el CAD. El tiempo requerido por el amplificador de instrumentación para establecerse en una exactitud especificada es llamado tiempo de establecimiento. Un tiempo de establecimiento pobre es un problema principal porque la cantidad de inexactitud por lo general varía con la ganancia y el rango de muestreo. Como los errores ocurren en las etapas análogas de la tarjeta de adquisición de datos, la tarjeta no puede devolver un mensaje de error a la computadora cuando el amplificador de instrumentación no se establece.

El amplificador de instrumentación es el más probable de no ser estable cuando se hace el muestreo de varios canales en altas ganancias y altos rangos. Bajo estas condiciones, el

amplificador de instrumentación tiene la dificultad de registrar las diferencias de voltaje grandes que pueden ocurrir en los interruptores del multiplexor entre señales de entrada.

Ruido. Cualquier señal no deseada que aparece en la señal digitalizada de la tarjeta de AD es el ruido. Como la computadora es un ambiente digital ruidoso, adquirir datos sobre un conector en la tarjeta su ubicación sobre la tarjeta es seleccionada muy cuidadosamente por diseñadores expertos análogos.

5.1.2 Salidas Analógicas

Se requiere un circuito de salida analógica para proporcionar un estímulo a la TAD. Algunos datos específicos para el convertidor digital analógico (CDA) determinan la calidad de la señal de salida que se produce, esto datos son: tiempo de establecimiento, rango de barrido y resolución.

El tiempo de establecimiento y el rango de barrido trabajan juntos para determinar la velocidad a la que el CDA puede cambiar el nivel de voltaje de salida. El tiempo de establecimiento es el tiempo que la salida requiere para proporcionar la exactitud especificada. El tiempo de establecimiento es normalmente especificado para un cambio de voltaje en escala completa. El rango de barrido es el rango máximo de cambio que el CDA puede producir sobre la señal de salida. Por lo tanto, un CDA con un pequeño tiempo de establecimiento y un rango de barrido alto puede generar señales de alta frecuencia, porque es necesario poco tiempo para cambiar con exactitud la salida a un nuevo nivel de voltaje.

La resolución de salida es similar a la resolución de entrada. Ésta es el número de bits en el código digital que generan la salida analógica. Un gran número de bits reduce la magnitud de cada incremento del voltaje, esto hace posible generar cambios suaves de la señal. Las aplicaciones que requieran un amplio margen dinámico con pequeños cambios de voltaje en la señal de salida analógica pueden necesitar salidas de voltaje de alta resolución

5.1.3 Disparadores

Algunas aplicaciones necesitan iniciar o detener una operación en la tarjeta con base en un evento externo. Los disparadores digitales sincronizan la adquisición y la generación de voltajes con un pulso digital externo. Los disparadores analógicos, usados principalmente en operaciones analógicas, comienzan o detienen la operación de la tarjeta de AD cuando una señal de entrada alcanza un nivel de voltaje especificado análogo y la polaridad de la pendiente.

5.1.4 Entradas y Salidas Digitales

Las interfaces de entrada y salida digitales a menudo son utilizadas en los sistemas de adquisición de datos para controlar procesos, generar modelos de pruebas y comunicación con equipo periférico. En cada caso, los parámetros importantes incluyen el número de líneas digitales disponibles. Si la línea digital es utilizada para controlar eventos como encendido o apagado de calentadores, motores o luces, por lo que no se necesita una respuesta rápida. El número de líneas digitales, por supuesto, necesita coincidir con el número de procesos que se controlarán. En cada uno de estos ejemplos. La cantidad de corriente que se requiere para manipular el dispositivo debe ser menor que la disponible por la salida de la tarjeta de adquisición de datos. Con la señal digital apropiada para acondicionar accesorios, también se puede utilizar la pequeña corriente de las señales TTL para o desde la tarjeta de adquisición de datos para monitorear o controlar señales de altos voltajes y corrientes de dispositivos industriales.

Una aplicación común es para transferir datos entre la computadora y equipos como un registrador de datos, un procesador de datos o impresoras. Porque normalmente los equipos transfieren datos en la mínima expresión de Byte (8 bits), las líneas digitales de la tarjeta se tienen que organizar en grupos de 8. Adicionalmente, algunas tarjetas con capacidades digitales podrían tener circuitos exclusivos para comunicación. El número de canales, velocidad de datos y manipulación de dispositivos son las capacidades más importantes que deberían de coincidir y revisarse con la aplicación.

5.1.5 Temporizadores de entrada y salida

Los circuitos contadores/temporizadores son utilizados para muchas aplicaciones, incluyendo para contar la frecuencia con que ocurre un evento digital, la duración de un pulso digital y la generación de señales cuadradas y pulsos.

Los datos específicos más significativos para la operación de un contador/temporizador son la resolución y la frecuencia del reloj. La resolución es el número de bits que el contador utiliza. Una resolución más alta simplemente quiere decir que el contador puede contar más alto. La frecuencia de reloj determina que tan rápido puede variarse la entrada digital de la fuente. Con la frecuencia más alta, el contador incrementa más rápido y por lo tanto puede descubrir señales de frecuencia más altas sobre la entrada y generar pulsos de frecuencia más altos y ondas cuadradas sobre la salida.

Otras funciones especiales incluyen la generación de un tren de pulsos, el tiempo de distribución para el muestreo de tiempo equivalente, el tiempo relativo caracterizado y el cambio instantáneo del rango de muestreo.

5.2 Selección de la tarjeta de adquisición de datos

La tarjeta de adquisición de datos se escogerá por la cantidad máxima de valores que tomaremos en cada unidad de cobro, esto es, la cantidad de básculas necesarias, en estos casos se tomarán en cuenta las casetas que intercomunican a la ciudad de México y se sacará un estimado de valores a tomar.

Con la ayuda de las fotografías satelitales que presenta el programa Google Earth podemos ver en cada carretera la cantidad de casetas de cobro y resumirlas en la tabla 1.

Tabla 5.1 Casetas de cobro en la ciudad de México

Carretera	Número de casetas de cobro	Casetas intercambiables	Casetas con medición		
			Sencilla	Doble	Total
Querétaro	16	9	7	9	25
Puebla	15	6	9	6	21
Cuernavaca	14	5	9	5	19
Toluca	10	4	6	4	14
Pachuca	8	4	4	4	12



Figura 5.4 Autopista México-Querétaro



Figura 5.5 Autopista México-Puebla



Figura 5.6 Autopista México-Cuernavaca



Figura 5.7 Autopista México-Toluca



Figura 5.8 Autopista México-Pachuca

Ahora bien, dependiendo de las características de cada autopista y la cantidad de casetas, tenemos las siguientes opciones de tarjetas de adquisición de datos que nos proporciona la marca National Instruments.

Tabla 5.2 Tarjetas de Adquisición de datos de la compañía National Instruments

Modelo	Marca	Bus	Entradas Analógicas	Resolución del Convertidor	Velocidad de Muestreo	Voltaje Máximo de Entrada	Impedancia	Salidas Digitales	Costo (Dls.)
USB-6218	NI	USB	32	16 bits	250 kS/s	±10.0 V	>10GΩ	8 TTL	1,210
USB-6211	NI	USB	16	16 bits	250 kS/s	±10.0 V	>10GΩ	4 TTL	770
USB-6215	NI	USB	16	16 bits	250 kS/s	±10.0 V	>10GΩ	4 TTL	990
USB-6008	NI	USB	8	12 bits	10 kS/s	±10.0 V	>10GΩ	12 TTL	175
USB-6009	NI	USB	8	14 bits	48 kS/s	±10.0 V	>10GΩ	12 TTL	295
USB-6210	NI	USB	16	16 bits	250 kS/S	±10.0 V	>10GΩ	4 TTL	550
PCI-6010	NI	PCI	16	16 bits	200 kS/s	±10.0 V	>10GΩ	4 TTL	395
PCI-6220	NI	PCI	16	16 bits	250 kS/s	±10.0 V	>10GΩ	24 TTL	440
PCI-6221	NI	PCI	16	16 bits	250 kS/s	±10.0 V	>10GΩ	24 TTL	550
PCI-6224	NI	PCI	32	16 bits	250 kS/s	±10.0 V	>10GΩ	48 TTL	660
PCI-6229	NI	PCI	32	16 bits	250 kS/s	±10.0 V	>10GΩ	48 TTL	825
PCI-6225	NI	PCI	80	16 bits	250 kS/s	±10.0 V	>10GΩ	24 TTL	1,210

El esquema que operaría en las casetas de cobro sería como se muestra en el siguiente esquema:

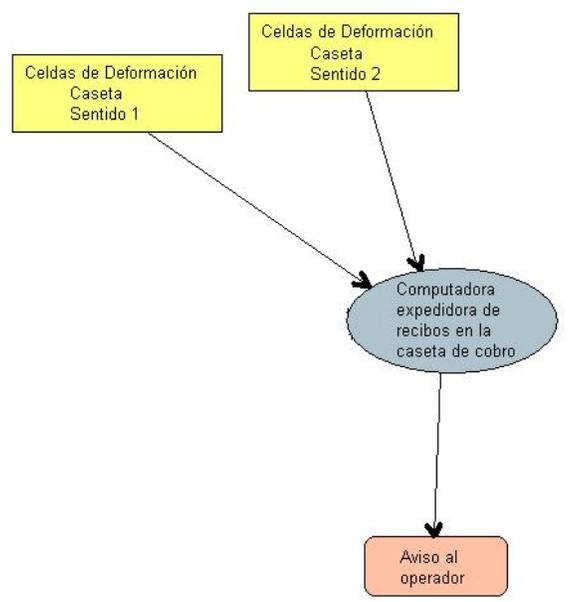


Figura 5.9 Esquema general de operación

Como se puede ver, todas las plataformas de una caseta irían a la computadora que estará en la caseta del operador que será la encargada de ejecutar el programa y guardar un registro del peso de las diferentes casetas, a su vez, cuando detecte alguna anomalía será la que dé aviso sonoro al operador, En la pantalla de la computadora le dará el peso del vehículo, así como también podría calcular alguna cuota. Para el aviso sonoro se habilitará con una salida digital de la tarjeta.

Por el costo y para el desarrollo de este proyecto se eligió la tarjeta USB-6008, que nos puede dar gran cantidad de muestras por segundo; sin embargo, no tiene la capacidad para operar más de dos casetas al mismo tiempo, por lo que solo se desarrollará el programa para realizarla en una sola caseta.

5.3 Tarjeta de Adquisición USB-6008

La tarjeta USB-6008 de National Instruments (NI-USB-6008) proporciona una funcionalidad básica en adquisición de datos para aplicaciones de captura de datos, mediciones portátiles y experimentos estudiantiles en laboratorio. Es económico para el empleo estudiantil, pero bastante poderoso para mediciones de aplicaciones más sofisticadas. Podrá utilizar el NI USB-6008 con el programa incluido y rápidamente estará listo para empezar la captura de datos en minutos, o bien, usar el programa Labview o lenguaje C y los servicios NI-DAQMX para un sistema de captura de mediciones a la medida.

Las principales características de esta tarjeta son:

Entrada Analógica

Tipo de Convertidor.....	Aproximaciones Sucesivas
Entrada Análogas.....	8 sencillas, 4 diferenciales, seleccionables por software
Resolución de entrada.....	12 bits en modo diferencial, 11 bits en modo sencillo
Rango máximo de muestras (conjunto).....	10 kS/s
Tamaño del buffer FIFO.....	512 bytes
Tiempo sincronización.....	41.67 ns(24 MHz tiempo base)
Exactitud.....	100 ppm del rango actual de la muestra

Rango de entrada

Terminación sencilla.....	±10 V
Diferencial.....	±20 V1, ±10 V, ±5 V, ±4 V, ±2.5 V, ±2 V, ±1.25 V, ±1 V
Voltaje de trabajo.....	±10 V
Impedancia de entrada.....	144 kΩ
Protección de sobrevoltaje.....	±35V
Fuente de disparo.....	Software o disparador digital externo

Ruido en el sistema

Modo de Terminación sencilla	
Rango ±10 V.....	5 mVrms
Modo diferencial	
Rango ±20 V.....	5 mVrms
Rango ±1 V.....	0.5 mVrms

Exactitud absoluta en escala completa, modo terminación sencilla

Rango	Valor típico a 25 °C (mV)	Valor Máximo (0 a 55 °C) (mV)
± 20	14.7	138

Exactitud Absoluta en escala completa, modo diferencial

Rango	Valor típico a 25 °C (mV)	Valor Máximo (0 a 55 °C) (mV)
± 20	14.7	138
± 10	7.73	84.8
± 5	4.28	58.4
± 4	3.59	53.1
± 2.5	2.56	45.1
± 2	2.21	42.5
± 1.25	1.70	38.9
± 1	1.53	37.5

Salida Análoga

Salidas Análogas.....	2
Resolución de la salida.....	12 bits
Rango máximo de actualización.....	150 Hz, tiempo de software
Rango de salida.....	0 a +5 V
Impedancia de salida.....	50 Ω
Corriente de Salida.....	5 mA
Estado al encendido.....	0 V
Rango de barrido.....	1 V/μs
Corriente de cortocircuito.....	50 mA
Exactitud absoluta (sin carga).....	típico 7 mV, valor máximo a escala completa 36.4mV

Entradas/Salidas Digitales

P0.<0..7>.....	8 líneas
P1.<0..3>.....	4 líneas
Control de dirección.....	Cada canal es programado inividualmente como salida o entrada
Tipo de salida.....	Colector abierto (open- drain)
Compatibilidad.....	TTL, LVTTTL, CMOS
Rango absoluto máximo.....	-0.5 to 5.8 V con respecto a GND
Resistencia Pull-up	4.7 kΩ to 5 V
Estado al encendido.....	Entrada

Niveles Lógicos

Nivel	Min	Max	Unidad
Voltaje de entrada bajo	-0.3	0.8	V
Voltaje de entrada alto	2.0	5.8	V
Corriente de escape de entrada	-	50	μ A
Voltaje de salida bajo (I = 8.5 mA)	-	0.8	V
Voltaje de salida alto			
Terminal Activa (push-pull), I = -8.5 mA	2.0	3.5	V
Colector abierto (open-drain), I = -0.6 mA, nominal	2.0	5.0	V
Colector abierto (open-drain), I = -8.5mA, con Resistencia externa en Pull-up	2.0	-	V

Voltaje Externo

Salida +5 V (máximo 200 mA).....Típico +5 V,
Mínimo +4.85 V
Salida +2.5 V (máximo 1 mA).....Típico +2.5 V
Exactitud +2.5 V.....0.25% max

Tendencia de la temperatura de referencia.....50 ppm/°C max

Contador

Número de contadores.....1
Resolución.....32 bits
Mediciones del contador.....Borde para contar (borde de caída)
Dirección de conteo.....Incremental
Resistencia en Pull-up.....4.7 k Ω para 5 V
Maxima Frecuencia de Entrada.....5 MHz
Ancho de pulso alto mínimo.....100 ns
Ancho de pulso alto máximo..... 100 ns
Voltaje alto de entrada..... 2.0 V
Voltaje bajo de entrada..... 0.8 V

Bus de Interfase

Especificación USB..... USB 2.0
Velocidad del bus USB.....12 Mb/s

Requerimientos de alimentación

USB
De 4.10 a 5.25 VDC..... Típica 80mA, Máx 500 mA

5.4 Muestreo

El muestreo es un proceso lineal mediante el que se transforma una señal continua en el tiempo y de banda limitada, en una sucesión (continua) de valores de amplitud en instantes discretos, que constituyen la denominada señal de muestreada o serie temporal. Esta transformación se puede hacer de distintas formas, pero lo más habitual es que la señal muestreada esté formada por los valores de la señal original en instantes de tiempo equiespaciados. Se habla entonces de muestreo uniforme.

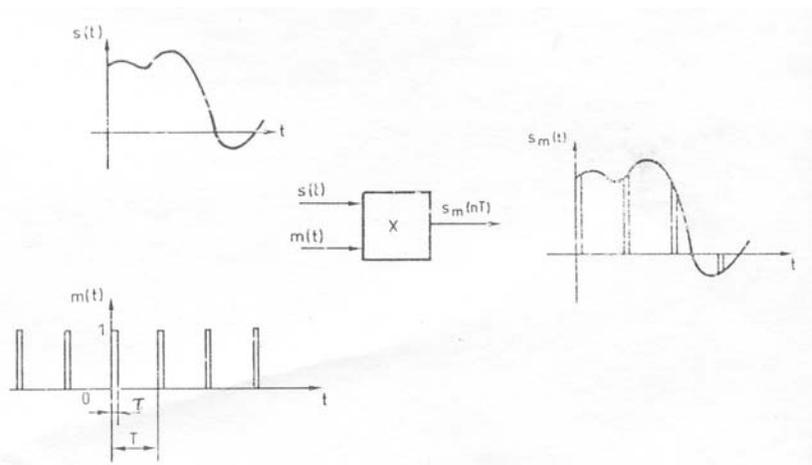


Figura 5.10 Modelo gráfico para el proceso de muestreo

La figura 5.10 es un modelo gráfico del muestreo uniforme, cuando se considera que la señal muestreadora, $m(t)$, es un tren de impulsos de amplitud unidad y duración finita τ (de aquí la denominación de muestreo natural), separados un tiempo T , que se denomina periodo de muestreo. La señal a muestrear $s(t)$ se supone que es de banda limitada, con máxima componente frecuencial f_m y mínima 0 (o $-f_m$ en su descripción mediante un análisis de Fourier). La señal muestreada, $s_m(nT)$ (n entero), es un tren de impulsos modulados en amplitud, y puede interpretarse como el producto de la señal de entrada por la muestreadora.

$$s_m(nT) = s(t)m(t)$$

5.4.1 Teorema del Muestreo

También conocido como teorema de muestreo de Nyquist- Shannon, criterio de Nyquist o teorema de Nyquist, es un teorema fundamental de la teoría de la información, de especial interés en las telecomunicaciones.

Si una señal continua, $S(t)$, tiene una banda de frecuencia tal que f_m sea la mayor frecuencia comprendida dentro de dicha banda, dicha señal podrá reconstruirse sin distorsión a partir de muestras de la señal tomadas a una frecuencia f_s siendo $f_s > 2 f_m$.

En la figura 5.11 se muestra un esquema simplificado del proceso de muestreo.

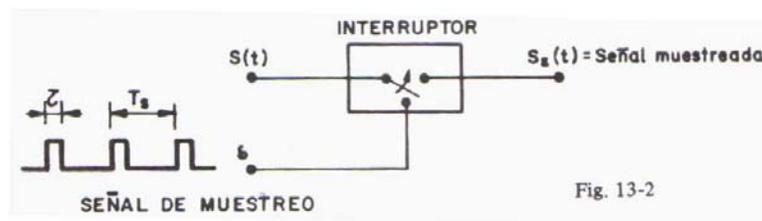


Figura 5.11 Esquema simplificado de muestreo

El interruptor no es del tipo mecánico, puesto que por lo general f_s es de bastante valor.

Las muestras por segundo que vamos a obtener dadas las características del vehículo y la velocidad máxima a la que va a poder circular (30 km/h) sumado a que la plataforma tiene un área de 3 m de largo por 1 m de ancho.

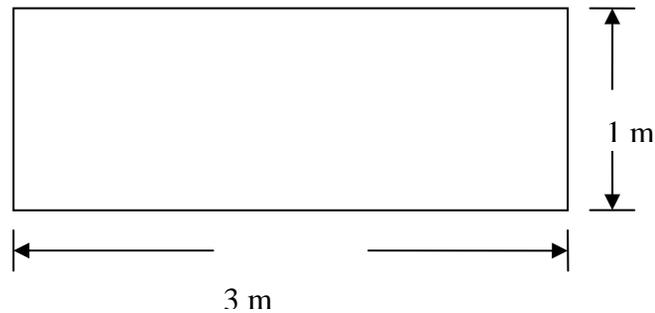


Figura 5.12 Esquema de las dimensiones de la plataforma

Si convertimos la velocidad máxima en m/s, tenemos que:

$$30 \frac{km}{h} = 30 \left(\frac{(1000m)(km)}{1km} \right) \left(\frac{1h}{(3600s)(h)} \right) = 8.333 \frac{m}{s}$$

Por lo que el tiempo que va a estar un vehículo sobre la plataforma es:

$$8.33 \frac{m}{s} = \frac{1m}{8.33 \frac{m}{s}} = 0.120s = 120ms$$

La cantidad de muestras mínimas que se necesitan para tomar al menos una muestra en el momento en que el vehículo pasa por encima de la rampa son:

$$\frac{1muestra}{120ms} = \frac{1}{120 \times 10^{-3}s} = 0.00833 \times 10^3 \frac{1}{s} = 8.33Hz$$

Esta frecuencia corresponde a la frecuencia total del evento, donde un evento es cuando un eje del vehículo pasa por la plataforma, suponemos que el comportamiento ideal de este fenómeno es como el que se muestra en la figura 5.13a, esto es, se descartan las oscilaciones que presentará la magnitud de voltaje en el sensor debido al impacto que sufra la plataforma con las llantas del vehículo, además, dependiendo del peso del vehículo y la velocidad con la éste entre en la rampa podrá tener variaciones en cuanto a la duración

(amplitud en tiempo) y su magnitud (diferencia de voltaje) como se muestra en la figura 5.13b.

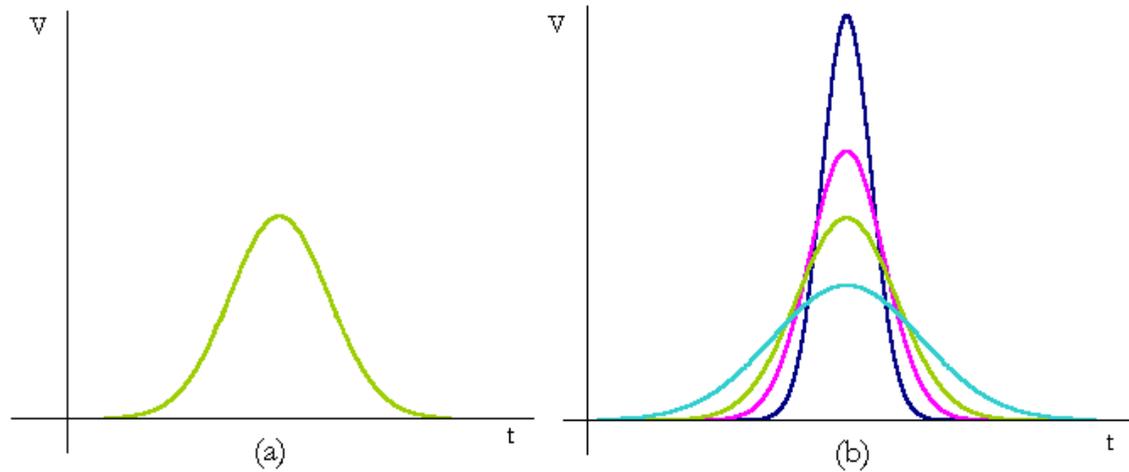


Figura 5.13 (a) Señal ideal del evento (b) Variaciones posibles de la señal ideal

Con el teorema del muestreo de Nyquist mínimo se necesita un muestro de aproximadamente 16.66 Hz, o mejor dicho, 17 muestras por segundo para tener la reconstrucción de la señal, sin embargo, como no es una señal periódica y tampoco regular en duración, se realizará un muestreo de 1000 muestras por segundo, esto es, 1 muestra cada milisegundo y en los casos límite se podrá obtener 120 muestras de la señal que darán una mejor aproximación al comportamiento de la señal y tener las muestra necesarias para hacer el tratamiento de los datos.

6. Programa de captura y evaluación de datos

Actualmente, muchos ingenieros y científicos están empleando las computadoras personales (PC) con puertos ISA, EISA, PCI, PCMCIA, Macintosh NuBus, paralelo o serial para la adquisición de datos en los laboratorios de investigación, pruebas y mediciones, y la automatización industrial. Algunas aplicaciones utilizan tarjetas del tipo plug-in para adquirir datos y transferirlos directamente a la memoria de la computadora. Otros utilizan hardware para adquisición de datos de forma remota desde la computadora personal y se acoplan por medio del puerto paralelo o serial. La obtención de resultados apropiados de un sistema a base de PC y tarjeta de adquisición de datos (TAD) depende de los siguientes elementos, que se muestran en la figura 6.1, computadora personal, transductores, acondicionador de señal, hardware de adquisición de datos y software.

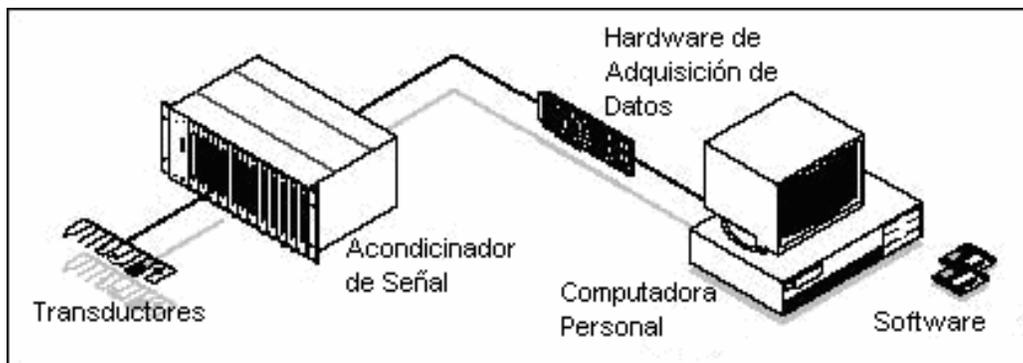


Figura 6.1 Sistema típico de adquisición de datos basado en PC

La computadora usada como sistema para la adquisición de datos puede afectar drásticamente las velocidades máximas de la adquisición de datos de manera continua. Hoy en día existen diferentes puertos para la conexión de la tarjeta de adquisición de datos y la computadora, las principales diferencias se centran en la velocidad de comunicación y la portabilidad, algunos puertos utilizados son ISA/EISA, PCMCIA, PCI, Serial, Paralelo y actualmente el USB.

La capacidad de la transferencia de datos de la computadora podrá afectar significativamente el funcionamiento del sistema de adquisición de datos. Todas las PC

pueden programar las entradas/salidas y las interrupciones. Los direccionamiento directos de memoria (DMA), no disponibles en todas las computadoras, incrementan el rendimiento del sistema porque utilizan hardware dedicado para transferir datos directamente a la memoria del sistema. Utilizando este método, el procesador no es cargado con datos móviles y se encuentra libre para realizar tareas de procesamiento más complejas. Para aprovechar los beneficios de las interrupciones o los DMA, la tarjeta de adquisición de datos que se escoja debe ser capaz de realizar este tipo de transferencias.

El factor restrictivo para adquirir grandes cantidades de datos es regularmente el disco duro. El tiempo de acceso y la fragmentación del disco duro pueden reducir considerablemente la tarifa máxima en la cual los datos pueden ser adquiridos y colocados en disco. Para los sistemas que tienen que adquirir señales de alta frecuencia, se deberá seleccionar un disco duro de alta velocidad para el ordenador personal y asegurarse que exista bastante espacio de disco contiguo libre (sin fragmentar) para guardar los datos. Las aplicaciones que requieren el tratamiento inmediato de señales de alta frecuencia necesitan un procesador de alta velocidad o un procesador plug-in dedicado como una tarjeta de procesador de señal digital (DSP). Si la aplicación solo adquiere y hace lectura un par de veces por segundo, un ordenador personal de bajo perfil puede ser satisfactorio.

También se debe considerar cual sistema operativo y qué plataforma de ordenador ofrecerán el mayor rendimiento de la inversión de largo plazo y será capaz de cumplir sus objetivos de corto plazo. Los factores que pueden influir en la elección pueden incluir la experiencia y las necesidades tanto del desarrollador como del usuario final.

6.1 Controlador de dispositivo (driver)

El software transforma a la PC y la tarjeta de adquisición de datos en un sistema completo de adquisición de datos, análisis y sistema de demostración. La TAD sin el controlador es inútil o con un controlador pobre es casi inútil. La mayoría de aplicaciones de la TAD utilizan el controlador. El controlador es la capa de software que programa directamente los registros de la TAD, administrando su operación y su integración con los recursos de la computadora, como las interrupciones del procesador, los DMA y la memoria. El controlador oculta los detalles de bajo nivel que son detalles complicados de programación del hardware, proveyendo al usuario de una interfaz comprensible.

Las funciones que desempeña el controlador pueden ser agrupadas en: entradas/salidas analógicas, entradas/salidas digitales y temporizadores de entrada/salida. Aunque la mayoría de los controladores tengan estas funcionalidades básicas, siempre se querrá que pueda hacer más que una simple adquisición de datos y un generador de señales, por lo se deberá tener la certeza de que tiene las siguientes funciones:

- Adquisición de datos en un rango específico de muestreo
- Adquisición de datos mientras el procesador realiza otras operaciones.
- Entradas/Salidas programadas, interrupciones y transferencias de datos DMA
- Transferir datos desde y hacia el disco duro
- Capacidad para realizar varias funciones simultáneas
- Integración perfecta con la señal de comunicación del equipo

Además habrá que considerar que sea compatible con el sistema operativo que se planea ocupar a corto y largo plazo. El controlador debe estar diseñado para capitalizar las diferentes características y capacidades del sistema operativo. Se podrá tener la flexibilidad de migrar fácilmente entre diferentes plataformas, por ejemplo, Windows PC, Machintosh, Sun SPARC; Linux, Unix, etc. Con la tarjeta USB-6008 de National Instruments se puede trabajar o migrar entre cada uno de los diferentes sistemas operativos sin realizar, o con pequeños, cambios en el código de la aplicación.

También habrá que considerar que la tarjeta y el controlador puedan ser utilizados desde nuestro lenguaje de programación favorito, como Visual Basic, Visual C, C++, etc., de tal manera que no tenga limitaciones de desarrollo.

Para desarrollar un Sistema de Adquisición de Datos (SAD) de alta calidad para medir o controlar, se deben de entender cada uno de los componentes implicados. De todos los componentes del SAD, el elemento que debería ser examinado más estrictamente es el software. Como la tarjeta de adquisición de datos no tiene un indicador, el software es la única interfaz que se tiene al sistema, por lo que es el componente que retransmite toda la información sobre el sistema, y este es el elemento que controla el sistema. El software integra los transductores, el acondicionamiento de señal, la tarjeta de adquisición de datos, y el hardware de análisis en un sistema completo.

6.2 Descripción del programa

El programa consiste en una interfaz donde el operador de la caseta esté monitorizando el peso de los vehículos que transitan por su carril, de tal manera que cuando se excede el peso permitido por eje, se presenten un par de señales de advertencia, una visual en el monitor y una auditiva, además tendrá la capacidad de dar el peso excedente que tenga cada uno de los ejes, en caso requerido podría dar la tarifa o la penalización a la que se haría acreedor el vehículo infractor. El operador pondrá a funcionar el software una vez que inicie su turno o a la apertura del carril, y también lo podrá apagar.

El programa estará funcionando de manera continua, sin embargo, por las limitaciones de la velocidad y la cantidad de muestras que puede obtener la tarjeta de adquisición de datos USB-6008 (TAD 60008), esta adquisición se estará realizando en intervalos de aproximadamente un segundo (intervalos de adquisición) y un periodo de inactividad de 0.2 segundos, por lo que todo el ciclo durará 1.2 segundos y éste será un ciclo continuo durante toda la actividad del carril de cobro.

El siguiente diagrama de flujo muestra el proceso completo de la operación del programa principal, las entradas, las salidas y la forma en como interactúa con el operador de la caseta de cobro.

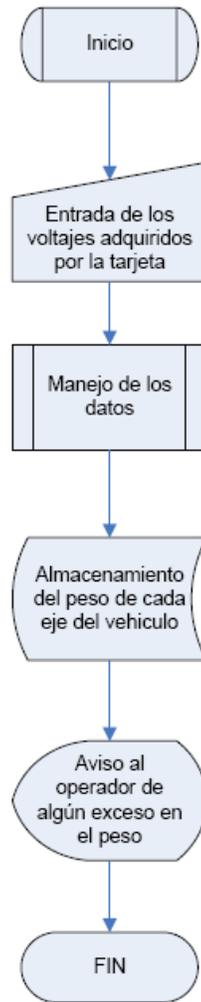


Figura 6.2 Diagrama del flujo del programa

6.3 Interfase de Usuario

La figura 6.3 muestra la ventana que el operador estará observando, en el cuadro del Peso del Vehículo (ver tabla 1.3, del capítulo 1) se desplegarán los pesos de los diferentes conjuntos de llantas del vehículo, como sabemos, en el caso extremo de un eje tipo tridem se registrará el peso de cada uno de los tres conjuntos de llantas y se calculará el peso total. En las cuotas se despliega el tipo de eje que fue registrado, ya sea sencillo, tandem o tridem; y en el cuadro se mostrará la diferencia de peso que presenta con respecto al límite de la norma.



Figura 6.3 Ventana principal de la aplicación

Si existe un exceso de peso con respecto al límite, se desplegará una ventana como la de la figura 6.4 y un aviso sonoro, para alertar al operador y que pueda tomar la acción pertinente. Aquí se podrá tener la posibilidad de agregar el cobro de una tarifa. Además, una vez que se haya registrado el peso de cualquiera de los ejes, se llevará un registro donde se almacenarán los valores del peso vehicular, el tipo de eje, la fecha y hora en la

cual ocurrió el evento, en una base de datos que estará disponible en el equipo que controla la caseta de cobro.

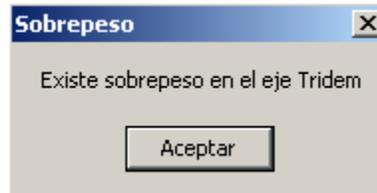


Figura 6.4 Aviso de sobrepeso en alguno de los ejes

6.4 Código Fuente

El código de fuente completo se muestra en el anexo C, está desarrollado bajo Visual Basic y con funciones especiales que controlan la adquisición de los datos por medio de la tarjeta USB6008.

El algoritmo del programa es el siguiente:

1. Configuración de la tarjeta de adquisición para obtener una cantidad finita de muestras (1000) y la frecuencia de adquisición (1ms), además de crear un arreglo de 1000 elementos donde se almacenarán los datos de manera temporal después de la adquisición.
2. Se comienza un ciclo que se repite siempre que se cumpla la condición de que existan valores dentro del arreglo que contiene los datos.
3. Se hace la distinción de los datos, de tal manera que se comparan cada uno de los valores guardados en la matriz temporal contra un valor de referencia (valor de disparo) para eliminar los valores menores o iguales a este valor, si no cumple la condición se descarta este valor del arreglo y se le pregunta si existe un valor de curva anterior, esto es, si ya había pasado algún eje anteriormente.
4. Se llama a una función para saber que tipo de curva presentan los últimos 6 datos del arreglo con los datos, esto es, si tienen una pendiente positiva, negativa o cero.
5. Si se tiene una pendiente positiva y no ha pasado una curva anterior, sabemos que está por comenzar un estímulo de un eje; o si se tiene una pendiente negativa y no

se ha detectado una pendiente positiva anteriormente, se tiene el final de una curva, por lo que se toman los datos para calcular ese estímulo del eje; o si se tiene una pendiente cero se regresa al paso 3.

6. Una vez que se tiene detectado el estímulo, se seleccionará el número de eje que se está midiendo, si es el uno, dos o tres, en cada eje se almacenaran los valores que les correspondan creando un arreglo para cada uno de los ejes hasta que se terminen los valores del arreglo de adquisición de datos originales.
7. Una vez que se tienen los arreglos por ejes, se ordenan con el método de “quick-sort” para que los valores estén de mayor a menor en cada uno de los arreglos.
8. Se realiza un promedio de los 5 valores más grandes de cada uno de los arreglos de los ejes para conocer el peso que tuvo cada uno de ellos y con esto eliminar un poco la variación que presenta la celda con el movimiento de la plataforma.
9. Cuando se tiene el valor de cada uno de los promedios, se suman entre si para dar el peso total del eje y se selecciona que tipo de eje es, dependiendo de cuantos arreglos existan.
10. Se muestran los datos de peso por conjunto de llantas, el tipo de eje que es y el peso total del eje al usuario.
11. Se guarda en un archivo si el peso total es diferente de cero, con las siguientes variables: el tipo de eje, el peso, la fecha y la hora.
12. Se repite todo el proceso completo.

Para mayor claridad se puede consultar los diagramas de flujo que se encuentran en el anexo B.

7. Observaciones y Conclusiones

Con respecto al objetivo propuesto en un inicio, se logró el diseño de un sistema de pesaje dinámico de bajo costo inherente en su construcción, la instrumentación es sencilla, pero es recomendable el uso de extensómetros del tipo dinámico, dadas las condiciones requeridas en el empleo de estos dispositivos de pesaje, el acondicionamiento se puede mejorar con un amplificador de instrumentación encapsulado en un solo circuito como los modelos AD620AN, a su vez el lazo de corriente puede ser también implementado con un circuito integrado modelo XTR110 ó AM462, esto elevaría un poco el costo de la implementación pero se haría una instrumentación más pequeña, sin embargo, para el alcance de este proyecto no fue necesario. Por otro lado, la adquisición puede ser mejorada con una tarjeta que tenga una mayor cantidad de muestras por segundo de tal manera que se pueda centralizar todo el manejo de los datos en una estación de trabajo u oficina de monitoreo, o bien, se pueda realizar un monitoreo del mayor tiempo posible.

Además, para hacer más eficiente el proceso del manejo de los datos por parte del equipo de cómputo, podemos implementar un dispositivo que realice la detección en el momento en que un vehículo se aproxima a la plataforma y con esto de inicio la adquisición de los datos por parte de la tarjeta, este dispositivo puede ser del tipo apagado o encendido, por medio de un detector por interrupción de luz, con la desventaja de que se tenga un vehículo con doble remolque y se confunda con dos vehículos que pasen muy cerca el uno del otro, como se observa en la figura 7.1; o también, podría ser un interruptor que se encuentre ubicado en el inicio de la plataforma y con ello se inicie la adquisición de datos, de tal manera que se haga más eficiente el uso de la computadora en cuanto a memoria,

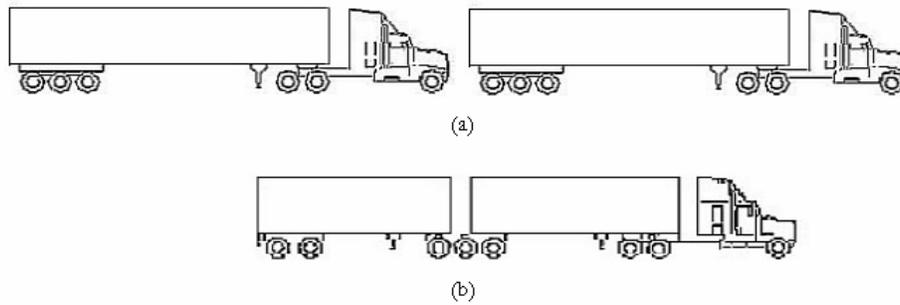


Figura 7.1 Configuración posible de eventos con detector de interrupción (a) Dos camiones con la misma separación (b) Un camión de doble semi-remolque

Otro dispositivo más complejo sería por visualización computarizada que permita determinar el tipo de vehículo del que se trata, guarde un registro visual del vehículo, nos habilite la adquisición de las imágenes en el momento en que se aproxime el vehículo y guarde el registro de todos los ejes por conjunto de vehículo, sin embargo, este último caso es el más costoso para su implementación.

En la actualidad ya existe un documento expedido por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en el que se regula oficialmente el peso de cada uno de los vehículos y la nueva clasificación en la que se encuentran.

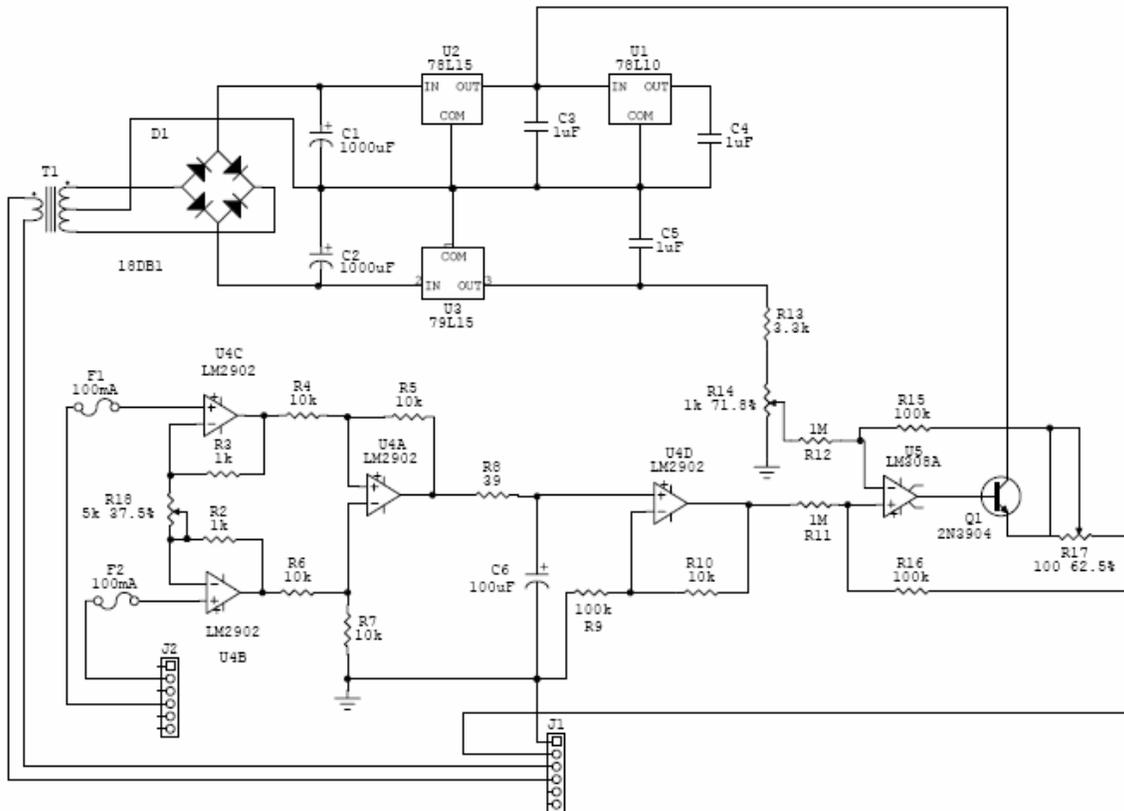
8. Referencias

1. <http://www.fhwa.dot.gov/policy/otps/truck/wusr/chapap.htm>
2. Manual Para La Operación Del Autotransporte Comercial En Texas, México Y Canadá, Publicación Técnica No. 184, IMT
3. COLLET, C. V. y HOPE, A.D.. Mediciones en ingeniería. Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona 1976
4. <http://usuarios.lycos.es/Marciano2000/electronica/SensoresSen.htm>

9. Anexos

Anexo A

Diagrama electrónico de la tarjeta del circuito de acondicionamiento que se encuentra en la plataforma.



Anexo B

Diagrama de flujo del programa principal

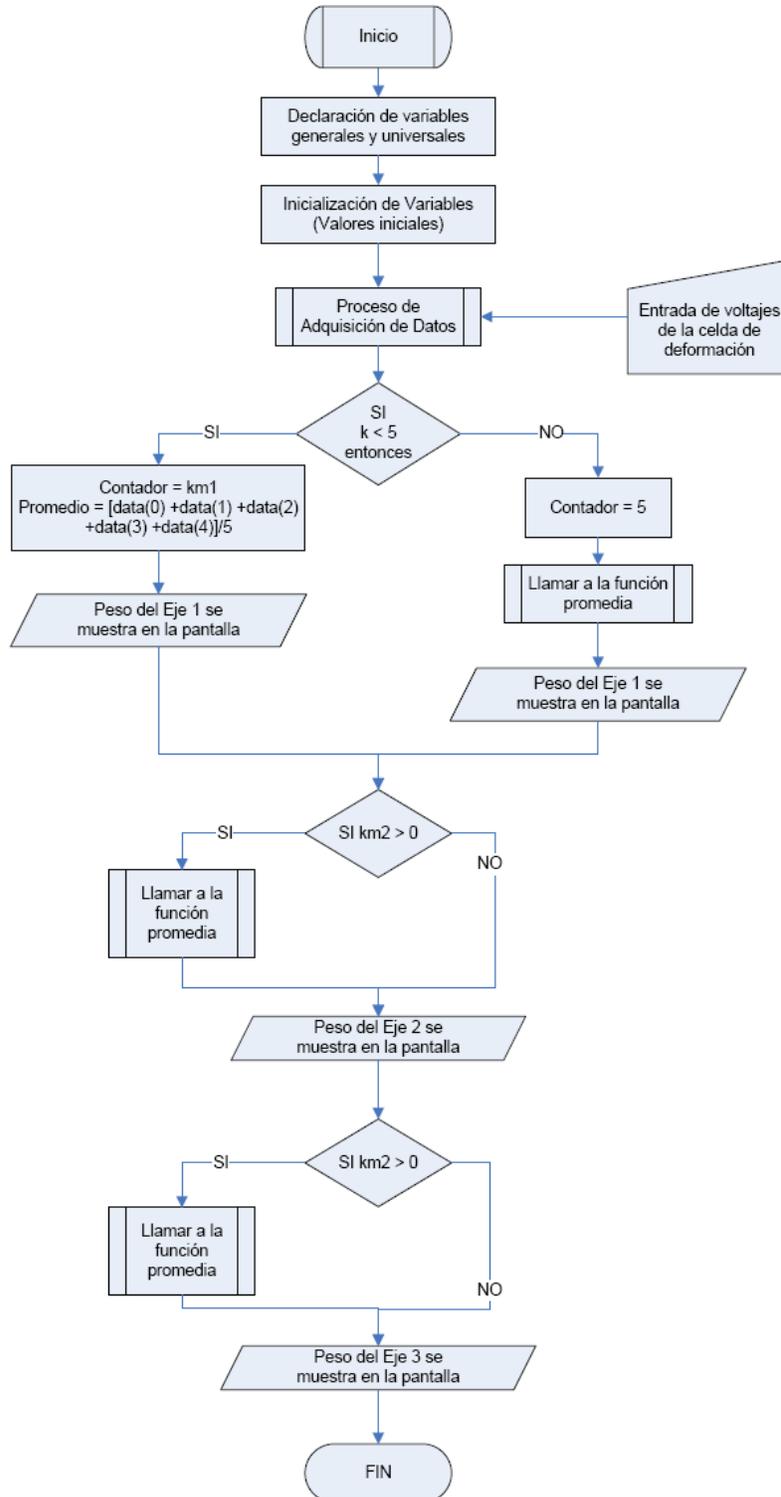
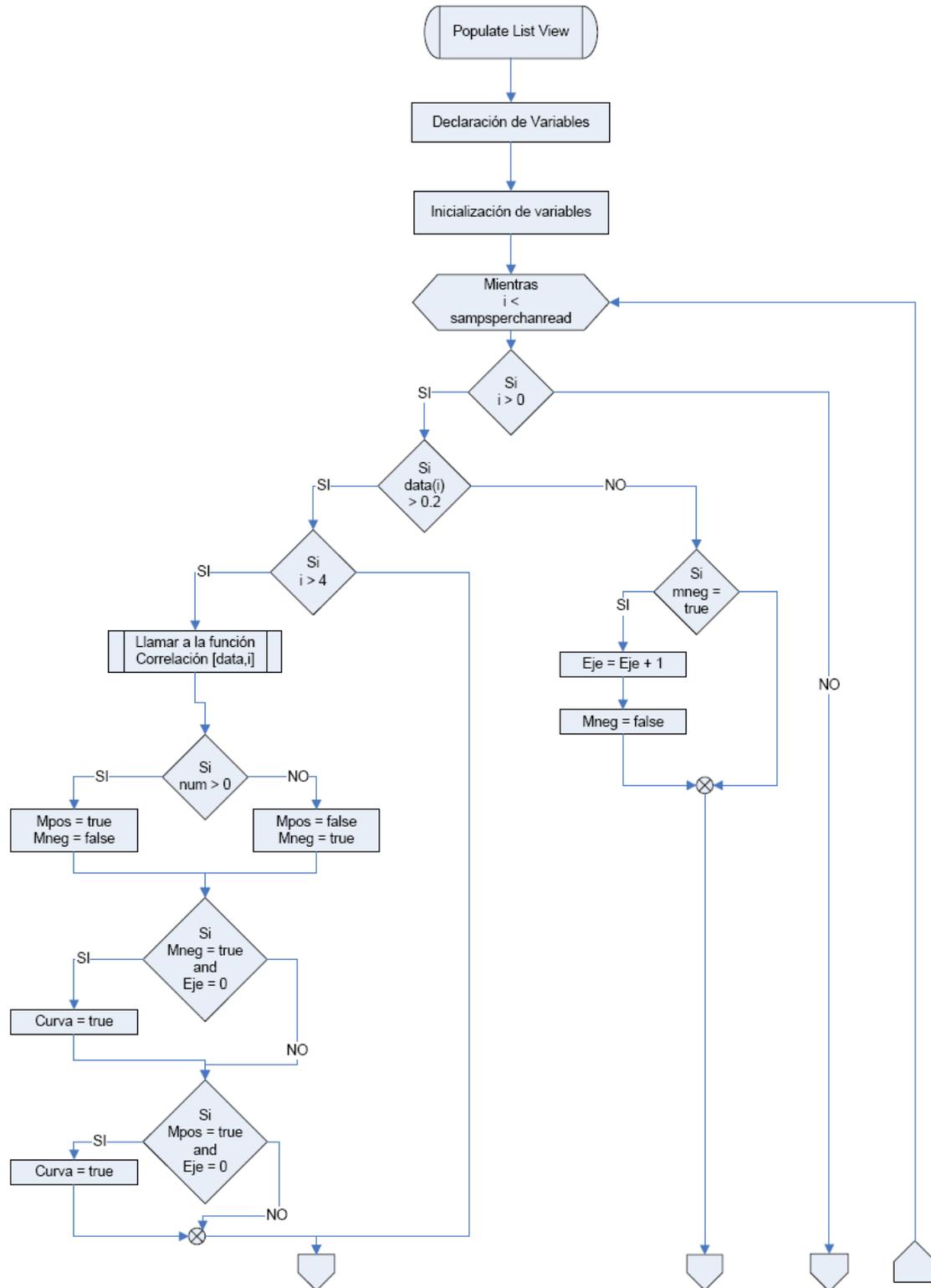


Diagrama de flujo de la rutina de adquisición de datos



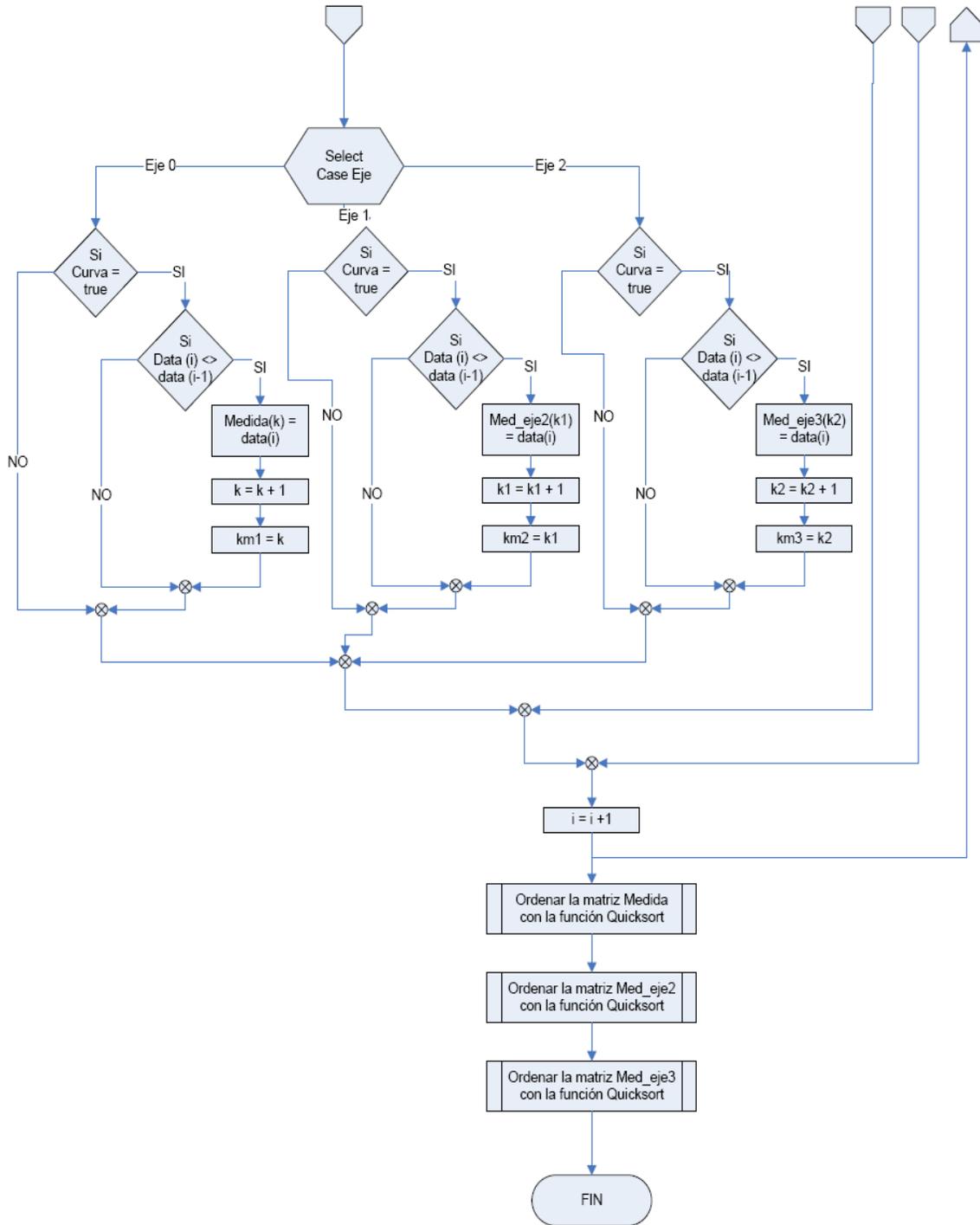


Diagrama de flujo de subrutina correlación

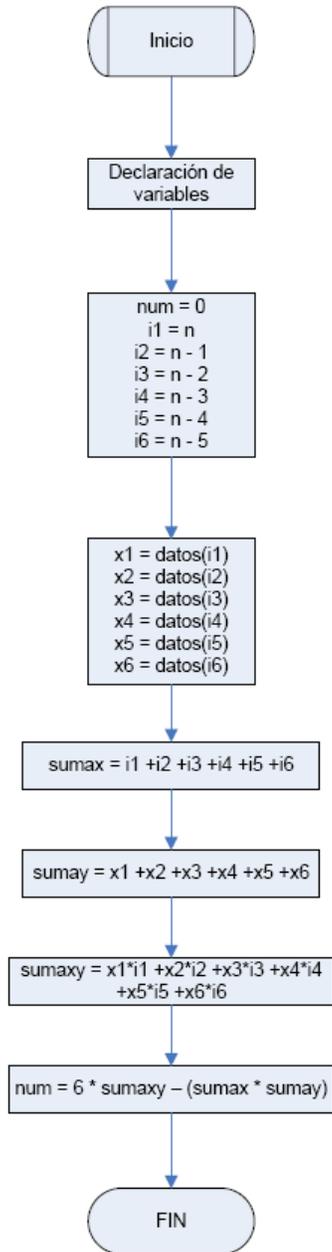


Diagrama de flujo de subrutina Promedio

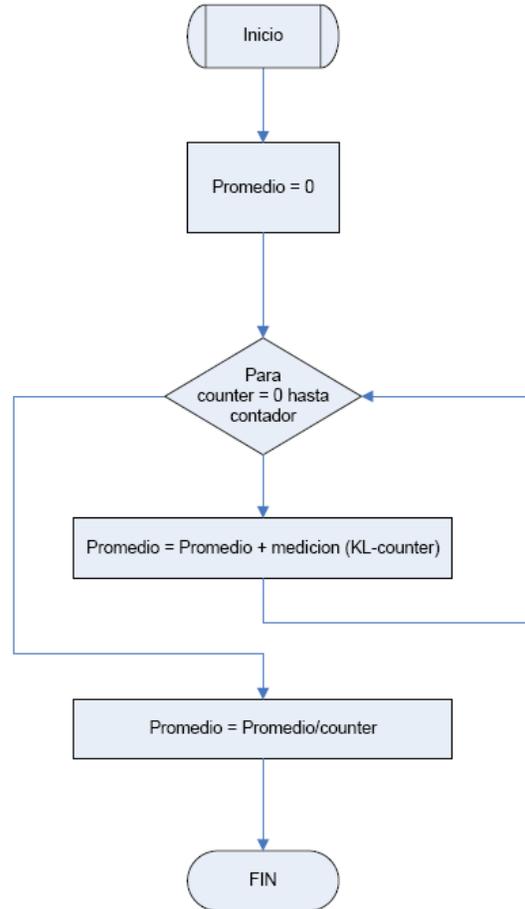
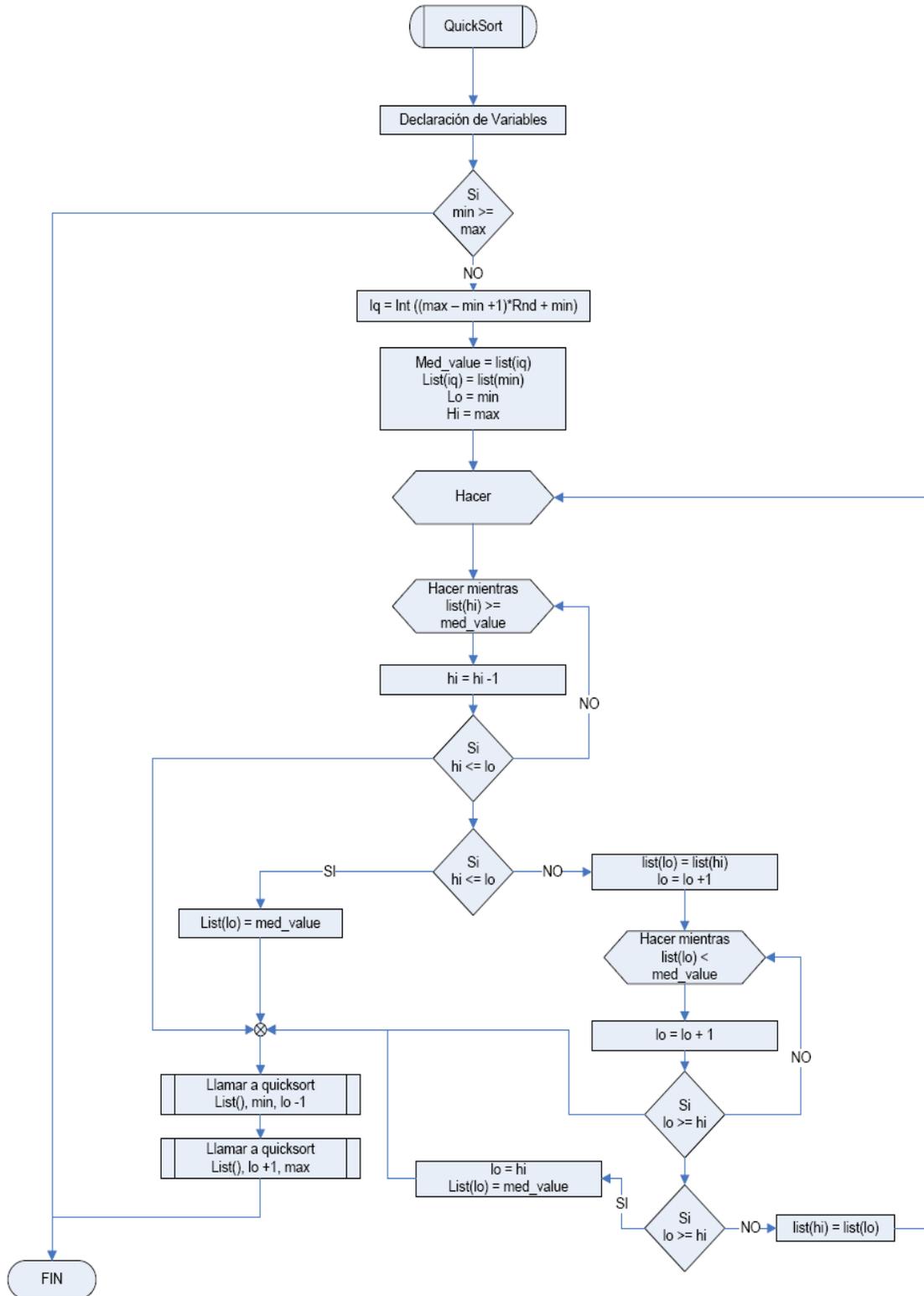


Diagrama de flujo de la subrutina Quick-Sort



Anexo C

```
/'*****  
'Sistema para la adquisición continua de señales  
'El periodo de muestreo es de 2000 muestras por segundo  
'El tiempo total de la adquisición es de máximo un segundo por  
'las características de la tarjeta  
*****/'
```

```
Option Explicit  
Private data() As Double  
Private medida() As Double  
Private med_eje2() As Double  
Private med_eje3() As Double  
Private taskHandle As Long  
Private tasksRunning As Boolean  
Private estado As Boolean  
Private promedio As Double  
Private k As Long  
Private k1 As Long  
Private k2 As Long  
Private km1 As Long  
Private km2 As Long  
Private km3 As Long  
Private min As Long  
Private max As Long  
Private eje As Long  
Private item As ListItem  
Private med_temp() As Double  
Private aviso As Boolean  
Private num As Double  
Private MPOS As Boolean  
Private mneg As Boolean  
Private curva As Boolean
```

```
Private Sub Detiene_Click()  
    estado = False  
    Unload Me  
End Sub
```

```
Private Sub startCommandButton_Click()  
    Dim sampsPerChanRead As Long  
    Dim numChannels As Long  
    Dim fillMode As DAQmxFillMode  
    Dim bufferSize As Long  
    Dim numSampsPerChannel As Long  
    Dim arraySizeInSamps As Long  
    Dim frequency As Long  
    Dim minValue As Long  
    Dim maxValue As Long  
    Dim counter As Long  
    Dim NumeroError As Long  
    Dim contador As Long
```

```
estado = True
```

```
'While estado = True  
On Error GoTo ErrorHandler
```

```
startCommandButton.Enabled = False  
acquisitionDataGrid.ListItems.Clear  
acquisitionDataGrid.ColumnHeaders.Clear
```

```

'If ValidateControlValues Then
' startCommandButton.Enabled = True
' Exit Sub
'End If

'If scanOrderOption.Value = True Then
' fillMode = DAQmx_Val_GroupByScanNumber
'Else
' fillMode = DAQmx_Val_GroupByChannel
'End If

bufferSize = 255
numSampsPerChannel = 250 'valor real de 950 simular AC 250
frequency = 5000 'valor real de 2000 simular AC 5000
minValue = -1
maxValue = 10
eje = 0
num = 0
aviso = False
curva = False
MPOS = False
mneg = False
km1 = 0
km2 = 0
km3 = 0
k1 = 0
k2 = 0
k = 0

'numSampsPerChannel = CLng(samplesPerChannelTextBox.Text)

'Create the DAQmx task.
DAQmxErrChk DAQmxCreateTask("", taskHandle)
tasksRunning = True

'Add an analog input channel to the task.
DAQmxErrChk DAQmxCreateAIVoltageChan(taskHandle, physicalChannelTextBox.Text, "", _
    DAQmx_Val_Cfg_Default, minValue, maxValue, _
    DAQmx_Val_VoltageUnits1_Volts, "")

'Configure task for finite sample acquisition and read in data
DAQmxErrChk DAQmxCfgSampClkTiming(taskHandle, "OnboardClock", frequency, DAQmx_Val_Rising, _
    DAQmx_Val_AcquisitionType_FiniteSamps, numSampsPerChannel)
DAQmxErrChk DAQmxGetTaskNumChans(taskHandle, numChannels)
arraySizeInSamps = numSampsPerChannel * numChannels
ReDim data(arraySizeInSamps)
ReDim medida(arraySizeInSamps)
ReDim med_eje2(arraySizeInSamps)
ReDim med_eje3(arraySizeInSamps)
ReDim med_temp(arraySizeInSamps)

acquiringLabel.Visible = True
acquiringLabel.Caption = "Acquiring..."
DAQmxErrChk DAQmxReadAnalogF64(taskHandle, numSampsPerChannel, 10#, _
    fillMode, data(0), arraySizeInSamps, sampsPerChanRead, ByVal 0&)

'Populate the listView
PopulateListView numChannels, fillMode, numSampsPerChannel

'Call the StopTask module to stop the DAQmx task.
StopTask

startCommandButton.Enabled = True

' Display a message indicating the number of samples per channel read.
acquiringLabel.Caption = "Samples per channel read = " & sampsPerChanRead
promedio = 0

'Asignando los pesos para cada eje
'Eje 1

```

```
If k < 5 Then
    contador = km1
    promedio = (data(0) + data(1) + data(2) + data(3) + data(4)) / 5
    Eje1.Text = promedio
Else
    'contador = 5
    promedio medida, km1
    Eje1.Text = promedio
End If
'For counter = 0 To contador
' promedio = promedio + medida(km1 - counter)
'Next counter
'promedio = promedio / (counter)
'Eje1.Text = promedio
promedio = 0
'promedia medida, km1
'Med1.Text = promedio

'eje 2
If km2 > 0 Then
    For counter = 0 To 5
        promedio = promedio + med_eje2(km2 - counter)
    Next counter
    promedio = promedio / (counter)
    Eje2.Text = promedio
End If
promedio = 0
'Eje 3
If km3 > 0 Then
    For counter = 0 To 5
        promedio = promedio + med_eje3(km3 - counter)
    Next counter
    promedio = promedio / (counter)
    Eje3.Text = promedio
End If

Exit Sub

ErrorHandler:
If tasksRunning = True Then
    DAQmxStopTask taskHandle
    DAQmxClearTask taskHandle
    tasksRunning = False
End If
acquiringLabel.Visible = False
startCommandButton.Enabled = True
MsgBox "Error: " & Err.Number & " " & Err.Description, "Error"
End Sub

Private Sub StopTask()
'Done!
DAQmxErrChk DAQmxStopTask(taskHandle)
DAQmxErrChk DAQmxClearTask(taskHandle)
tasksRunning = False
End Sub

Private Sub PopulateListView(numChannels As Long, fillMode As Long, sampsPerChanRead As Long)
Dim count As Long
Dim i As Long
Dim temp_i As Long
Dim j As Long
Dim item As ListItem

SetupListViewColumns (4) 'modificar para prueba
temp_i = 0 'Pruebas
count = 0
i = 0
k1 = 0
k2 = 0
k = 0
```

```

eje = 0
acquisitionDataGrid.ColumnHeaders.Add , , physicalChannelTextBox.Text
acquisitionDataGrid.View = lvwReport

While i < sampsPerChanRead
  Set item = acquisitionDataGrid.ListItems.Add( , Strings.FormatNumber(data(i), 6))
  If i > 0 Then
    If data(i) > 0.2 Then 'Nivel de umbral para detectar
      If i > 4 Then
        correlacion data, i
        NumEje.Text = num
        If num > 0 Then
          MPOS = True
          mneg = False
        Else
          MPOS = False
          mneg = True
        End If
        If mneg = True And eje = 0 Then
          curva = True
        End If
        If MPOS = True And eje = 0 Then
          curva = True
        End If
      End If
      Select Case eje 'If data(i) <> data(i - 1) Then
        Case 0
          If curva = True Then
            If data(i) <> data(i - 1) Then
              medida(k) = data(i)
              'med_temp(k) = medida(k)
              'Set item = acquisitionDataGrid.ListItems.Add( , Strings.FormatNumber(data(i), 6))
              k = k + 1
              km1 = k
              TextK.Text = k
            End If
          End If
        Case 1
          If curva = True Then
            If data(i) <> data(i - 1) Then
              med_eje2(k1) = data(i)
              'Set item = acquisitionDataGrid.ListItems.Add( , Strings.FormatNumber(data(i), 6))
              Med2.Text = med_eje2(k1)
              k1 = k1 + 1
              km2 = k1
              Textk1.Text = k1
            End If
          End If
        Case 2
          If curva = True Then
            If data(i) <> data(i - 1) Then
              med_eje3(k2) = data(i)
              'Set item = acquisitionDataGrid.ListItems.Add( , Strings.FormatNumber(data(i), 6))
              Med3.Text = med_eje3(k2)
              k2 = k2 + 1
              km3 = k2
              Textk2.Text = k2
            End If
          End If
        End Select
      Else
        If mneg = True Then
          eje = eje + 1
          mneg = False
        End If
      End If
    End If
    i = i + 1
  Wend
  'pruebas

```

```
'Eje2.Text = aviso
NumEje.Text = eje
Quicksort medida, 0, k
Quicksort med_eje2, 0, k1
Quicksort med_eje3, 0, k2
'pruebas
End Sub

Private Sub SetupListViewColumns(numChannels As Long)
    Dim channelList As String * 255
    Dim tmpString As String
    Dim tmpChannelList As String
    Dim commaStart As Long
    Dim bufferSize As Long
    Dim count As Long
    Dim i As Long
    bufferSize = 255

    DAQmxErrChk DAQmxGetTaskChannels(taskHandle, channelList, bufferSize)

    'Physical channels parsing and ListView implementation
    While Mid(channelList, count + 1, 1) <> Chr$(0)
        count = count + 1
    Wend
    tmpChannelList = Mid(channelList, 1, count)
    count = 0
    commaStart = 1
    For i = 0 To Len(tmpChannelList)
        While Mid(tmpChannelList, i + 1, 1) <> "," And i < Len(tmpChannelList)
            i = i + 1
            count = count + 1
        Wend
        tmpString = Mid(tmpChannelList, commaStart, count)
        commaStart = i + 2
        acquisitionDataGrid.ColumnHeaders.Add , , tmpString
        acquisitionDataGrid.View = lwvReport
        count = 0
    Next
End Sub

Private Sub Form_Load()
    tasksRunning = False
    acquiringLabel.Visible = False
End Sub

Private Sub Form_Unload(Cancel As Integer)
    'Quit the program.
    If tasksRunning = True Then
        StopTask
    End If
End Sub

Public Sub Quicksort(list() As Double, ByVal min As Long, ByVal max As Long)
    Dim med_value As Double
    Dim hi As Long
    Dim lo As Long
    Dim iq As Long

    ' Si min >= max, la lista contiene 0 o 1 elementos, entonces ya esta organizada
    If min >= max Then Exit Sub

    ' Seleccionar el elemento base
    iq = Int((max - min + 1) * Rnd + min)
    med_value = list(iq)

    ' Barrido hacia adelante
    list(iq) = list(min)

    lo = min
    hi = max
```

```

Do
' Ver hacia abajo desde hi para valores < med_value.
Do While list(hi) >= med_value
    hi = hi - 1
    If hi <= lo Then Exit Do
Loop
If hi <= lo Then
    list(lo) = med_value
    Exit Do
End If

' Cambiar los valores lo y hi.
list(lo) = list(hi)

' Ver al frente desde lo para valores >= med_value.
lo = lo + 1
Do While list(lo) < med_value
    lo = lo + 1
    If lo >= hi Then Exit Do
Loop
If lo >= hi Then
    lo = hi
    list(hi) = med_value
    Exit Do
End If

' Cambiar los valores lo y hi.
list(hi) = list(lo)
Loop

' Acomodar las dos nuevas sublistas.
Quicksort list(), min, lo - 1
Quicksort list(), lo + 1, max
End Sub

Public Sub correlacion(datos() As Double, n As Long)
Dim x1 As Double
Dim x2 As Double
Dim x3 As Double
Dim x4 As Double
Dim x5 As Double
Dim x6 As Double
Dim i1 As Long
Dim i2 As Long
Dim i3 As Long
Dim i4 As Long
Dim i5 As Long
Dim i6 As Long
Dim sumax As Double
Dim sumay As Double
Dim sumaxy As Double

num = 0
i1 = n
i2 = n - 1
i3 = n - 2
i4 = n - 3
i5 = n - 4
i6 = n - 5
x1 = datos(i1)
x2 = datos(i2)
x3 = datos(i3)
x4 = datos(i4)
x5 = datos(i5)
x6 = datos(i6)
sumax = i1 + i2 + i3 + i4 + i5 + i6
sumay = x1 + x2 + x3 + x4 + x5 + x6
sumaxy = x1 * i1 + x2 * i2 + x3 * i3 + x4 * i4 + x5 * i5 + x6 * i6
num = 6 * sumaxy - (sumax * sumay)
End Sub

```

```
Public Sub promedia(matriz() As Double, n As Long)
    Dim contador As Long
    Dim counter As Long

    promedio = 0
    contador = 5
    For counter = 0 To contador
        promedio = promedio + medida(n - counter)
    Next counter
    promedio = promedio / (counter)
End Sub
```