



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO Y PROPUESTA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO EN EL CURSO DE
INSTRUMENTACIÓN ELÉCTRICA PARA LOS ESTUDIANTES DE LA ESCUELA DE
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, EN EL ÁREA DE SENSADO Y CONTROL**

Erick Gabriel Alvarado Castillo

Asesorado por el Ing. Otto Fernando Andrino González

Guatemala, noviembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO Y PROPUESTA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO EN EL CURSO DE INSTRUMENTACIÓN ELÉCTRICA PARA LOS ESTUDIANTES DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, EN EL ÁREA DE SENSADO Y CONTROL

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ERICK GABRIEL ALVARADO CASTILLO

ASESORADO POR EL ING. OTTO FERNANDO ANDRINO GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADOR	Ing. Fredy Mauricio Monroy Peralta
EXAMINADOR	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO Y PROPUESTA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO EN EL CURSO DE INSTRUMENTACIÓN ELÉCTRICA PARA LOS ESTUDIANTES DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, EN EL ÁREA DE SENSADO Y CONTROL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 13 de abril de 2018.



Erick Gabriel Alvarado Castillo

Guatemala, 9 de septiembre de 2019

Ingeniero
Otto Fernando Andrino González
Coordinador del Área de Electrotecnia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC

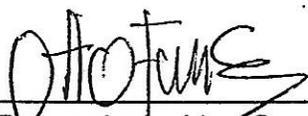
Estimado Ingeniero Andrino.

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado **“Diseño y propuestas de prácticas de laboratorio en el curso de instrumentación eléctrica para los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica en el área de sensado y control”**, del señor Erick Gabriel Alvarado Castillo, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo, como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente.



Ing. Otto Fernando Andrino González
Colegiado 4,038
Asesor



REF. EIME 61. 2019.
9 de SEPTIEMBRE 2019.

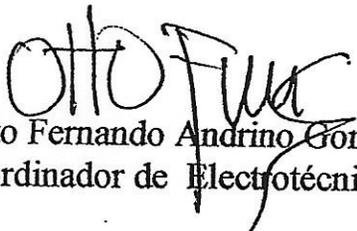
Señor Director
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO Y PROPUESTAS DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO EN EL CURSO DE INSTRUMENTACIÓN ELÉCTRICA PARA LOS ESTUDIANTES DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA EN EL ÁREA DE SENSADO Y CONTROL**, del estudiante; Erick Gabriel Alvarado Castillo, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS

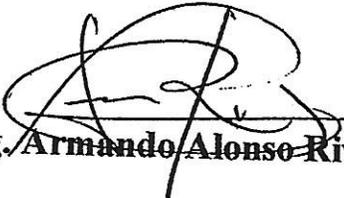

Ing. Otto Fernando Andrino Gonzalez
Coordinador de Electrotécnica





REF. EIME 60. 2019.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación de el estudiante: **ERICK GABRIEL ALVARADO CASTILLO** Titulado; **DISEÑO Y PROPUESTAS DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO EN EL CURSO DE INSTRUMENTACIÓN ELÉCTRICA PARA LOS ESTUDIANTES DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA EN EL ÁREA DE SENSADO Y CONTROL**, procede a la autorización del mismo.


Ing. ~~Armando Alonso Rivera Carrillo~~



GUATEMALA, 30 DE SEPTIEMBRE 2019.



Ref. DTG.560-2019

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO Y PROPUESTA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO EN EL CURSO DE INSTRUMENTACIÓN ELÉCTRICA PARA LOS ESTUDIANTES DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA, EN EL ÁREA DE SENSADO Y CONTROL**, presentado por el estudiante universitario: **Erick Gabriel Alvarado Castillo**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Inga. Aurelia Anabela Cordova
Decana



Guatemala, Noviembre de 2019

AACE/asga
cc

ACTO QUE DEDICO A:

Mi padre

Erick Oswaldo Alvarado Vega, quien con su gran paciencia y digno ejemplo a seguir, me guio por el buen camino de la academia.

Mi madre

Mayra Adela Castillo Natareno, quien por medio de su amor incondicional y eterno sacrificio, permitió que saliera adelante en mis estudios.

Mi abuela

Mi segunda madre que tuve, que gracias a su insuperable dedicación me enseñó los valores con su ejemplo de una buena y humilde persona.

Mis hermanos

Pablo y JJ Alvarado, que han estado a mi lado durante todo este tiempo y con especial apoyo durante los años de universidad.

Mis amigos

La familia que escogí y con quien compartí una de las mejores etapas de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Mi <i>alma máter</i> , por ser la casa de estudios que me enseñó experiencias de vida y me formó como futuro profesional.
Facultad de Ingeniería	Por tener papel en cada una de las anécdotas en el movimiento estudiantil, y forjarme como un buen ciudadano.
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica	Por ser ese centro de estudios de inagotables experiencias, anécdotas y muestras de superación académica.
Ing. Otto Andrino	Por ser ese profesional dedicado a la academia, que con dedicación y esfuerzo es un ejemplo de lucha y superación para los estudiantes y futuros profesionales.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE SENSADO Y CONTROL.....	1
1.1. Exactitud.....	2
1.2. Precisión.....	3
1.3. Errores de medición	5
1.3.1. Errores graves	5
1.3.2. Error sistemático.....	7
1.3.2.1. Error instrumental	7
1.3.2.2. Error ambiental	8
1.3.3. Error aleatorio	8
2. CIRCUITOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	9
2.1. Mediciones con puentes de corriente alterna y directa.....	10
2.1.1. Puente Wheatstone	10
2.1.2. Puente Maxwell	12
2.1.3. Puente Schering	14
2.1.4. Puente Wien	16
2.2. Acondicionamiento de señales	17
2.2.1. Medición por deflexión	19

	2.2.1.1.	Divisor de tensión en termistores	21
2.2.2.		Medición por comparación	22
	2.2.2.1.	Fuente de alimentación	24
2.2.3.		Calibración de puentes sensores	25
2.2.4.		Compensación y medidas diferenciales	26
2.2.5.		Alimentación del puente	28
	2.2.5.1.	Hilos de conexión	28
2.2.6.		Tensión de salida	30
3.		SENSORES Y SU FUNCIONAMIENTO	31
3.1.		Sensores de temperatura	33
	3.1.1.	Termopares	33
	3.1.2.	Sensores RTD	35
	3.1.3.	Sensores de temperatura semiconductores	37
3.2.		Sensores de posición	38
	3.2.1.	Rotativos	39
		3.2.1.1. Estructura de un sincro	39
		3.2.1.2. Estructura de un resolver	40
	3.2.2.	Resistivos	41
	3.2.3.	Magnéticos	43
	3.2.4.	De efecto Hall	45
	3.2.5.	Ópticos	46
		3.2.5.1. Interruptores	46
		3.2.5.2. Reflectivos	49
		3.2.5.3. Encoder	49
3.3.		Sensores de presión	51
3.4.		Otros sensores	54

4.	INTERNET INDUSTRIAL DE LAS COSAS	57
4.1.	Historia	57
4.2.	Industria 4.0.....	61
4.3.	Tecnologías usadas en el internet industrial de las cosas.....	63
4.4.	Arquitectura IIoT	66
4.4.1.	Propiedades de red	66
4.5.	Beneficios	69
4.6.	Método de aprendizaje	71
5.	PROPUESTA DE PRÁCTICAS.....	75
5.1.	Práctica 1: Puente de Wheatstone, sensibilidad.....	76
5.2.	Práctica 2: Puente de Wheatstone, linealidad	78
5.3.	Práctica 3: Termistores, linealidad y ajuste	81
5.4.	Práctica 4: Termistores, voltaje de salida	84
5.5.	Práctica 5: El microcontrolador Arduino	87
5.6.	Práctica 6: IIOT usando un microcontrolador	89
5.7.	Práctica 7: El sensor fotoeléctrico y el IIOT.....	92
5.8.	Práctica 8: Diseño de un encoder incremental	95
5.9.	Práctica 9: Panel de datos y análisis	98
	CONCLUSIONES	103
	RECOMENDACIONES.....	105
	BIBLIOGRAFÍA.....	107
	APÉNDICES	109
	ANEXOS.....	113

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Gráfico de exactitud	3
2.	Gráfico de precisión	4
3.	Termograma de un transformador trifásico	6
4.	Puente Wheatstone.....	10
5.	Puente Maxwell.....	12
6.	Puente Schering.....	15
7.	Puente Wien.....	16
8.	Divisor de tensión.....	19
9.	Linealidad en mediciones por deflexión	20
10.	Medición con termistor	21
11.	Puente de Wheatstone variable	23
12.	Puente de galgas extensiométricas dobles	27
13.	Conexión de los tres hilos	29
14.	Termopar.....	34
15.	Sensor RTD	36
16.	Corrientes en transistores	37
17.	Diagrama de un resolver	41
18.	Sensor potenciométrico.....	43
19.	Puente magnetorresistivo.....	44
20.	Efecto Hall.....	45
21.	Sensor de efecto Hall.....	46
22.	Diagrama de sensor óptico	47
23.	Interruptor fotoeléctrico	48

24.	Encoder incremental	51
25.	Diagrama de una galga extensiométrica.....	52
26.	Celda de carga.....	54
27.	Nodos iniciales del ARPAnet	58
28.	Implementación de <i>IIoT</i>	63
29.	Arquitectura de red	67
30.	Calibración de puente	76
31.	Compensación de puente	78
32.	Puente de Wheatstone	79
33.	Variación de la constante k.....	80
34.	Termistor en un divisor de tensión	82
35.	Linealidad del termistor.....	83
36.	Divisor en divisor de tensión	85
37.	Led en arduino.....	88
38.	Diagrama de conexión	90
39.	Ejemplo de desarrollo móvil en Blynk	94
40.	Encoder incremental	96
41.	<i>Dashboard</i> de datos.....	100

TABLAS

I.	Rangos de temperatura de un RTD	36
II.	Normativa de instrumentos de pesaje.....	53
III.	Principales tecnologías	64

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Y	Admitancia
C	Capacitancia
I	Corriente
Q	Factor de calidad
f	Frecuencia
°C	Grados centígrados
Z	Impedancia
L	Inductancia
Kg	Kilogramo
ms	Milisegundos
Ω	Ohmio
rms	Raíz media cuadrada
R	Resistencia
S	Sensibilidad
E	Voltaje de alimentación
Vac	Voltaje de alimentación alterno
ω	Velocidad angular
Vs	Voltaje de salida

GLOSARIO

Aislamiento	Es un tipo de material que se resiste al paso de la corriente eléctrica a través de él.
<i>Brushless</i>	Término que describe a un tipo de motor que no requiere escobillas para su funcionamiento.
Distorsión armónica	Parámetro eléctrico que hace referencia a los voltajes y corrientes no deseados cuando la señal senoidal no es una onda pura.
<i>Encoder</i>	Dispositivo de instrumentación que traduce el movimiento angular y rotativo de un eje a una señal eléctrica, ya sea análoga o digital, para que pueda ser interpretada desde un controlador.
<i>IIOT</i>	Por sus siglas en inglés, significa <i>Industrial Internet of Things</i> .
Inductancia	Parámetro eléctrico de las bobinas que determinan cuánta es la oposición hacia la corriente eléctrica que fluye a través de ellas.
Grado IP	<i>Ingress Protection</i> , se refiere al grado de protección eléctrica, mecánica y química que posee un

dispositivo de cualquier tipo de producto, hacia contacto accidental de agua y polvo.

Offset Es valor erróneo de medida de un instrumento de medición, en el que indica que el valor de salida no concuerda con el valor consignado.

PID Tipo de retroalimentación que se le añade a un sistema de control de lazo cerrado. Sus siglas significan control proporcional, integral y derivativo.

PLC *Programmable logic controller*, es un dispositivo automático que permite la programación de procesos a través de entradas y salidas.

SCADA *Supervisory Control and Data Acquisition*, es un sistema o aplicación útil para controlar visualmente un conjunto de parámetros en un proceso industrial.

Setpoint Este término se refiere al punto de referencia de una variable, en un proceso de control para el cual se realiza su ajuste. Este valor no cambia durante la medición.

Termograma Cuadro obtenido mediante termografía que permite identificar las temperaturas de los objetos sin contacto físico directo.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación se realizó para concebir conocimientos actualizados y enfocados a las nuevas tendencias. En el primer capítulo se detalla sobre los principios de medición que existen y los errores más comunes con los que se enfrenta un instrumentista.

El segundo capítulo trata acerca de los circuitos de adquisición de datos, entre los que se encuentran los circuitos tipo puente y el divisor de tensión, los cuales son muy útiles para el correcto diseño de sensores. Entre los puentes se encuentran el Schering, Wheatstone, Maxwell y Wien.

Luego el siguiente capítulo abarca los tipos de sensores más comunes que se encuentran en una planta industrial. Los sensores de temperatura, de posición y de presión, son algunos de los tipos que se incluyen en este documento. Además, cada uno tiene un modelo actual que se encuentra accesible en el mercado.

Con el capítulo cuarto, nos encontramos con el internet industrial de las cosas o más conocido como *IIOT*. En este capítulo se detalla el origen de este concepto, los límites, los objetivos y el alcance que se implementa en cualquier proyecto automatizado/tecnológico.

Por último, en el quinto capítulo se detallan las prácticas de laboratorio que se debe implementar en el curso. El progreso es proporcional; por tanto, es recomendable no saltar ninguna en el momento de implementarlas.

OBJETIVOS

General

Diseñar prácticas de laboratorio para el curso de instrumentación eléctrica, con enfoque hacia el sensado y control de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería en la Universidad San Carlos de Guatemala.

Específicos

1. Elaborar un compendio de temas seleccionados que se imparten en el curso de instrumentación eléctrica.
2. Determinar cuáles son los principales requerimientos para la selección de un instrumento de medición.
3. Investigar métodos de aprendizaje prácticos para el diseño del laboratorio de instrumentación eléctrica.
4. Diseñar prácticas de laboratorio del curso de instrumentación eléctrica.

INTRODUCCIÓN

Día a día, en el campo de las ingenierías nos topamos con distintas innovaciones que nos muestran nuevos métodos para realizar procesos con los que ya estamos familiarizados.

En el campo de la ingeniería mecánica eléctrica es más marcado debido a que es una carrera meramente tecnológica, que debe estar al día con los temas vanguardistas de diseño, construcción y manipulación de dispositivos actuales.

Específicamente en la automatización industrial, se requiere de vasto conocimiento sobre distintas herramientas que pueden ayudarnos a simplificar las cosas. Ejemplos como dispositivos de control rediseñados, plantas de automatización enlazadas unas con otras, sistemas SCADA conectados a la nube, entre otros. Así, la necesidad de expertos en instrumentación crece exponencialmente a medida que transcurren los años.

Por ello, el desarrollo de esta tesis prepara a los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica en temas actuales y vanguardistas de sensado y control. Uno de ellos es sobre el internet industrial de las cosas, tendencia que ha cobrado auge los últimos meses y apenas se está recibiendo en las industrias de Guatemala.

1. FUNDAMENTOS BÁSICOS DE SENSADO Y CONTROL

El proceso de medición en la carrera de un instrumentista profesional incrementa considerablemente con el transcurso del tiempo. Dicho profesional toma en consideración muchísimos factores y parámetros en el momento de determinar qué tipo de sensor (y qué variable debe medir) cuando desea realizar un nuevo proyecto.

Por ejemplo, podemos comparar dos situaciones sencillas. Si se necesita instalar un sensor fotoeléctrico en un beneficio de café, se debe tomar en cuenta que la luz que hay en el ambiente es natural, casi tenue. Además, no se puede incrementar dicha iluminación en áreas específicas donde estén los granos, dado a que la calidad de estos podría verse afectada.

Por otro lado, la misma situación donde necesitamos colocar un sensor fotoeléctrico sería una fábrica de llenado de pintura. En la mayoría de los casos, la luz en el área no sería solo natural, sino también luz artificial, para controlar fácilmente el proceso automatizado, revisiones de inspección rutinarias, verificación de pasos, entre otros.

Así, notamos cómo el instrumentista debe tener el suficiente conocimiento técnico y práctico para seleccionar el mejor dispositivo de medición y control. Entre los parámetros, se encuentran:

- Tipo de señal que se requiere
- Características del objeto por sensar
- Condiciones ambientales

- Especificaciones eléctricas
- Tipo o modo de instalación

Entre estos parámetros, se debe tener siempre la mayor cantidad de datos de la aplicación de nuestro dispositivo. Las características que debemos saber de un objeto que vamos a sensor, son la forma, el tamaño, la opacidad, la velocidad y la reflectividad. Este último es muy importante, ya que incide directamente en el tipo de sensor que debemos usar. Claramente no es lo mismo medir una botella de vidrio, que un recipiente metálico. Por ello, necesitamos saber fundamentos y principios básicos que nos ayudarán para seleccionar el mejor sensor.

1.1. Exactitud

Comúnmente, estudiantes de ingeniería de distintas ramas aprenden en cursos de estadística y análisis probabilístico la diferencia entre exactitud y precisión.

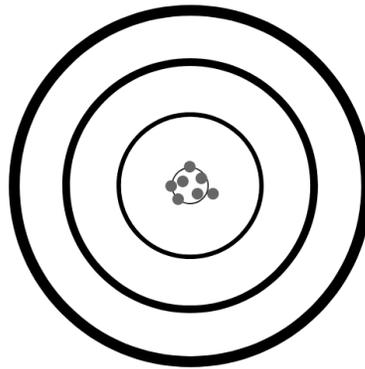
Se entiende por exactitud la facilidad con la que un dispositivo de medición se acerca al valor real que se está midiendo. Este término está fuertemente relacionado con las características fundamentales de la estructura del objeto.

Un caso en específico sería que, con un voltímetro, determinamos que la tensión en unos bornes de un transformador es de 749,8 V. Ahora, con un medidor patrón, realizamos la misma medición y obtenemos como valor medido 750,0 V. Aquí podemos afirmar que el dispositivo es bastante exacto, ya que la diferencia entre una medición y la otra no es considerable (dependiendo de la aplicación). En este punto, también intervienen las cifras significativas; estas nos indican con mayor fiabilidad qué tan cerca estamos de un punto de

medición correcto a uno falso. Entre 749,8 V y 749,89 V, la última es la que cuenta con más cifras significativas.

Por tanto, la exactitud de una medición es determinada por la magnitud del error (que posteriormente será ampliado) que hay, entre el valor real (llamado *set point*) y el valor medido.

Figura 1. **Gráfico de exactitud**



Fuente: elaboración propia, empleando Paint.

1.2. **Precisión**

A diferencia de la exactitud, la precisión depende mucho del dispositivo con el que se efectúa la medición.

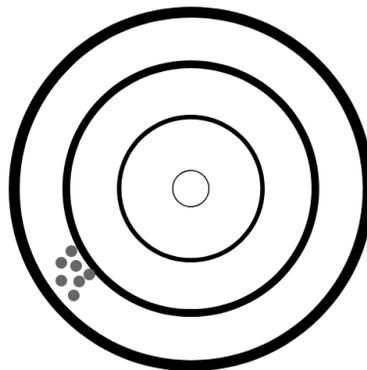
La precisión se refiere al grado de concordancia o proximidad entre varias mediciones realizadas con un dispositivo, bajo las mismas condiciones. Esto último es importante, dado que cualquier indicio de variación ambiental incide directamente en nuestra medición.

Usualmente, la precisión de un dispositivo es fácil de visualizar mediante medidas de dispersión, que nos permiten ver la cercanía de los datos obtenidos de varias mediciones puntuales.

Veamos el ejemplo del voltímetro: un día en específico obtenemos un valor de 741,75 V; dos días después realizamos la misma medición (bajo las mismas condiciones ambientales) y obtenemos 741,73 V. Realizamos el mismo procedimiento un día después, y el voltímetro indica 741,76 V.

En ese punto, afirmamos que el voltímetro tiene alto grado de precisión, dado que a medida que continuemos realizando las mediciones, los valores medidos siempre van a ser cercanos el uno con el otro.

Figura 2. **Gráfico de precisión**



Fuente: elaboración propia, empleando Paint.

Sin embargo, si con el mismo medidor patrón obtenemos una medición de 760,72 V, diremos que nuestro voltímetro es preciso, mas no exacto. De manera contraria, si con el medidor patrón hubiésemos obtenido un valor de 745,74 V podemos afirmar que el instrumento es exacto y preciso.

1.3. Errores de medición

Durante el proceso de sensado de muchos dispositivos, debemos recordar que muchas variables se toman en cuenta durante la medición, como las condiciones ambientales, la instalación física, la invasión de personal humano, entre otras. Esto ocasiona que el valor que busquemos medir se aleje de nuestro valor real.

Así, el error de una medición nos permite categorizarlos en función de su origen. Existen tres: los errores graves, los errores sistemáticos y los errores aleatorios.

1.3.1. Errores graves

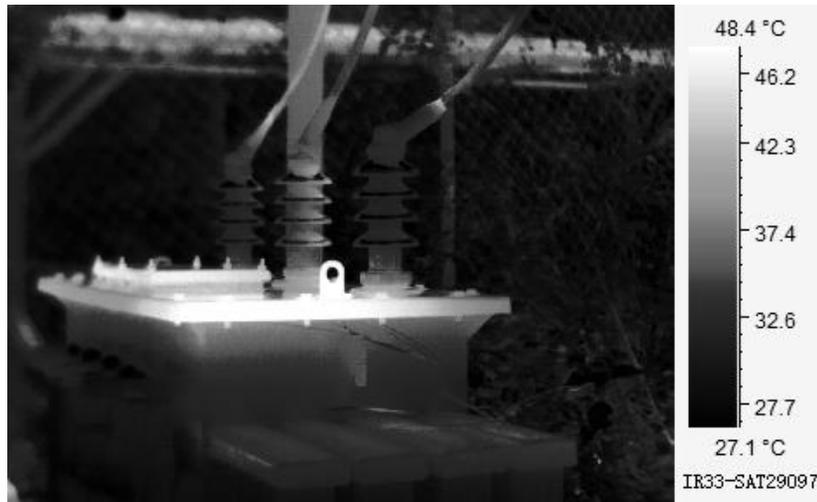
Este tipo de error surge a partir de la intervención humana durante la medición de un valor puntual.

Dicho en otras palabras, cualquier dispositivo de sensado que requiere ser manipulado y controlado por un operador, presentará casi inevitablemente fallas en la medición, a menos de que la persona que esté llevando a cabo la medición sea un instrumentista altamente capacitado. También en el registro y cálculo de las mediciones, los errores son cometidos cotidianamente.

Claro, este tipo de errores son fáciles de prevenir si únicamente el instrumentista sabe previamente cuáles son las condiciones (y posibles lecturas falsas) en el objeto que se desea medir.

Un ejemplo claro es cuando se realizan mediciones con una cámara para termografía infrarroja.

Figura 3. **Termograma de un transformador trifásico**



Fuente: elaboración propia.

La imagen muestra un transformador antiguo al que se le debía hacer una inspección rutinaria. En este caso, el transformador estaba operando a una carga solicitada muy baja de la nominal, por lo que las condiciones de temperatura en este debían ser normales.

No obstante, el termograma indica que en la tapa del transformador hay una temperatura máxima de 51,3 °C. Por razones técnicas esto podría causar una alarma, ya que no existe ninguna condición externa que sea la causa principal de tal calentamiento.

Hay falla en el aislamiento o algún agente interno que haya provocado dicha elevación de temperatura; la causa principal es un error grave, causado por el operador.

Captar el termograma durante el mediodía, en una instalación eléctrica externa, no es recomendable; debido a las altas temperaturas del ambiente. Los rayos solares son la principal causa de calentamiento y provoca una falsa imagen de termografía. Se aclara que el mismo transformador eléctrico fue tomado durante la mañana al siguiente día y no presentaba dicho calentamiento excesivo. Este fue un claro ejemplo de un error humano.

1.3.2. Error sistemático

Este tipo de error se debe únicamente al instrumento de medición y el ambiente en el cual se usará. Hay de dos tipos: el error instrumental y el error ambiental.

1.3.2.1. Error instrumental

Es el causado por las características físicas y mecánicas del instrumento de medición. Hay muchas clases de este tipo de error y su mitigación depende del conocimiento que tenga el instrumentista.

Así, por ejemplo, si queremos utilizar un galvanómetro, la condición de que no debe haber fricción alguna en el mecanismo de agua es sumamente importante. Además, la memoria de elasticidad que tendrá el resorte dentro del mismo, conforme transcurra el tiempo puede llegar a provocar este tipo de errores.

1.3.2.2. Error ambiental

La única causa de este tipo de error sistemático son las condiciones ambientales en las que se encuentra envuelto el objeto. Estas pueden ser:

- Cambios de temperatura
- Humedad
- Presión barométrica
- Campos magnéticos
- Campos electrostáticos

Así, al conocer las condiciones del entorno podemos evitar que se reproduzca este tipo de error en nuestras mediciones. Muchas veces, el instrumento por sí ya trae consigo la protección ante estos problemas.

1.3.3. Error aleatorio

Este error es bastante problemático. No existe manera de clasificar o determinar cuáles son las principales causas que lo provocan. Además, luego de haber considerado los errores de grave y sistemáticos, siempre se presentan en las mediciones.

La mejor manera para disminuir considerablemente este error es realizar muchas muestras de medición y luego, por algún método estadístico, eliminar las no representativas u obtener una media, entre otros.

2. CIRCUITOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Los circuitos de tipo puente son usados comúnmente para realizar conversiones de medición de variables específicas. Esto quiere decir que con un circuito puente podemos medir la variación de resistencia en un circuito y obtener como salida una señal de voltaje.

Estos circuitos pueden detectar variaciones mínimas (y en algunos casos bruscas) en las que la variable de entrada sufre acondicionamientos repentinos de su señal. Existen dos tipos generales, los de tipo nulo y de deflexión.

Los puentes de tipo nulo son usados mayormente en aplicaciones de calibración de instrumentos. Los de tipo deflexión son usados en sistemas de control automáticos de lazo cerrado; es decir, que poseen realimentación, la cual beneficia al sistema al dar un mayor manejo a la variable controlada.

Con ellos se puede medir un extendido rango de variables, entre las cuales están:

- Inductancia
- Capacitancia
- Admitancia
- Conductancia
- Resistencia
- Cualquier otro parámetro relacionado a la impedancia

La ventaja de este tipo de circuitos es la extensa variación y diferencia entre cada uno. Hay un puente específico para medir capacitancia, otro para medir resistencia en alta frecuencia, otro para medir la conductancia de un material, entre otros.

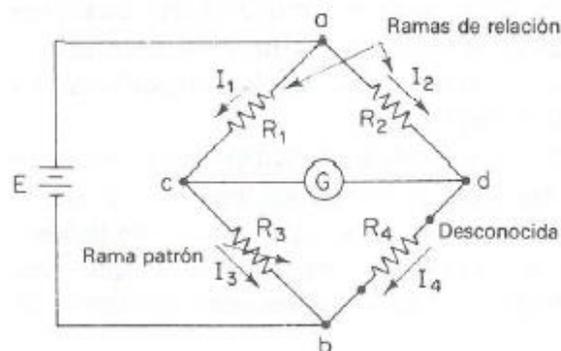
2.1. Mediciones con puentes de corriente alterna y directa

A continuación, se muestran las mediciones con puentes de corriente alterna y directa.

2.1.1. Puente Wheatstone

Es usado para medir resistencia desconocida en un circuito. Está conformado por cuatro resistencias, donde tres de ellas son conocidas. Necesita una fuente de alimentación, que usualmente es una batería, y de las terminales de medición, punto donde se obtiene la variación de voltaje del circuito.

Figura 4. Puente Wheatstone



Fuente: COOPER, William. *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*.

p. 102.

Se dice que el puente está en equilibrio cuando la caída de tensión en ambas ramas del puente es la misma. Esto último es útil para determinar la relación que existe entre las resistencias del puente, para que se encuentre balanceado. De esta manera, si el puente se encuentra en equilibrio, significa:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2$$

Lo cual indica que la corriente es la misma en ambas partes del circuito.

$$I_1 = I_3 = \frac{E}{R_1 + R_3}$$

$$I_2 = I_4 = \frac{E}{R_2 + R_4}$$

Así, procedemos a sustituir las dos ecuaciones anteriores de corriente en nuestra condición inicial del circuito, para determinar la condición de equilibrio en función de las resistencias.

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

$$R_1 R_4 = R_2 R_3$$

Por último, tomamos como nuestro valor de interés (la resistencia desconocida) una de las ramas del sistema. Así, obtenemos lo siguiente:

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

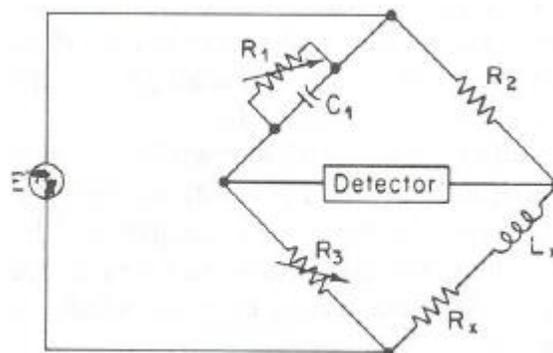
Donde sabemos que R_x es la resistencia desconocida, R_3 es la resistencia patrón y R_2 , R_1 son las resistencias de la rama de relación del circuito. Este es un puente de tipo nulo con excitación de corriente directa.

2.1.2. Puente Maxwell

Este puente es usado para medir una inductancia desconocida en función de una capacitancia conocida. Debido a que posee una rama con una resistencia paralela a una capacitancia, es considerablemente más sencillo escribir la ecuación de la inductancia a partir de las admitancias.

Además, este puente es específico para bobinas con Q medio ($1 < Q < 10$). No se puede mayor ni menor, debido a los problemas que posee de convergencia de equilibrio. En otras palabras, se debe analizar la condición de equilibrio, la cual establece que la suma de los ángulos de fase de un par de ramas opuestas debe ser igual a la suma de los ángulos de fase del otro par.

Figura 5. Puente Maxwell



Fuente: COOPER, William. *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*.

p. 117.

La ecuación general para equilibrio de un puente de corriente alterna es:

$$Y_1 Y_4 = Y_2 Y_3$$

Así, para establecer el equilibrio en un puente, se deben tomar en cuenta dos condiciones. La primera, que los productos de las magnitudes de las ramas opuestas deben ser iguales (ecuación anterior) y que la suma de las ramas opuestas debe ser iguales. Para encontrar la inductancia en el puente de Maxwell, se parte de que.

$$Z_X = Z_2 Z_3 Y_1$$

Donde cada uno de los términos de la igualdad significan:

$$Z_2 = R_2; \quad Z_3 = R_3; \quad Y_1 = \frac{1}{R_1} + j\omega C_1$$

Tras sustituir cada uno de los términos en la primera ecuación, obtenemos:

$$Z_X = R_X + j\omega L_x = R_2 R_3 \left(\frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \right)$$

Por último, se separan los términos reales e imaginarios y se obtiene que la resistencia de la bobina es:

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

Además, la inductancia dada por:

$$L_X = R_2 R_3 C_1$$

Tal y como se mencionó, este puente está diseñado para inductores con Q medio. Para las situaciones donde se requiera medir un inductor con características de Q alto se recomienda usar el puente Hay.

La diferencia constructiva de este puente, en comparación con el puente de Maxwell, es que este posee un capacitor en serie a la resistencia, en lugar del capacitor en paralelo conectado en una de las ramas del puente Maxwell.

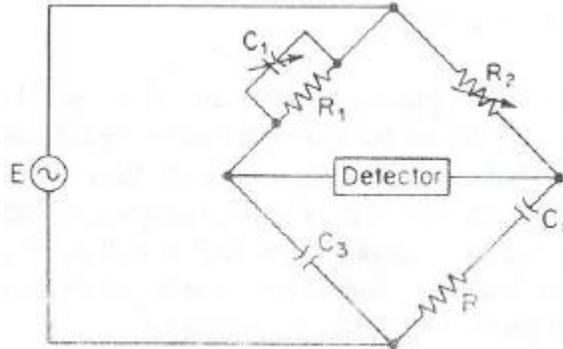
2.1.3. Puente Schering

Este tipo de puente es usado para realizar mediciones de capacitores en corriente alterna. De cursos de teoría electromagnética e introducción al análisis de circuitos eléctricos, sabemos que hay capacitores de:

- Cerámicos
- Plásticos
- Mica
- Electrolíticos
- De doble capa eléctrica
- Tantalio

Para esta aplicación, se usan comúnmente dos puentes Schering. Se pueden utilizar capacitores de mica de alta calidad para mediciones generales de trabajo. Este tiene pérdidas muy bajas, sin resistencias, y un ángulo de fase de aproximadamente 90° .

Figura 6. **Puente Schering**



Fuente: COOPER, William. *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*.
p. 121.

En cambio, para mediciones de aislamiento se debe usar un capacitor de aire. Este tiene un valor muy estable y un campo eléctrico muy pequeño; esto significa que el material por probar se puede conservar fuera de cualquier campo intenso. De nuevo, para encontrar la ecuación de la capacitancia, partimos de:

$$Z_X = Z_2 Z_3 Y_1$$

$$R_X - \frac{j}{\omega C_x} = R_2 \left(\frac{-j}{\omega C_3} \right) \left(\frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \right)$$

Luego de expandir y separar los términos reales e imaginarios, se obtienen las ecuaciones de la resistencia y capacitancia.

$$R_x = R_2 \frac{C_1}{C_3}$$

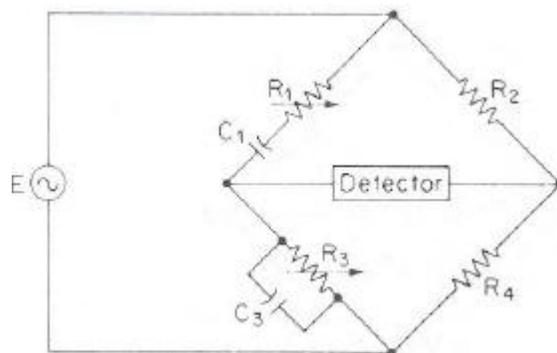
$$C_x = C_3 \frac{R_1}{R_2}$$

2.1.4. Puente Wien

Mayormente conocido para medir frecuencias, este circuito tiene distintas y diversas aplicaciones en la rama de la electrónica. Entre ellas, están las que se usan como analizador de distorsión armónica. En esta aplicación, su función es ser un filtro pasabanda, el cual puede determinar una frecuencia específica.

También es usado frecuentemente en los osciladores de audio y HF como el elemento que determina la frecuencia.

Figura 7. Puente Wien



Fuente: COOPER, William. *Instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición*.

p. 127.

Debido a su sensibilidad a la frecuencia, algunas veces presenta dificultades para tener un estado de equilibrio. Además, para facilitar el diseño de sus componentes, se toman las resistencias y los capacitores de igual valor; por tanto, la ecuación que define su comportamiento es:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

2.2. Acondicionamiento de señales

El sensado y control de distintas señales eléctricas es de mucha utilidad en cada una de las aplicaciones prácticas que se ven en el campo de ingeniería. En el caso de los sensores de tipo puente mostrados en las páginas anteriores, poseen ciertas complicaciones, ventajas y desventajas frente al uso que pueda dárseles.

Por tal razón, existe el caso de los sensores de tipo resistivo que se pueden aplicar a distintos modelos eléctricos de sensado. El análisis de los sensores resistivos es algo sumamente sencillo, lo cual los convierte en ejercicio práctico para investigar comportamiento de estos.

Para poder llevar a cabo la medición con los sensores resistivos es muy común requerir a circuitos de acondicionamiento de señal que sirven para tener una señal de medida adecuada a nuestra aplicación. Entre los circuitos de adquisición de datos para los sensores de uso común, están los siguientes:

- Potenciómetros
- Termistores
- RTD
- Galgas extensiométricas

Cada uno de estos sensores resistivos están basados en un principio básico de variación de resistencia. Este es definido por la siguiente ecuación:

$$R = R_0(1 + x)$$

La letra x representa el margen de variación de la resistencia, en porcentaje de 0 a 100,0 %. Según el tipo, características y material del sensor, el margen puede variar de distintas maneras. Para estas situaciones es donde se recurre a los circuitos de acondicionamiento donde podamos manipular el comportamiento de nuestro sensor.

Dicho lo anterior, se afirma que la ecuación indica la resistencia obtenida en las terminales de nuestro elemento resistivo, basado en el porcentaje de variación de este que puede ocurrir por cambios de temperatura, presión, velocidad, entre otros. Siempre debe tomarse en consideración que los sensores resistivos necesitan de alimentación eléctrica y que son afectados por fenómenos causados por ellos mismos, como el autocalentamiento.

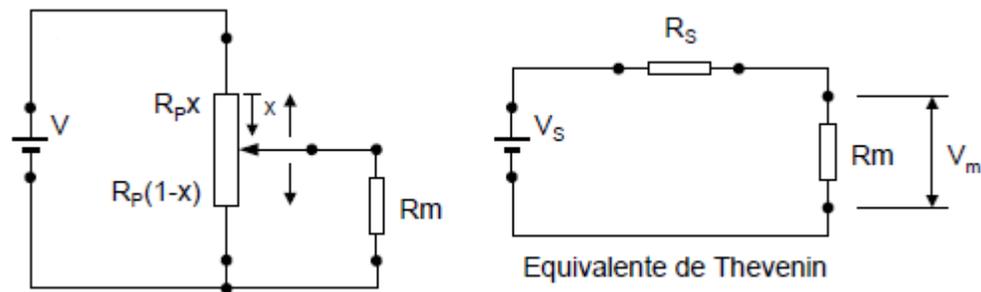
Con el fin de obtener una señal de medida adecuada en las terminales del sensor, se debe escoger, con base en la aplicación y dispositivo, el tipo de medida en las resistencias.

La primera opción es la medida de resistencias por deflexión. Este caso consiste en alimentar el sensor por medio de un divisor de tensión, que permite tomar la señal de medida en las terminales de una resistencia fija. La otra opción es la medida de resistencias por comparación, que implica tener dos divisores de tensión en un arreglo que se conoció anteriormente. Estos son los puentes.

2.2.1. Medición por deflexión

La medición por deflexión conlleva utilizar un divisor de tensión, compuesto por una fuente de alimentación de voltaje constante, una resistencia fija para referencia y una resistencia variable que lleva el papel como sensor resistivo.

Figura 8. Divisor de tensión



Fuente: GARCÍA, Juan. *Circuitos de acondicionamiento para sensores resistivos*. p. 4.

En la figura anterior, hay un divisor de tensión para potenciómetros, en donde la tensión de salida se ve afectada por la resistencia R_m , que es la impedancia de entrada de un voltímetro. Tras realizar un circuito equivalente de Thevenin, se obtiene un circuito eléctrico equivalente que depende de dos resistencias únicamente.

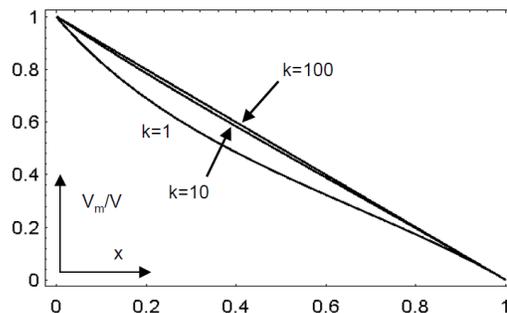
Así, para obtener las ecuaciones que modelan el comportamiento del sensor, basta con realizar la ley de voltajes de Kirchhoff. Se obtiene la resistencia equivalente del potenciómetro R_s , el voltaje equivalente de Thevenin V_s , el voltaje en las terminales del voltímetro V_m y la expresión k , que explicará posteriormente aplicaciones específicas de calibración.

$$R_s = R_p x(1 - x) \quad V_s = V(1 - x)$$

$$V_m = \frac{V(1 - x)}{\frac{x(1 - x)}{k} + 1} \quad \text{donde } k = \frac{R_m}{R_p}$$

Dado que nuestro objetivo principal es obtener una señal en la salida lineal, debemos analizar los valores de k que cumplan la linealidad entre la tensión de la fuente de alimentación, y la tensión que se percibe en los terminales del multímetro.

Figura 9. **Linealidad en mediciones por deflexión**



Fuente: GARCÍA, Juan. *Circuitos de acondicionamiento para sensores resistivos*. p. 4.

De la gráfica de linealidad, podemos observar que para valores altos de k , la salida de nuestro circuito medidor en los terminales del multímetro tiende a ser lineal, lo que significa que es de vital importancia utilizar equipos de medición con alta impedancia de entrada para que este no afecte nuestra señal de medida.

Entre los errores comunes se encuentran los ocasionados por los hilos de conexión y las fuentes de alimentación. Con respecto al último, es

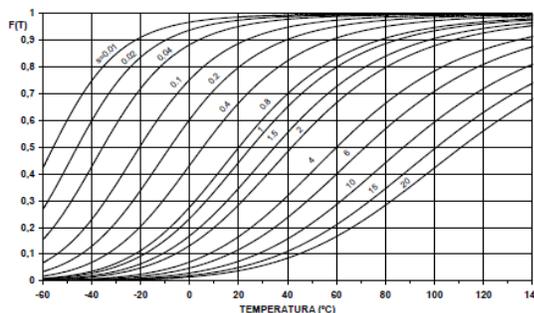
indispensable que las fuentes de alimentación sean de alta estabilidad y bajas derivas.

El error ocasionado por los hilos de conexión se evita al cual un circuito de medida de cuatro hilos que mejoran la tensión efectiva que se aplica al potenciómetro. Pese a que utilizar este recurso significa que los costos de la aplicación se eleven, transcurrido el tiempo se ve reflejado en los datos obtenidos de la aplicación.

2.2.1.1. Divisor de tensión en termistores

Una aplicación bastante recurrente es la medición de temperatura a través de termistores. Estos son pequeños dispositivos que varían su resistencia interna a través de semiconductores, según el comportamiento de la temperatura. El gran defecto de estos es que la salida no es lineal, por lo que requieren de un ajuste específico en su circuito para que la señal sea lineal, como se muestra abajo.

Figura 10. Medición con termistor



Fuente: GARCÍA, Juan. *Circuitos de acondicionamiento para sensores resistivos*. p. 4.

En el circuito divisor de tensión, la señal de salida para el voltímetro se obtiene de la resistencia fija. Además, el valor de s se obtiene a partir del rango de temperatura que se desea medir.

$$k = \frac{R_m}{R_p}$$

Tras obtener la variable s , se puede encontrar el valor de la resistencia fija para que la señal de salida de nuestro divisor de tensión sea lo más lineal posible. Se debe tomar en cuenta que la curva de temperatura anterior depende directamente del material en el que fue elaborado el termistor, por lo que se recomienda revisar previamente las fichas técnicas de cada fabricante.

2.2.2. Medición por comparación

Al principio de este capítulo se habló sobre ciertos circuitos de adquisición de datos que sirven día a día en la instrumentación eléctrica. Sentadas las bases tras el breve análisis que se realizó sobre los circuitos de medición tipo puente, es obligatorio continuar con el acondicionamiento de señal, enfocado a este tipo de sensor.

Tal como dice el nombre, los circuitos de medición tipo puente basan su funcionamiento en la diferencia de tensión creada entre dos divisores de tensión con las mismas características. En otras palabras, un puente de medición en equilibrio son cuatro resistencias (para configuración Wheatstone) conectadas entre sí, que no tienen diferencia de tensión entre las terminales de medida.

El primer análisis del puente de Wheatstone de este documento sirvió para determinar una resistencia fuera de equilibrio, en función de las otras que sí se

encontraban en equilibrio. Contrario a lo que necesitamos en esta parte, la ecuación que determina la tensión de salida, o desequilibrio del puente, es dada por:

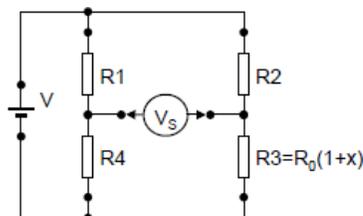
$$k = \frac{R1}{R4} = \frac{R2}{R0}$$

$$V_s = V \left(\frac{R3}{R2 + R3} - \frac{R4}{R1 + R4} \right) = V \frac{kx}{(k + 1)(k + 1 + x)}$$

Si $k+1$ es mucho mayor que x , se obtendrá a la salida del puente un valor lineal. Sin embargo, hay dos valores que son importantes pero contrarios en este análisis. Al aumentar el valor de k , obtenemos mayor linealidad en el sistema sacrificando la sensibilidad y viceversa.

Pese a ello, los instrumentistas se inclinan más hacia una respuesta por parte del sensor con mayor sensibilidad, por razones casi obvias. Una de estas razones es que un sistema con no tan buena linealidad puede ser corregido con los actuales autómatas programables que permiten una vasta configuración. En este caso, la linealidad nos sirve únicamente para tener una interpretación más fácil de los resultados obtenidos.

Figura 11. **Puente de Wheatstone variable**



Fuente: GARCÍA, Juan. *Circuitos de acondicionamiento para sensores resistivos*. p. 10.

2.2.2.1. Fuente de alimentación

Los dos tipos de corriente eléctrica que existen son la corriente alterna y corriente directa. Contrario a lo que se podría pensar, ambas señales resultan útiles según la aplicación y configuración en la que se esté usando el puente. Es común recurrir al tipo de alimentación de la fuente; ya sea fuente de tensión o fuente de corriente, cada una tiene sus características principales.

La alimentación que se utiliza con mayor frecuencia es la fuente de voltaje de DC, dado que posee mayor versatilidad y sencillez en la resolución de problemas. La principal desventaja es que cuando se utilizan fuentes de voltaje, la linealidad del sistema de medición es inversa a la sensibilidad.

Al alimentar un circuito tipo puente con una fuente de corriente, también se obtiene una función de transferencia no lineal en el sistema, que se puede corregir mediante acondicionamiento de la señal.

Una de las ventajas principales es que una fuente de corriente causa que la linealidad y sensibilidad del sistema sean dos magnitudes proporcionales. Estas aumentan conforme la razón de k crece. El problema radica en que no es fácil conseguir una fuente de alimentación de corriente de los requerimientos, valores ni estabilidad necesaria. Claro, siempre puede ser una opción de circuito integrado la solución, siempre y cuando se tome en cuenta todas las consideraciones.

2.2.3. Calibración de puentes sensores

Tal y como se explicó en uno de los incisos anteriores, la sensibilidad y la linealidad de un puente de Wheatstone es una variable importante que se debe conocer y manipular a nuestra conveniencia.

Si es de nuestro interés calibrar el puente de medición, es necesario saber exactamente el valor de sensibilidad del arreglo de resistencias. Muchas veces, determinar la sensibilidad se vuelve en una tarea difícil, pues el sensor y el puente puede venir en un mismo encapsulado.

Cuando se presenten estas ocasiones, basta con tener una resistencia que nos servirá como resistencia de calibración.

El primer paso es ajustar nuestro puente de medición de tal manera que el voltaje diferencial entre ambos divisores de tensión sea igual a 0. Este valor significa que el puente se encuentra en un estado de equilibrio.

Posteriormente, se debe conectar la resistencia de calibración a las terminales de nuestro sensor. Estas terminales son dos. La primera puede ser un punto de referencia del puente o la tierra, y la otra terminal será la toma de medida del voltaje diferencial de ambos divisores, justo la que está conectada al sensor.

Una vez conectada la resistencia de calibración, el sensor interpretará esta nueva resistencia como una variación de x , lo que será un fenómeno completamente normal. Gracias a ello, determinar la sensibilidad con respecto de x no es una tarea complicada, siempre y cuando se suponga un comportamiento lineal del circuito.

La sensibilidad queda de la siguiente manera:

$$S = \frac{V_s}{x} = -V_s \left(1 + \frac{R_c}{R_0} \right)$$

De la ecuación anterior, cada una de las variables son conocidas. El valor de la resistencia de calibración se puede medir previamente con un ohmímetro; la resistencia inicial o subíndice 0 se puede determinar de dos maneras. La primera es buscar en la hoja de fabricante dicho valor, y la otra consiste en usar un ohmímetro de nuevo que, sencillamente, determinará el valor sin ninguna variación inicial o, en otras palabras, en estado de equilibrio.

2.2.4. Compensación y medidas diferenciales

La versatilidad de la medición y sensado por puentes no solo radica en los tipos de alimentación ni en la amplia cantidad de sensores y materiales de fabricación distintos; parte de la versatilidad se encuentra en la cantidad de conexiones que existen.

Las galgas extensiométricas (dispositivos que se analizarán en el siguiente capítulo) permiten muchas posibilidades en un puente, según la posición y el número de ellas que se coloquen.

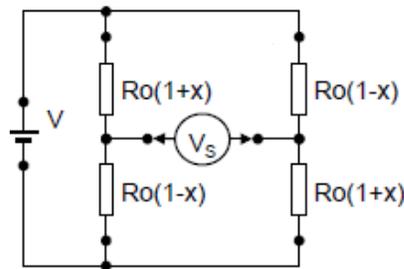
Además, cuando se añaden galgas extensiométricas, la linealidad del sistema aumenta considerablemente. Por ejemplo, cuando se colocan dos sensores en la rama derecha o izquierda del puente, la tensión de salida se define por la siguiente ecuación:

$$V_s = V \frac{x}{2}$$

Estos dos sensores agregados a una de las galgas deben ser de signo opuesto para que la linealidad se cumpla. Si se escoge un arreglo de galgas extensiométricas como el de la figura, se obtiene una expresión lineal que no requiere de ningún tipo de aproximaciones.

$$V_s = Vx$$

Figura 12. **Puente de galgas extensiométricas dobles**



Fuente: GARCÍA, Juan. *Circuitos de acondicionamiento para sensores resistivos*. p. 10.

De nuevo, en este tipo de circuito tipo puente es de vital importancia que las galgas extensiométricas sean de signos puestos, dado que si ocurre lo contrario, la sensibilidad pudiera ser comprometida.

En este tipo de circuito, la compensación se da al máximo pues en circuitos donde solo hay un sensor, cuando ocurren cambios bruscos de temperatura, este agrega errores de calibración al sistema. En este caso, si se presentan cambios bruscos de temperatura, no afecta la calibración del puente, ya que la compensación ocurre directamente en cada una de las galgas extensiométricas y anula los efectos.

2.2.5. Alimentación del puente

Según las ecuaciones de los puentes de medición, se ha observado que la tensión diferencial que existe entre ambos divisores de tensión (V_s) es directamente proporcional a la tensión de alimentación del puente. Por tal razón, se debe seleccionar el circuito de voltaje del circuito con sumo cuidado.

Uno de los dispositivos que se usan erróneamente son los reguladores de tensión monolíticos, los cuales presentan derivas térmicas y baja estabilidad ante aplicaciones comunes y sencillas.

Los dispositivos que sí son los indicados para la alimentación de los circuitos de medición tipo puente son los llamados referencias de tensión. Este tipo de fuentes de alimentación sacrifican un porcentaje del voltaje de entrada, con el único fin de tener a la salida una tensión con un valor menor pero que presenta gran estabilidad y muy bajas derivas.

Las referencias de tensión manejan corrientes de salida muy bajas, por lo que siempre la corriente será suministrada por la fuente de alimentación principal, que no es estable.

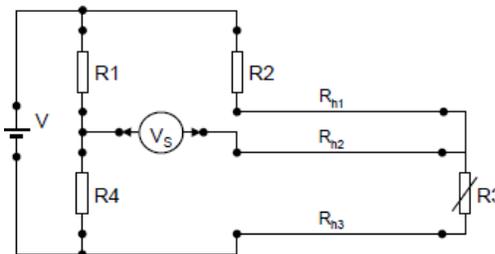
2.2.5.1. Hilos de conexión

Un problema recurrente en los sistemas eléctricos es la caída de tensión que se presenta en largas y medianas distancias de cable de una instalación. Esta es producida en su mayoría por la resistencia que tienen los alambres de conexión, que mientras más extensos sean, mayor será la caída que presenten.

No es distinto en los sensores de tipo puente. Los cables de conexión que hay entre las terminales añaden resistencia y caída de tensión al arreglo de resistencias. Si a este fenómeno se le toma en cuenta el coeficiente de incremento de temperatura en los cables de tipo cobre, el problema se expande y la medición será errónea.

Para disminuir este tipo de error, se puede utilizar el método de conexión Siemens, también conocido como método de los tres hilos. Este consiste en repartir la resistencia de los cables al 50,0 % entre cada una de las resistencias de un lado del puente, para que ambas puedan experimentar las mismas variaciones térmicas.

Figura 13. **Conexión de los tres hilos**



Fuente: GARCÍA, Juan. *Circuitos de acondicionamiento para sensores resistivos*. p. 10.

La conexión son tres hilos que tienen el principal punto de conexión en el sensor. De estos tres, uno se conecta a la referencia o tierra; otro cable se conecta a una de las terminales de R2 y el cable restante se conecta una de las terminales del voltaje diferencial.

2.2.6. Tensión de salida

La tensión de medida entre los divisores de tensión es de magnitud muy baja, por lo que requiere el uso de un amplificador diferencial para manipular y operar la señal de una mejor manera.

No obstante, el uso de esta configuración de amplificador representaba serios problemas debido al rechazo de modo común que deterioraba los incrementos de magnitud fuera de lo normal.

Los problemas ocasionados fueron motivo para el desarrollo de los amplificadores de instrumentación, que tenían características muy propias y adecuadas para su uso en aplicaciones de medición y control. Entre las características que poseen, se encuentran:

- Ganancia diferencial precisa y estable
- Rechazo en modo común (CMRR) alto
- Impedancia de entrada alta para no ser afectada por la fuente
- Impedancia de salida baja para no ser afectada por la carga
- Bajo nivel de las tensiones y corrientes de *offset* (desequilibrio)
- Factor de ruido próximo a la unidad
- Anchura de banda ajustada

Una de las principales ventajas del uso de los amplificadores de instrumentación es la facilidad con la que se puede controlar la ganancia. Tomando en cuenta esto último, la configuración y parametrización de un sensor tipo puente o de divisor de tensión, las señales de salida son fácilmente manipulables para ser interpretadas en un autómata programable o algún dispositivo similar.

3. **SENSORES Y SU FUNCIONAMIENTO**

Desde pequeños, todos teníamos las cualidades típicas de un instrumentista. Éramos y seguimos siendo meticulosos, dado que cualquier objeto nos causaba curiosidad e intriga; en fin, buscábamos entender ese mundo en el que vivíamos. En ese momento recién empezaban a madurar nuestros sentidos. El sentido de la vista, el tacto, del oído, del paladar y del olfato. Desde ahí, ya podíamos medir objetos y pequeñas estructuras que estaban a nuestro alcance.

Así, es fácil si comparamos esas situaciones de infancia con las situaciones actuales en una industria en específico. Ahora, queremos medir de nuevo un parámetro como caudal o temperatura, con cierto grado de exactitud y precisión. Y entre tantas aplicaciones, algunas son similares a las características que teníamos en esos años anteriores.

Por ejemplo, a través de un sensor fotoeléctrico podemos determinar la presencia de un objeto, de una manera muy rápida y efectiva. Claro, siempre tomando la mayor cantidad de consideraciones técnicas y parámetros, entre los cuales algunos fueron explicados en el capítulo 1.

Definiremos a un sensor como un dispositivo eléctrico y/o mecánico capaz de medir una variable física en el ambiente. Luego, a través de un transductor, podemos amplificar o convertir el parámetro de entrada en un valor que la máquina con la que estamos trabajando pueda entenderlo. Aquí se describe ambos términos, sensor y transductor, que usualmente tiende a referirse a lo mismo.

El sensor es el dispositivo que recibe una variación física de un parámetro como la señal de entrada. Al otro lado de este, obtenemos en la salida una señal específica que significa para nosotros una variación, mas puede que aun no sea entendible por una computadora.

Existe el caso de un sensor de temperatura básico, sencillo. Cuando a este se le aplica un cambio de temperatura, en las terminales de salida del sensor podríamos medir una variación de la resistencia. A primera instancia, nosotros sabemos que hubo un cambio de temperatura gracias al aumento o disminución de la resistencia. Sin embargo, esta variación de resistencia no es fácilmente aplicable en la industria.

La función del transductor en el ejemplo anterior es convertir esa señal de salida (ohms) en una señal puramente eléctrica y estandarizada. Esto significa que, si obtenemos una señal eléctrica, podríamos visualizar mejor los cambios de temperatura en un dispositivo de control, como un PLC (controlador lógico programable). Además, estos controladores necesitan una señal estandarizada para su correcto funcionamiento. Uno de los valores eléctricos estándar es una señal de 4 a 20 mA y 0 a 10 V.

Entre los parámetros físicos que se miden frecuentemente son:

- Temperatura
- Humedad
- Presión
- Posición
- Movimiento
- Caudal
- Corriente

- Aceleración

Los ejemplos anteriores solo son unos cuantos del total de aplicaciones que existen, ya que actualmente son muchas las variables físicas, químicas y mecánicas que se pueden sensor.

3.1. Sensores de temperatura

Los dispositivos de medición de temperatura son actualmente de los más usados en las aplicaciones industriales. Tal es el grado de uso, que no existe ninguna industria la cual no tenga un sensor de temperatura en ella. La causa de su uso radica en que no solo se necesita controlar o seguir un proceso tomando en cuenta la temperatura, sino que también en muchas situaciones la temperatura incide indirectamente en alguna máquina que sea parte de algún procedimiento específico.

3.1.1. Termopares

La medición con este sensor está basada en el comportamiento del metal a distintas temperaturas. Cuando se unen dos placas metálicas, estas generan una diferencia de tensión entre ellas debido a su comportamiento eléctrico.

De ahí viene el nombre con que se les conoce, como sensores de temperatura bimetalicos. Poseen una estructura simple, la cual beneficia que sea un tamaño reducido para aplicaciones específicas. Además, una de sus principales ventajas es la linealidad que poseen con respecto al voltaje en las terminales.

Sin embargo, la diferencia de potencial medible en las terminales de un termopar es muy baja, por lo que se requiere un dispositivo transductor que amplifique dicha señal, electrónicamente u analógicamente, para que pueda ser usada correctamente en un dispositivo controlador. Un ejemplo de estos dispositivos es el transmisor de termopar o termocopla marca *Schneider-electric* RMTJ80BD.

La sencillez de este transmisor ayuda a que podamos seleccionar qué rango de tensión o corriente normalizada deseamos a nuestra salida. Una tensión de 0 a 10 V o una corriente de 4 a 20 mA; son las opciones que se pueden escoger. Con respecto a las opciones de termopar en el mercado, hay muchas variedades, que van a depender estrictamente del rango de temperatura que deseamos medir.

Como ejemplo, el termopar marca FLUKE 80PK-11 tipo K permite un rango de medida de -30° a 150°C , lo suficiente para una aplicación de sensado industrial.

Figura 14. **Termopar**



Fuente: CREUS, Antonio. *Instrumentación industrial*. p. 103.

Otra de las características principales de este sensor es que algunos ya traen una carátula con una aguja, por lo que facilita al operador determinar cuál es la temperatura de una máquina determinada.

3.1.2. Sensores RTD

Por sus siglas en inglés, *resistance temperatura detector*, son básicamente resistencias que varían en función de la temperatura que están soportando. Son más conocidas como PT100.

El material del cual está hecha la resistencia tiene un coeficiente de temperatura de resistencia, el cual indica, a una temperatura específica, la variación de la resistencia en ohmios del conductor por cada grado que cambia su temperatura. Se puede entender más fácil a partir de la ecuación:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t)$$

de donde R_0 es la resistencia en ohmios a 0°C

R_t es la resistencia en ohmios a t°C

α es el coeficiente de temperatura de la resistencia cuyo valor entre 0°C y 100°C es de 0.003850 $\Omega/(\Omega/^\circ\text{C})$ en la Escala Práctica de Temperaturas Internacional (IPTS-68).

Actualmente, ya existe software para determinar con mayor exactitud que valor de resistencia se necesita en la sonda. Tal y como se observa, la variación de la resistencia no es meramente lineal, lo que puede afectar en nuestra aplicación.

Tabla I. Rangos de temperatura de un RTD

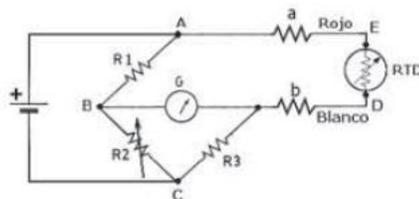
Material	Rango de temperatura (°C)	Variación (%/°C a 25°C)
Platino	-200 a 850	0,39
Níquel	-80 a 320	0,67
Cobre	-200 a 260	0,38
Níquel-acero	-200 a 260	0,46

Fuente: MAYNÉ, Jordi. *Sensores acondicionadores y procesadores de señal*. p. 4

Los sensores de temperatura RTD también son conocidos como termistores, y son fabricados de listones de material semiconductor que se fabrica a partir de óxidos del grupo de metales del hierro, tales como el cromo, cobalto, manganeso y níquel.

ABB es una marca altamente reconocida en el sector eléctrico por sus soluciones eficaces. Desde subestaciones GIS hasta sensores de temperatura, tiene un amplio catálogo de productos. El sensor RTD catálogo IMZ4897 es uno de los más usados, que aseguran una variación exacta si las condiciones previas son seleccionadas correctamente. El modo de conexión que se muestra a continuación es de 2 hilos; sin embargo, mientras más hilos tenga, mayor será la estabilidad de la medición.

Figura 15. Sensor RTD



Fuente: CREUS, Antonio. *Instrumentación industrial*. p. 248.

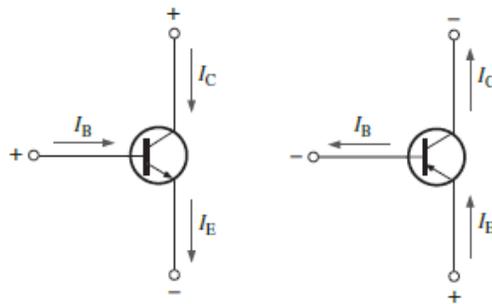
3.1.3. Sensores de temperatura semiconductores

Estos se basan en el principio del diodo, que tiene una unión polarizada directamente p-n. En esta capa, la conducción se da a partir de la corriente en el mismo.

Dado que la corriente responde de manera directa, la tensión también tendrá su respuesta igual, inversa a la temperatura. Así se puede determinar que si hay una corriente constante, la tensión varía $-2,2$ mV por cada grado centígrado ($^{\circ}\text{C}$). Además, no se utiliza un diodo, sino que es la unión de la base-emisor de un transistor bipolar.

Este tipo de sensores tienen una de las principales ventajas con respecto a los otros: son exactos, baratos y pequeños. Por tanto, la aplicación en proyectos de bajo presupuesto no requiere una inversión sumamente grande en dispositivos de medición de temperatura.

Figura 16. Corrientes en transistores



Fuente: FLOYD, Thomas. *Dispositivos electrónicos*. p. 167.

Otra de las ventajas de este tipo de sensores es su versatilidad. Dado que requieren de transistores de unión bipolar para su correcto funcionamiento, se debe verificar el tipo de polarización del sensor; las opciones son npn o pnp. Previo al diseño de una aplicación real con estos dispositivos, se sabe qué tipo de controlador lógico programable (PLC) será el encargado de recibir las señales del sensor.

Tras saber el tipo de controlador, se debe verificar si la polarización del sensor es compatible con las E/S del autómatas. Si esta es incorrecta, el sensor puede dañar severamente las conexiones de entrada del controlador.

Esta última verificación debe realizarse para cualquier tipo de sensor con salida transistorizada, como comúnmente se conoce. De lo contrario, el instrumentista o el ingeniero de procesos se expone a sufrir las consecuencias por malas prácticas de ingeniería.

En la industria de sensores, los de este tipo requieren de un espacio físico de instalación reducido, dado que el circuito se encuentra en un encapsulado. Usualmente son de bajo consumo y exactos. Los sensores de temperatura con semiconductores STMicroelectronics poseen rangos similares a los de un termopar. El sensor STLM20 es de tipo análogo, con rango de medición de -55° a 130°C . El consumo máximo de energía de este sensor es de $8,0\ \mu\text{A}$.

3.2. Sensores de posición

En la industria existen distintos tipos de sensores de posición que nos ayudan a determinar la condición actual de un objeto. Aplicaciones simples como la de saber si hay un objeto presente o no en una banda transportadora,

hasta poder determinar cuál es la posición angular de una máquina u herramienta rotatoria.

El rango de aplicación de estos sensores depende únicamente del instrumentista, pues él sabe cuál es el alcance internamente que un sensor puede entregar en una aplicación determinada.

3.2.1. Rotativos

Este tipo de instrumentos de medición nos ayudan determinar la posición angular de un objeto, con vasta exactitud. Están basados en el principio de inducción magnética de Faraday; dado a su similitud con un motor de inducción, también es conocido como sensor de transformador rotativo.

3.2.1.1. Estructura de un sincro

Este es un transductor electromagnético rotacional capaz de detectar el movimiento angular de un objeto. El sensor es el precursor del resolver, pues las características constructivas del sincro requieren mayor inversión.

Su composición esta dada por un estator fijo y un rotor giratorio, en el que en este últimos se conecta la señal de entrada, voltaje alterno de referencia, a través de escobillas exteriores.

En el lado del estator, se obtiene la señal de salida gracias a un devanado conectado en estrella. Los bobinados del estator tienen un desfase en cada una de las bobinas de 120° para que pueda existir una salida trifásica. El voltaje inducido en el estator es proporcional al seno del ángulo de rotación entre el eje de la bobina del rotor y el eje de la bobina del estator.

3.2.1.2. Estructura de un resolver

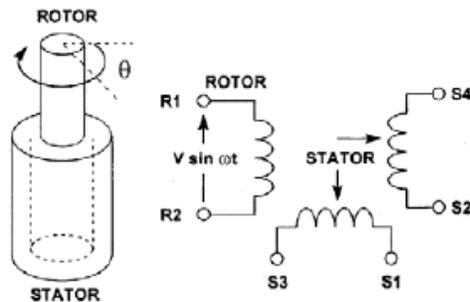
De nuevo, este es otro tipo de sensor rotacional que detecta los cambios electromagnéticos a través de sus características. En la actualidad sustituyeron a los sincros, pues un resolver es más económico y simple, además de que ya no tienen escobillas, por lo que no existe tanto desgaste mecánico en este tipo de elemento a los que no tienen escobillas, es común llamarlos *brushless*.

Contrario al sincro, en este la señal de referencia con una amplitud y desfase específico se inyecta en las terminales del estator (devanado primario).

Luego de una revolución, se induce un voltaje en el rotor que tras otras revoluciones induce un voltaje en el estator, solo que en dos devanados coseno y seno que son conocidos como el devanado secundario. Su uso es muy común; por tanto, ya hay sensores con mediciones estandarizadas, entre las cuales están:

- Señales de 11,8 V rms entre líneas, referencia 11,8 V rms, frecuencias entre 400 Hz a 10 000 Hz.
- Señales de 26 V rms entre líneas, referencia 26 V rms, frecuencias entre 400 Hz a 10 000 Hz.
- Señales de 11,8 V rms entre líneas, referencia 26 V rms, frecuencias entre de 400 Hz a 10 000 Hz

Figura 17. Diagrama de un resolver



Fuente: MAYNÉ, Jordi. *Sensores acondicionadores y procesadores de señal*. p. 24.

Los resolver se basan en principios electromecánicos; por tanto, su comportamiento y las señales de salida son análogas. Bajo las mismas características se tienen los *encoders*, que a diferencia de los primeros, trabajan con señales digitales. Las señales de salida se mandan a través de un tren de pulsos, por lo que la medición es más exacta. Estos se analizarán en las páginas siguientes.

3.2.2. Resistivos

Los sensores de medición de posición del tipo resistivos son comúnmente llamados sensores potenciométricos. La principal desventaja con respecto a los demás es que se trata de un sensor puramente mecánico. Se utiliza una señal de referencia DC estable para obtener una salida proporcional al ángulo del eje.

Para estos sensores hay que tomar en cuenta la fricción entre la resistencia y el cursor de nuestra aplicación. En función de la cantidad de maniobras que deseemos medir, es la cantidad de vida útil que tendrá el dispositivo de medición.

Entre los elementos que más se utilizan para la elaboración de los sensores potenciométricos están:

- Carbón

Uno de los materiales más usados, principalmente por su bajo precio. Sin embargo, la vida útil y las variaciones de temperatura que no puede soportar continuamente lo desacredita.

- Cemet

Es la simple combinación entre un cerámico y un metal. Al compararlo con el carbón, podemos tener una mejora notoria con este último.

- Bobinado

Posee alto tiempo de vida mecánica, un bajo coeficiente de variación de temperatura, alta disipación y estabilidad en el tiempo.

- Plástico conductor

Este tipo de material mejora relativamente cada una de las características anteriores. No obstante, el precio es muy elevado.

La serie 309/409 de la marca Honeywell son sensores potenciométricos de tipo cemet que posee un cuerpo compacto y terminales externas útiles para ser soldadas en casi cualquier lugar. Estos son de bajo costo y presentan alta estabilidad a las variaciones de temperatura. Poseen una potencia nominal de 1 W, con una resistencia de 100 ohms.

Figura 18. **Sensor potenciométrico**



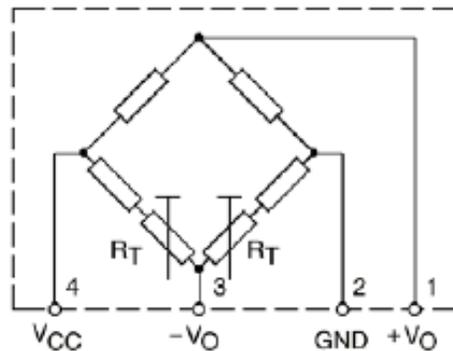
Fuente: *Sensor potenciométrico*. sensing.honeywell.com. Consulta: marzo de 2018.

3.2.3. **Magnéticos**

También llamados sensores magnetorresistivos, basan su funcionamiento en el efecto que lleva el mismo nombre, efecto magnetorresistivo. Este principio indica que cuando hay un material ferromagnético al cual se le modifica el campo magnético externo, el material cambiará de resistividad. Así, esta variación de resistividad puede ser utilizada para amplificarla y luego controlar algún elemento en específico.

Una manera de construir este tipo de sensor es mediante el uso de un puente Wheatstone. Al utilizar 4 resistencias magnetoresistivas, cada una de ellas colocadas en una de las ramas del puente en equilibrio, podemos duplicar la señal y reducir la deriva por el error ambiental que podría ser causado por las condiciones ambientales.

Figura 19. **Puente magnetorresistivo**



Fuente: MAYNÉ, Jordi. *Sensores acondicionadores y procesadores de señal*. p. 31.

En la figura, se observa que se agregaron dos resistencias sin ninguna característica especial; no obstante, son útiles para ajustar el *offset* casi a cero durante el proceso de producción.

Este tipo de sensor posee muchas ventajas con respecto a los otros. Entre ellas, que no hay contacto físico entre el sensor y el elemento que estamos midiendo, lo que significa que no habrá desgaste, ni fricción entre un elemento y el otro, lo que preserva la vida útil del mismo.

Además, es económico, con una respuesta rápida ante los cambios repentinos de campo magnético. Puede ser usado en ambientes hostiles donde las condiciones ambientales no son las más favorables y también posee un amplio rango de frecuencias de funcionamiento. El sensor HMR2300 de Honeywell es robusto y con bajos requisitos de alimentación para los cuales es requerido.

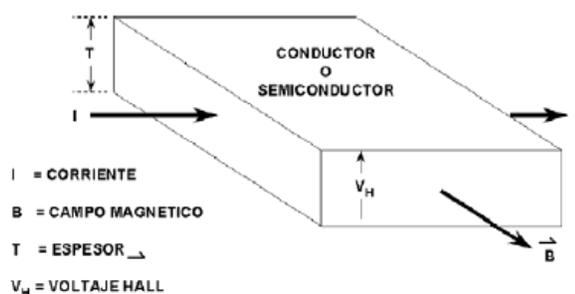
Debido a su alta sensibilidad, estos son usados en muchas aplicaciones industriales y cotidianas. Uno de los principales efectos es el control de tráfico automovilístico en una ciudad, donde a diario transcurren automóviles, motocicletas, camiones, bicicletas, entre otros.

3.2.4. De efecto Hall

El sensor de efecto Hall es un dispositivo de medición magnético, pero con un principio de funcionamiento muy distinto al magnetorresistivo. Este sensor parte del fenómeno del voltaje de Hall, que ocurre en materiales conductores y semiconductores.

Cuando en un material conductor o semiconductor fluye un diferencial de carga, significa que hay una corriente. Si en este material se aplica una densidad de campo magnético perpendicular a la corriente del conductor o semiconductor, gracias a la ley de la Fuerza de Lorentz se va a ejercer una fuerza desviadora que provocará una diferencia de potencial perpendicular a la corriente y al campo magnético.

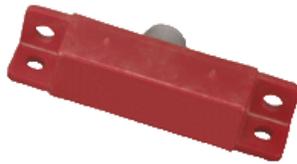
Figura 20. Efecto Hall



Fuente: MAYNÉ, Jordi. *Sensores acondicionadores y procesadores de señal*. p. 37.

De este modo, obtenemos en las terminales del material una diferencia de potencial que es proporcional a la densidad del campo magnético, y la polaridad de esta va a depender del sentido de la corriente.

Figura 21. **Sensor de efecto Hall**



Fuente: pepperl-fuchs.com. Consulta: marzo de 2019.

El sensor indicado arriba es uno en sus presentaciones más simples. Del catálogo 40FY36-33, tiene una salida de dos hilos en corriente alterna. Esta va del rango de 93 a 132 VAC. El único problema es que la histéresis puede llegar a ser muy alta; la histéresis máxima es de 25,0 %.

3.2.5. Ópticos

A continuación, se muestran los sensores ópticos.

3.2.5.1. Interruptores

Los sensores fotoeléctricos de tipo interruptor son útiles cuando la velocidad de medición debe ser casi instantánea. Además, tienen la ventaja que pueden llegar a medir variaciones a una distancia de 300 metros.

Estos dispositivos son sensores ópticos de tipo haz transmitido, pues necesitan que la fuente y el receptor estén separados, y permiten grandes

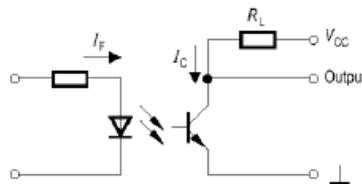
distancias de separación como las anteriores. El requerimiento para que pueda ocurrir la medición, es que el alineamiento entre ambas partes debe ser el correcto; cualquier fenómeno de vibración no evaluado previamente puede interferir en la señal recibida por el receptor.

Otras de las consideraciones que se deben tomar en cuenta son:

- Características del objeto por detectar (forma, tamaño, opacidad)
- Condiciones ambientales del lugar
- Suministro de energía
- Instalación (espacio de montaje, conexiones, choque o vibración)

Contrario a los sensores fotoeléctricos de tipo reflectivos, los de tipo interruptor no pueden verificar la presencia de objetos transparentes dado que muchas veces el haz de luz podría reflejarse en el objeto que se va a medir y el receptor ya no recibiría la señal adecuada.

Figura 22. Diagrama de sensor óptico



Fuente: MAYNÉ, Jordi. *Sensores acondicionadores y procesadores de señal*. p. 38.

Como se puede deducir en el diagrama eléctrico, este tipo de sensor requiere un amplio margen de trabajo. Este último término se refiere a la cantidad de luz que incide en el receptor para que el interruptor se active. Si la

luz no es suficiente o si el entorno que atraviesa el haz de luz está contaminado, el margen se daña y podría nunca activarse el interruptor.

Figura 23. **Interruptor fotoeléctrico**



Fuente: *Interruptor fotoeléctrico. se.com*. Consulta: 18 de marzo de 2019.

Los sensores ópticos también tienen salida a relé. Se diferencian de los anteriores en que la tensión de conmutación que se puede tener en las terminales de salida es mucho mayor que las de salida transistorizada. Los sensores ópticos con salida de transistor son versátiles en el uso de controladores PID debido a sus cambios de tensión y corriente. En cambio, un sensor de salida a relé, es útil en aplicaciones donde la conmutación sea importante.

El sensor que se muestra en la figura 23, es de la gama OsiSense XU de Shneider-Electric, los cuales se caracterizan por ser de uso simple en aplicaciones industriales. Con catálogo XU5M18MA230, puede tener alimentación en corriente alterna y directa. El rango máximo de medición es de 0,6 m, y mínimo de 0,4 m. Una de las principales ventajas de estos dispositivos, es la velocidad de respuesta, siendo menores a los 20 ms.

3.2.5.2. Reflectivos

Este tipo de sensores tienen bastante similitud con los sensores fotoeléctricos de tipo haz transmitido. Son un par de diferencias las que los distinguen.

La primera diferencia es que el emisor y receptor de luz se encuentran en el mismo plano de superficie del dispositivo; sin embargo, este tipo requiere un reflector del otro lado para que la señal transmitida sea reflejada.

Enlazada a la característica anterior, este tipo de sensor no necesita estar enviando el haz de luz cada cierto tiempo. Basta con enviar la señal de luz constantemente, sin interrupción, y cuando esta se deje de percibir en el receptor indicará que hubo un cambio o que se detectó un objeto. Este dispositivo sí es fácil de alinear.

De nuevo, la marca Schneider-Electric posee este tipo de sensores en la misma línea. El funcionamiento, las características e inclusive los precios son similares, a excepción del catálogo y que incluyen un reflector cuadrado, circular, o según la medida que se necesite específicamente. Un sensor fotoeléctrico reflectivo comúnmente usado es el XU9M18MB230. La distancia máxima de selección son 3 m, con salida de estado sólido y alimentación en corriente directa y corriente alterna.

3.2.5.3. Encoder

De manera general, un encoder es un dispositivo, circuito, programa de software o hasta una persona cuyo objetivo es convertir información de un formato a otro con el propósito de estandarización, velocidad, etc. Dentro de la

ingeniería y la instrumentación, su función es la de convertir el movimiento mecánico (giros del eje) en pulsos digitales.

Este movimiento mecánico es convertido en pulsos digitales gracias a un disco, hecho de plástico o vidrio que posee ranuras transparentes y opacas que codifican la rotación. Existen dos tipos de encoder.

- Encoder incremental

Como su nombre lo indica, se basa en el incremento de rotaciones que tiene el disco codificado a través del tiempo, desde la posición cero. El punto cero de medición ocurre tras cada revolución del disco.

Lo anterior quiere decir que si necesita saber la posición de un eje, por ejemplo, requiere analizarse el valor de segmentos que se contaron a través de un sensor óptico, conforme el disco estuvo girando. Este valor es guardado en la memoria del sensor.

- Encoder absoluto

El encoder de tipo absoluto permite saber la posición del disco en cualquier instante de rotación; por tanto, no requiere dar una revolución para determinar el punto cero de medición.

Según la aplicación, este último puede llegar a ser más costoso porque necesita varios sensores ópticos que analicen el disco constantemente. Además, requieren de una codificación en la carátula del disco.

La figura siguiente, un encoder de tipo incremental posee características de nivel industrial que lo distinguen entre otros competidores. Con catálogo

MNI40N-0T01DY41N-01000 Pepperl+Fuchs, que cuenta con una herramienta de autodiagnóstico completo, alta resistencia a la suciedad, resistente a impactos térmicos y mecánicos. El control se realiza mediante la exploración magnética con un número aproximado de 1 000 pulsos como señales. La tensión de trabajo es de corriente continua.

Figura 24. **Encoder incremental**



Fuente: Encoder incremental. pepperl-fuchs.com. Consulta: 23 de marzo de 2019.

3.3. Sensores de presión

También conocidas como células de carga, las galgas extensiométricas son células que se estiran o encogen según el peso que tengan aplicado en ellas. Son uno de los métodos más usados en la medición de cargas mayores a 1 000 Kg y tienen bastante sencillez con respecto a su funcionamiento.

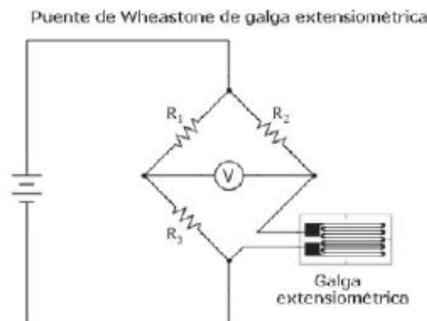
El principio se basa en una célula con una pieza de módulo de elasticidad conocido. Dicho valor sirve para conocer las limitaciones físicas de medición. Esta célula se encuentra cementada en una galga extensiométrica que posee varios hilos o bandas de algún material conductor.

Cuando se aplica peso a la galga extensiométrica, esta se deforma y su módulo de elasticidad cambia, ergo la resistencia de los hilos o bandas también

serán modificadas ya que, según la fórmula de resistividad, la longitud es directamente proporcional a la resistencia.

Al colocar las galgas extensiométricas en un puente de Wheatstone, tal y como se observa en la figura de abajo, este sale del punto de equilibrio y se percibe una tensión diferencial entre ambos divisores de tensión. Algo característico de estos circuitos de puentes es que la salida de las galgas tiene muy baja corriente; por tanto, es usual requerir a circuitos de amplificación para que puedan percibirse dichos cambios.

Figura 25. **Diagrama de una galga extensiométrica**



Fuente: CREUS, Antonio. *Instrumentación industrial*. p. 321.

Tal y como se explicó en el capítulo 2, las galgas extensiométricas tienen la versatilidad de ser configuradas de distintas maneras en un puente de Wheatstone. Una de las configuraciones mencionadas fue la que lleva 4 galgas extensiométricas, una en cada rama del puente. Esto permite mayor exactitud y menos vulnerabilidad hacia los cambios de temperatura ambiente que sufre el puente.

Como en todos los equipos de instrumentación, existen normas que estandarizan las mediciones. En el pesaje, la Organización Internacional de Metrología Legal indica los siguientes tipos de exactitud en la Norma UNE-EN 45501:1995 Aspectos metrológicos de los instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático.

Tabla II. **Normativa de instrumentos de pesaje**

Exactitud	N. UNE-EN45501:1995	Peso máximo
Especial	Clase I	1 mg a 30 kg
Fina	Clase II	3,000 kg
Intermedia	Clase III	150,000 kg
Ordinaria	Clase IV	150,000 kg

Fuente: CREUS, Antonio. *Instrumentación industrial*. p. 322.

Una de las desventajas que presentan las galgas extensiométricas es que la mayoría requiere de pesos patrón para poder calibrarse en la fábrica o punto de aplicación. No obstante, ya existen marcas que no precisan de estos pesos patrón y son unos dispositivos altamente sensibles y complejos.

Entre los dispositivos que no necesitan pesos patrón se encuentra la celda de carga de doble apoyo marca HARDY con catálogo DSB01C. Esta tiene capacidad de medición de 2,27 a 113,4 toneladas métricas, rango suficientemente amplio para medir contenedores de carga en grandes industrias. Su capacidad y el grado de protección (grado IP) influirá en la protección que tenga este dispositivo a ambientes no usuales de trabajo.

Figura 26. **Celda de carga**



Fuente: *Celda de carga*. hardysolutions.com. Consulta: 7 de abril de 2019.

Una de las ventajas de usar estos equipos integrados es que se puede tener una cantidad límite de celdas de carga, definidas por el controlador que se usará. De manera, que ocurre por ejemplo que en un ingenio azucarero se necesita medir los contenedores. Para ello se pueden usar cinco celdas de carga, cada una de ellas conectadas al controlado que se encarga de mandar las señales al autómatas programable.

A partir de ahí, el control sencillo de las señales, protecciones y otras, depende del instrumentista y automatista.

3.4. Otros sensores

Los sensores que se presentaron en este capítulo solo son unas opciones de la vasta cantidad de tipos de variables por medir. Cada uno de los sensores pueden ser clasificados según el material con el que están elaborados, según el principio en el que basan su funcionamiento, el tipo de variable física, química, mecánica u otra que midan, entre muchas otras características.

Por tal razón, los sensores de temperatura, posición y presión fueron los que se explicaron con detalle en este capítulo, ya que son los más usados en

casi todas las aplicaciones de la industria. Desde un ingenio azucarero hasta una fábrica de zapatos, la correcta selección del sensor depende claramente del instrumentista.

Algunas de las mediciones que también se usan en la industria, son las siguientes.

- Medición de nivel
- Medición de caudal
- Medición de densidad
- Medición de humedad
- Medición de Redox (potencial de oxidación-reducción)
- Medición de movimiento

Así, opción tras opción se añade si se toma en cuenta cada una de las variables físicas, químicas, mecánicas y tecnológicas que se pueden medir. Incluso, aún existen variables que no tienen dispositivo que las pueda cuantificar.

Tras leer y analizar todo lo anterior, el instrumentista puede ser capaz de integrar el pensamiento teórico y práctico de los dispositivos de medición y control, con las nuevas tendencias de tecnología a nivel mundial: el *IOT*.

4. INTERNET INDUSTRIAL DE LAS COSAS

4.1. Historia

Describir el inicio del internet, de la gran red, puede llegar a ser una tarea bastante complicada; a lo largo de los años 70, muchas universidades y organizaciones colaboraban con aportes mutuos e individuales para crear una red de comunicación, o dicho de una manera más sencilla, conseguir que dos computadoras pudieran enviarse paquetes de datos.

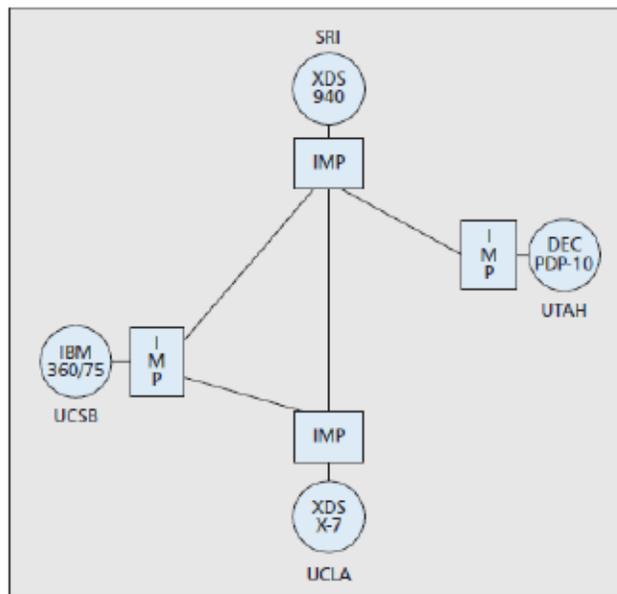
Con tal objetivo en mente, instituciones de los Estados Unidos crearon la primera etapa del internet, conocida como ARPAnet. Inicialmente, la universidad UCLA se conectó con el host del Stanford Research Institute en el laboratorio de Kleinrock. Unos meses más tarde se añadieron dos nodos, uno localizado en la universidad de California en Santa Bárbara (UCSB) y en la universidad de Utah.

La red se conectó a través de 4 IMP que por sus siglas en inglés, significa interfaz de procesador de mensajes. En sí, las bajas velocidades de transmisión de datos a través de la red telefónica provocaban grandes retrasos cuando los paquetes eran enviados. No obstante, el ARPAnet fue suficiente para sentar las bases de una especie de red en la que muchos dispositivos se conectan a un servidor, y luego son capaces de transmitirse datos entre ellos. En la imagen se puede apreciar el esquema que se había pensado de la red.

Aparte de la velocidad de transmisión de datos de la red telefónica, es importante recordar la comunicación que había entre los computadores, que

desde un inicio no habían sido diseñados para el envío de paquetes entre ellos y servidores.

Figura 27. **Nodos iniciales del ARPAnet**



Fuente: LUIS, Luis. Estudio del impacto técnico de internet al internet de las cosas (IoT) para el caso colombiano. p. 4.

Posteriormente al éxito de este experimento con únicamente 4 nodos, se fueron añadiendo poco a poco más servidores y nuevos nodos. Se defendió la idea de que era necesario crear un protocolo de comunicación globalizado y estándar que pudiera implementarse en millones de dispositivos. Así fue como nació el protocolo TCP/IP que se usa actualmente en todos los dispositivos que requieran una identificación en la red.

Lo que se tenía en ese entonces, era una red de comunicación rápida y segura entre dispositivos. No era el internet como tal. Gran parte de lo que se

conoce actualmente, fue gracias a la colaboración del CERN que crearon en el laboratorio la *World Wide Web (www)*; valga la pena decirlo, es una plataforma en la que permite crear distintas páginas web para una cantidad enorme de clientes, servidores, paquetes, dispositivos. La unión entre la red de comunicación que se tenía y el uso de las páginas web, fue el inicio de una revolución tecnológica y comunicativa nunca antes vista.

Lo que se buscaba (y se sigue buscando), es:

- Internet por y para las personas
- Internet para el conocimiento
- Internet para los servicios
- Internet para las cosas

Los dos últimos, hace poco fueron añadidos como nuevos objetivos del internet. Recién se empezaron a analizar los beneficios y tendencias de una sociedad, industria y gobierno conectadas al internet en la que la información se encuentra a plena luz del día.

Para proteger la red ante muchas amenazas, existen requisitos para el diseño e interfaz del internet. Coincidentemente, estas propiedades deben tenerse en cuenta en el diseño para un sistema de control, proceso industrial automatizado o proyecto de IloT.

- Escalabilidad

Esta es la capacidad de un sistema para expandirse hacia aplicaciones más grandes o de mayor necesidad. Es importante que la función y

características principales del mismo no se vean comprometidas por los cambios realizados.

- Seguridad y robustez

Estas características reflejan la capacidad de un sistema para responder ante posibles amenazas. Depende considerablemente cuando un sistema recibe un ataque y ninguno de los datos que se manejan son comprometidos.

- Heterogeneidad

Este término hace referencia a que un sistema pueda comunicarse entre los dispositivos que tenga conectados a él. Debido a la diversidad de marcas y tipos de dispositivos, que un sistema sea útil solo para una marca en específico no es productivo.

- Reconfigurabilidad

Esta característica hace que un sistema, sin importar de qué tipo, pueda adaptarse en tiempo real a las situaciones actuales del proceso. Esta propiedad se encuentra sujeta a los cambios físicos, mecánicos, eléctricos, químicos o de cualquier otro tipo del proceso que se lleve a cabo.

- Conciencia del contexto

Los sistemas manejan un gran conjunto de datos que intercambian con dispositivos en tiempo real. En el momento que ocurre una interrupción en el sistema por alguna falla, el sistema debe ser capaz de mantener almacenada

previamente dicha información y usarla para recuperarse desde donde se quedó.

- Manejabilidad

Esta propiedad incide en que un sistema pueda ser utilizado por cualquier persona sin importar la rama de especialización (esto depende según el tipo de proceso o aplicación que se lleve a cabo). Por ejemplo si hay cambio de personal o usuarios objetivos, no debe ser necesaria una nueva y extensa capacitación.

- Centrado en la información

Un sistema debe poseer la información útil y relevante para que un proceso sea entendible de manera fácil. De lo contrario, el abuso de información mostrada puede causar confusión.

4.2. Industria 4.0

Tal y como se mencionó en las páginas anteriores, se creó una red de comunicaciones a nivel global en la cual podíamos buscar contenido, comunicarnos con personas de otros países, enviar paquetes de datos, entre otros. Luego se implementó esos protocolos a dispositivos industriales que pudieran controlar las grandes máquinas que se originaron después de la internet.

Durante muchos años, los avances tecnológicos se han dado de manera exponencial. Después del internet y hasta el día de hoy, contamos con grandes

industrias de distinta índole creando materiales y productos en masa para el gran consumidor que es la sociedad actual.

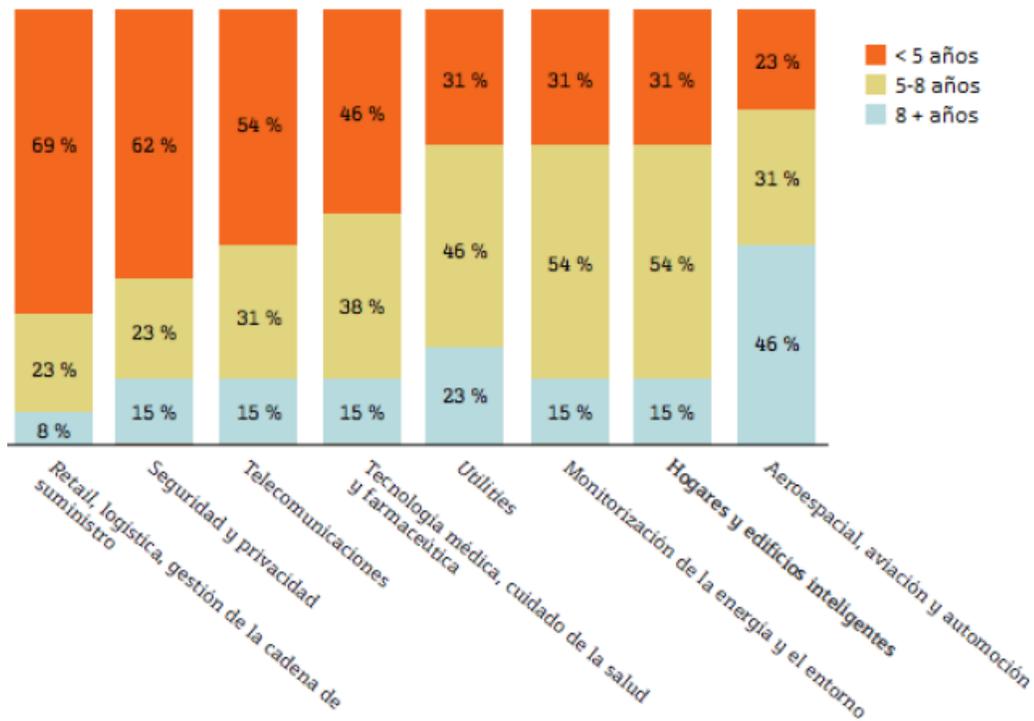
Paralelo a esto, tenemos todos los consumidores que poseen dispositivos inteligentes y que diariamente generan datos útiles para muchas industrias e inclusive para instituciones gubernamentales.

Lo que se ve es un conjunto de dispositivos, máquinas, computadoras, industrias, personas, entre otros. con una gran generación de datos que si se aprovechan de la manera adecuada, pueden deducir comportamientos y tendencias de la vida cotidiana. La industria 4.0, la nueva revolución industrial, busca eso exactamente: hacer un puente entre productor y consumidor.

El problema radica en que muchos de los dispositivos actuales que se encuentran en las industrias, no están diseñados para conectarse al internet. O los PLC no tienen soporte para hacer reportes en línea. Ahí radica la importancia de que en la instrumentación eléctrica se acople el internet industrial para tener como objetivo esa sociedad conectada y optimizada.

Un estudio realizado en el año 2014, indica los niveles de implementación del internet de las cosas en los distintos sectores de producción, bienes y consumo en la sociedad actual.

Figura 28. Implementación de IIoT



Fuente: ALANDÍ, Antonio. *Estudio de la implantación de Internet de las Cosas, en las redes logísticas de la cadena de suministro*. p. 20.

En la actualidad, tal implantación se ha retrasado debido a los costos de actualización a nuevas tecnologías que reemplazarn a las que ya sirven. Esto demuestra que es mucho más sencillo tener una línea de producción al margen del internet de las cosas (desde el inicio), que implementar en una línea de producción ya diseñada previamente.

4.3. Tecnologías usadas en el internet industrial de las cosas

Para un desarrollo eficiente de una planta con internet industrial de las cosas, por obvias razones es necesario que cada uno de los dispositivos

involucrados sean aptos o compatibles con los protocolos específicos, aunque también depende con lo que se desea usar.

Un ejemplo bastante sencillo es el de un sensor fotoeléctrico que se encuentra al final de una llenadora de botellas. Este no tendrá conexión a internet, dado que ocupa un puesto bajo en la cadena de valor de una planta. Sin embargo, puede estar enlazado con uno de los módulos del PLC que sí poseen conexión, no solo a la red de comunicación de los dispositivos, sino también con la red de internet.

Tal aplicación nos puede servir para llevar un monitoreo en un panel ejecutivo para que personas, sin importar cual sea su rama (financiera, técnica, administrativa, entre otros) puedan saber el monto exacto de botellas producidas.

Podemos aplicar el mismo principio a los dispositivos de seguridad en la llenadora de botellas. Este nos serviría para que en el panel ejecutivo se muestre el conteo de perjuicios cometidos durante un tiempo de operación. Inclusive, hora específica de ocurrencia.

Las aplicaciones dependen mucho del tipo de tecnología que se va a implementar en el dispositivo, proceso o sistema.

Tabla III. **Principales tecnologías**

Tecnología	Breve concepto
Etiquetas RFID	Sistema de identificación de objetos sin contacto.
GPS	Detección de la posición a nivel mundial

Continuación de la tabla III.

<i>Cloud Computing</i> o Nube	Infraestructura para el almacenamiento y análisis de datos
Etiquetas EPC	Sistema de identificación de los objetos a través de RFID
Red de sensores inalámbricos WSN	Tecnología adaptable a protocolos inalámbricos de comunicación
Tecnología IPv6	Sistema de identificación de objetos a través de internet
Nanotecnología	Permite disponer de dispositivos extremadamente pequeños
Monitorización	Visualización del entorno a través de una pantalla

Fuente: ALANDÍ, Antonio. *Estudio de la implantación de internet de las cosas, en las redes logísticas de la cadena de suministro*. p. 55.

Una de las tecnologías bastante importantes y que detallará, es la WSN o, por sus siglas en inglés, Wireless sensor network. La función de esta red es el sensado, control y monitoreo preciso de la vasta red de sensores que existe en una línea de producción, una máquina, entre otros. Tiene un despliegue por zonas específicas, donde las mismas actualizan el estado de los sensores para tener el estado de estos en el internet.

Como resultado, tenemos un panel de estado con miles de señales cambiantes casi de manera instantánea. Luego de una depuración, se pueden escoger que señales son útiles y cuáles no para ser mostradas a personas de cualquier departamento (similar al ejemplo anterior).

4.4. Arquitectura IIoT

Al igual que cualquier arquitectura de telecomunicaciones, donde se requieren de distintos servidores, clientes, usuarios, y características propias de la red, ocurre lo mismo en un entorno donde se desee implementar los procesos actuales con una arquitectura IIoT.

4.4.1. Propiedades de red

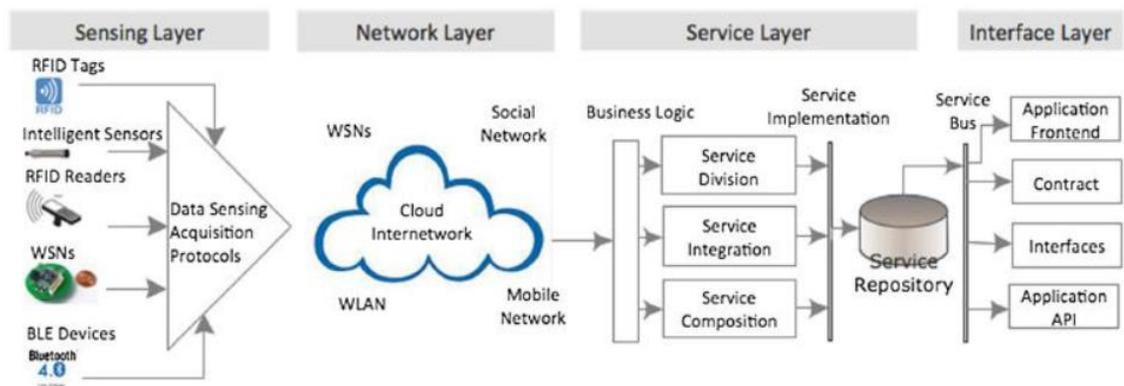
En consideración al diseño, los sistemas de operación y cada uno de los dispositivos deben tener las siguientes características:

- Extensibilidad: término que indica que la red puede ser extendida, o posibilidad de ser ampliada.
- Escalabilidad: similar a la extensibilidad, este término indica que la red puede ser ampliada. Indica la capacidad de un sistema para reaccionar y adaptarse sin perder su calidad.
- Interoperabilidad: usado únicamente en nuestro campo, el término interoperabilidad se refiere a la habilidad de los sistemas, componentes o dispositivos para intercambiar la información y utilizarla. Esta posee tres dimensiones donde es usada actualmente, las cuales son:
 - Dimensión técnica
 - Dimensión semántica
 - Dimensión organizacional

La última propiedad de la red, que sea interoperable, es una de las más importantes y que deben estar mejor controladas. Esto se debe a que cada uno de los dispositivos electrónicos que están conectados a la red pueden cambiar su posición geográfica en cualquier momento (sin importar si es manual o de forma automática) por lo que la red debe ser dinámica y adaptarse de forma automática a la configuración de la red.

Estas propiedades deben estar sistematizadas en las capas que debería tener una robusta arquitectura para el internet industrial de las cosas. En la primera capa, la sensora, es donde se encuentran los sistemas inalámbricos encargados de intercambiar la información entre los diferentes estados de los dispositivos.

Figura 29. **Arquitectura de red**



Fuente: ALANDÍ, Antonio. *Estudio de la implantación de internet de las cosas, en las redes logísticas de la cadena de suministro*. p. 35.

La capa de red se encarga de conectar todos los dispositivos para que puedan compartir información entre ellos. Únicamente los sistemas que serán usados en en las aplicaciones son los que deben estar subidos en la nube. Esto

último se debe a que el contenido de información, el cambio de estados, es bastante grande y mantener todo ese conjunto de datos transmitidos en tiempo real, bajaría la velocidad de subida de datos.

En la capa de servicios se proporciona una plataforma donde se unen el hardware y el software para el correcto manejo de datos. En esta se integran todas las aplicaciones del internet industrial de las cosas.

Por último, en la capa de interfaz se muestra la gestión simplificada de todos los dispositivos, o datos que se requieran analizar. Podría cumplir la función similar a una HMI, con una interfaz más simplificada para que personal de cualquier rango y área, pueda utilizarla.

La diferencia principal entre los sistemas actuales (que incluyen SCADA, HMI) con una arquitectura de IloT, es la dinamicidad de los sistemas. Por ejemplo, en una junta de directivos en una planta cervecera, se necesita saber datos en tiempo real de producción o de mantenimiento. Para ello, en un sistema convencional el gerente de producción necesita comunicarse con su equipo, consultar los datos y verificar que sean los correctos y los necesarios.

La misma situación, con una arquitectura mejorada, bastaría que el gerente de producción se conecte desde su computador (o celular) al servidor de datos, busque en la interfaz lo que desee y, por último, que muestre los indicadores deseados. Todo esto sin importar donde se encuentra geográficamente la junta. Es parte de la versatilidad del sistema.

4.5. Beneficios

Como se puede deducir, el internet industrial de las cosas no es el avance y desarrollo de solo una tecnología. Este sistema es una colaboración de distintos años de desarrollo entre múltiples tecnologías, como se indicó anteriormente en este capítulo.

La combinación eficiente con todas estas tecnologías, junto con el desarrollo de la instrumentación necesaria para el internet, permite acercar la brecha existente entre el mundo físico y el virtual.

Entre toda esa combinación de tecnologías surgen nuevas capacidades que tendrán los sistemas industriales, entre las cuales están:

- **Comunicación y operación:** los objetos y dispositivos son capaces de actualizar su estado a partir del cúmulo de datos que reciban por parte de la nube.
- **Capacidad de direccionamiento:** los objetos podrán ser localizados y dirigidos por los servicios para que posteriormente sean reconfigurados.
- **Identificación:** permite que cada uno de los objetos tenga una identificación única, gracias a las etiquetas ya existentes o nuevas tecnologías por desarrollar.
- **Detección:** permite que los objetos reaccionen y recopilen información ante situaciones específicas, gracias a la enorme red de sensores.

- Actuación: esta capacidad permitirá que los objetos cambien su estado mecánico para afectar su entorno, todo a través del internet,
- Procesamiento de información embebida: esto permite que los objetos inteligentes puedan tener memoria de uso o entorno, para entregar datos; gracias a que poseen un microcontrolador.
- Localización: muchos de los objetos inteligentes podrán tener no solo conexión a internet, sino también conocimiento de su ubicación geográfica para que puedan interactuar con otros de mismo tipo.
- Interfaces de usuario: podrán comunicarse y dar señales a personas.

Luego de analizar estas capacidades, es correcto afirmar que los beneficios en cualquier industria por implementar el internet industrial de las cosas en los sistemas de producción, principalmente en el campo de la instrumentación eléctrica y mecánica, son sustanciales. Entre los principales beneficios, son:

- Ahorro de costes, que se debe estrictamente a la optimización de procesos en la planta.
- Mejor utilización de los recursos, ya que se tendrá una visión real del suministro de materia prima que se usa actualmente en cada proceso.
- Procesos más eficientes, debido a que los costes de energía se reducen, los tiempos muertos se eliminan y la intervención humana es escasa.

- Mejora de la productividad, ya que la curva de aprendizaje para cada trabajador es más rápida.

4.6. Método de aprendizaje

El concebir conocimiento nuevo en jóvenes estudiantes de la universidad implica un empleo de esfuerzo constante y específico. El método debe ser didáctico y no depender únicamente del instructor o catedrático, sino también depender de la motivación de los estudiantes por superarse a sí mismos.

El internet industrial de las cosas crece a pasos desmesurados y conforme avanza el tiempo, si los estudiantes no se actualizan no adquieren las competencias necesarias para afrontar un mercado industrial tecnológico muy superior a ellos.

Y es ahí donde parte la necesidad de que ellos tengan esas características importantes. El aprendizaje técnico universitario se puede conseguir fácilmente a partir del constructivismo pedagógico.

Este tipo de aprendizaje se basa en las experiencias previas que ha tenido el estudiante con respecto a lo que ha aprendido a lo largo de su carrera profesional universitaria. El proceso consiste en la asimilación y acomodación de contenidos, ya que en cada momento que el estudiante intenta relacionar nuevas ideas con base en lo que a aprendido, realiza un esquema mental de la información y la une a su propio criterio.

Así, mediante el lema principal de aprender haciendo, al estudiante del laboratorio se le entregan las herramientas necesarias que le permitan sugerirse soluciones a las problemáticas que se le presenten.

Un instructor de laboratorio posee las características suficientes para hacer cara a las necesidades actuales del curso. Además, a las posibles demandas y contratiempos que se presenten en el momento de estar al frente del laboratorio. Entre estas características, encontramos:

- Aceptar e impulsar la iniciativa del estudiante.
- Usar materiales comunes y fuentes primarias de teoría en conjunto con dispositivos físicos, interactivos y manipulables.
- Usas terminología cognitiva.
- Investigar y conocer acerca del conocimiento actual de los temas del curso en los estudiantes.
- Desafiar la intuición e indagación en los estudiantes, haciendo preguntas que necesiten de reflexión y análisis.

Aplicando el constructivismo, el instructor de laboratorio será un facilitador de aprendizaje. Si este tiene un acercamiento con los estudiantes, sabrá que cada uno tiene un propio método de estudio, un nivel de desarrollo intelectual, cierto grado de aceptación a lo que escucha.

Otro punto muy importante en el método de aprendizaje es la distribución de contenido que llevará cada una. Como se dijo anteriormente, la construcción de conocimiento está basada en la experiencia y criterio que tiene el estudiante. Por tanto, si el contenido del laboratorio se diseña de manera en espiral, la adquisición de conocimiento se realiza de manera más íntegra y sólida.

Así, por ejemplo, ya en la última práctica de laboratorio se lleva a cabo la conexión de una pequeña red de sensores que con anticipación, cada uno de ellos fueron utilizados en las prácticas anteriores. El progreso y la realización de

la práctica se lleva a cabo de manera dinámica, ya que el estudiante ya obtuvo el criterio necesario.

5. PROPUESTA DE PRÁCTICAS

El método por seguir para diseñar prácticas de laboratorio requiere de un análisis sobre los conocimientos técnicos requeridos en el actual campo industrial y mercado tecnológico. Lamentablemente, en el corto período de un semestre no se puede cubrir como se desearía cada uno de los temas tratados anteriormente en este documento; menos abarcan los conocimientos en un sector industrial específico (de manera completa).

Así, los temas que se escogieron son cercanos a la realidad industrial, con dispositivos tecnológicos, métodos de realización y aprendizaje dinámicos, mediante la práctica. Además, siempre es importante tener los fundamentos y principios básicos de lo que rige la instrumentación eléctrica. Todo depende de una ideal correlación entre los temas y los objetivos.

Algunas prácticas están diseñadas con la característica de que se pueden realizar física o virtualmente. Para realizarlas de manera física, basta con leer el documento completo y así tener los fundamentos teóricos importantes. Posteriormente, reunir dispositivos y materiales, para ejecutar el procedimiento. Si se desea realizar virtualmente, las primeras prácticas de acondicionamiento de señal necesitan del uso del software NI Multisim para que se pueda simular los dispositivos y arreglos de resistencias.

Para las siguientes, sí es necesario el uso de los dispositivos físicos para que se puedan realizar. No obstante, estos dispositivos son de uso común en los estudiantes; por tanto, no hay dificultad alguna en que los puedan obtener.

5.1. Práctica 1: Puente de Wheatstone, sensibilidad

Como se describió en capítulos anteriores, la característica principal de este puente es que debe estar conformado (normalmente) por 4 elementos resistivos del mismo valor, que tras un cambio del entorno físico, entran en desequilibrio.

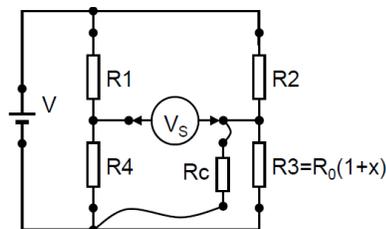
Una parte importante de los puentes es determinar la sensibilidad de variación que tendrá en sus terminales; es decir, en el voltaje de salida.

- Objetivo

En esta práctica, el estudiante debe aplicar el conocimiento adquirido en el curso para diseñar adecuadamente un puente de Wheatstone.

Ocurre típicamente que cuando se implementa un sensor de deformación conjunto con galgas extensiométricas, estas se encuentran en un mismo encapsulado. Esto quiere decir que las únicas terminales que tenemos para añadir nuevos elementos son la salida de la fuente de alimentación y la entrada de la resistencia variable o galga extensiométrica, R_3 .

Figura 30. Calibración de puente



Fuente: GARCÍA, Juan. *Circuitos de acondicionamiento para sensores resistivos*. p. 15.

Con base en ese principio, es importante identificar la sensibilidad de manera precisa y eficiente en nuestro puente de medición.

- Procedimiento

Para determinar la sensibilidad del puente de medición, necesitamos ajustar el voltaje de salida vs al estado estable; es decir, cero voltios.

Posteriormente, debemos colocar una resistencia tal y como se observa en el circuito.

Al hacer dicho ajuste, el puente se ve afectado considerablemente por dos motivos. El primero, que la resistencia adicional colocada en paralelo hace variar la resistencia general de dicha parte de la galga extensiométrica, causando una interpretación de desequilibrio.

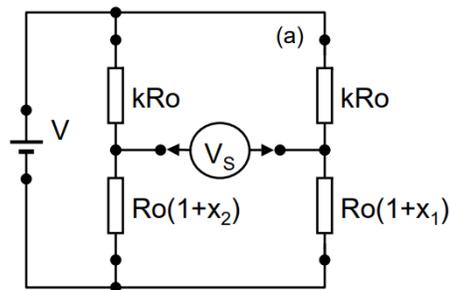
El segundo motivo es que la resistencia en esa parte de la galga siempre se mantuvo en equilibrio (por fines prácticos); el porcentaje de variación depende únicamente de la nueva resistencia añadida.

- ¿Cuál es la ecuación que define el porcentaje de variación de R_3 en función de la resistencia inicial y la resistencia añadida?
- Si el comportamiento del puente se define como ideal desde un principio, ¿cuál es la ecuación que define la sensibilidad, a partir del voltaje de salida y el porcentaje de variación de R_3 ?
- Realizar dos gráficos, en los cuales se pueda comparar el voltaje de salida del puente de Wheatstone y el porcentaje de variación de la resistencia variable (o galga extensiométrica). El primer gráfico debe ser

sin la resistencia de calibración añadida y el segundo gráfico debe realizarse con ella.

Por último, debe realizarse el mismo procedimiento anterior, únicamente que se debe sustituir una galga extensiométrica con variación positiva (igual que la inicial) para observar si la sensibilidad de esta cambia.

Figura 31. **Compensación de puente**



Fuente: GARCÍA, Juan. *Circuitos de acondicionamiento para sensores resistivos*. p. 16.

- Usando parte del análisis previo que se realizó en capítulos anteriores ¿cuál es la ecuación que define el voltaje de salida, en el circuito anterior?

5.2. **Práctica 2: Puente de Wheatstone, linealidad**

El puente de Wheatstone esta conformado por cuatro resistencias, de las cuales según el objetivo y aplicación que se desea obtener, se puede tener un arreglo variado de resistencias que deben ser añadidas o sustituidas.

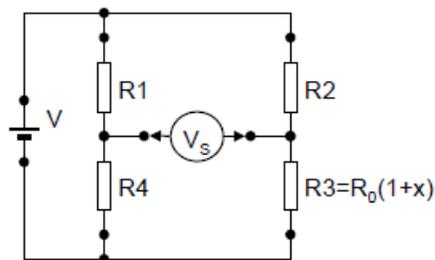
Por ejemplo, se aprecia en el capítulo 2 que hay un arreglo de puente en el que se usan galgas extensiométricas dobles. Esto quiere decir, que hay una

variación constante del juego de resistencias en las cuatro esquinas, causando que la ecuación del voltaje de salida sea proporcional al voltaje aplicado. A diferencia de un puente común, este será mucho más costoso, pero tendrá mayor exactitud. Además, si la aplicación final que se desea pesar es un objeto con un área bastante grande, son necesarias galgas extensiométricas en cada esquina.

- Objetivo

En este apartado, el estudiante debe apreciar la diferencia entre la salida de medición de voltaje en el puente de Wheatstone, y su relación directa con la razón entre las resistencias de ajuste.

Figura 32. **Puente de Wheatstone**



Fuente: GARCÍA, Juan. *Circuitos de acondicionamiento para sensores resistivos*. p. 10.

El voltaje de salida del puente es el que se mide en la zona de equilibrio de este, que son los terminales de ambos divisores de tensión. Y tal como se describió en el segundo capítulo, al hacer la relación de resistencias iguales con respecto a k , se obtiene una ecuación en función de dos variables, el porcentaje de variación x y la constante k .

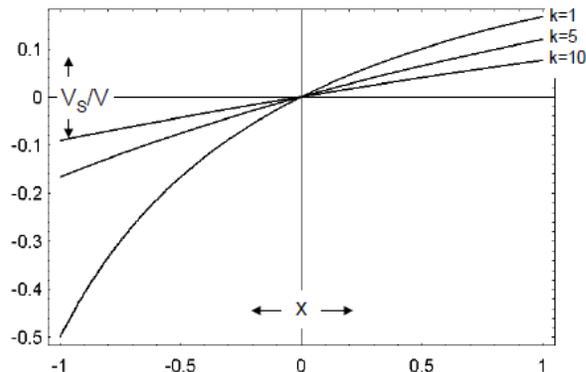
- Procedimiento

Como primer inciso, se debe obtener la ecuación de la resistencia R4 en estado de equilibrio, con respecto a las otras resistencias; esto debe verificarse si el voltaje de salida es igual a cero. Posteriormente, se debe relacionar la ecuación del voltaje de salida con respecto a las 4 resistencias del puente.

$$k = \frac{R1}{R4} = \frac{R2}{R0}$$

Dicha ecuación debe estar en términos de k y x, con el fin de que se pueda obtener la gráfica de variación ideal para un sensado correcto con el puente de medición.

Figura 33. Variación de la constante k



Fuente: GARCÍA, Juan. *Circuitos de acondicionamiento para sensores resistivos*. p. 10.

- Obtener la gráfica de voltaje de salida vs variación de porcentaje k, para distintos valores de la constante k.
- ¿Cuál es el valor ideal de k para que la salida del puente sea lineal?

- ¿La sensibilidad del puente es afectada? ¿Se puede obtener el valor? Si la respuesta a las preguntas anteriores es afirmativa, obtenerla.
- Si la galga extensiométrica se cambia de posición, ¿el voltaje de salida es afectado?

5.3. Práctica 3: Termistores, linealidad y ajuste

El divisor de tensión es una configuración de un circuito eléctrico que permite analizar de qué modo se reparte el voltaje de alimentación entre dos o más elementos resistivos (o de manera más general, impedancias); cada una de ellas conectadas en serie.

En la instrumentación, como se conoció en el segundo capítulo de este documento, se utilizan cotidianamente los termistores, que no son más que dispositivos que varían su resistencia en función de la temperatura a la que se encuentran sometidos. Esta característica la podemos aprovechar para medir la temperatura eficientemente de un motor, de un tanque, de algún panel de control o muchas otras aplicaciones.

- **Objetivo**

En este apartado, el estudiante de laboratorio debe practicar el ajuste de un divisor de tensión y su voltaje de salida, en función de la linealidad. El ajuste depende del tipo de termistor, el rango de medición y la medición de la señal de salida.

Los errores con los que se puede encontrar un instrumentista principiante son varios, como el ajuste del valor de referencia, el error de carga, entre otros;

sin embargo, el mismo dispositivo autómatas puede programarse para que detecte dichos errores y sean reducidos.

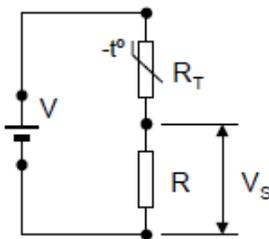
También depende de nosotros establecer el arreglo correcto de resistencias para que las salidas sean adecuadas. Para ello, necesitamos primero determinar la resistencia en serie al termistor, que estará en función del tipo de ganancia que se desea obtener a la salida.

Al referirnos a la figura 10 del capítulo 2, vemos que hay distintas ganancias en función del rango de temperatura que queremos medir. Mientras mayor sea el rango, menos eficiente será nuestro sistema de medición.

- Procedimiento

Por ejemplo, para un rango de 20 °C a 100 °C conviene escoger una ganancia de 6. Sabiendo la ganancia y el rango de temperaturas que nuestro termistor puede medir, se procede a escoger la resistencia que complementa el divisor de tensión y así corroborar la linealidad de este.

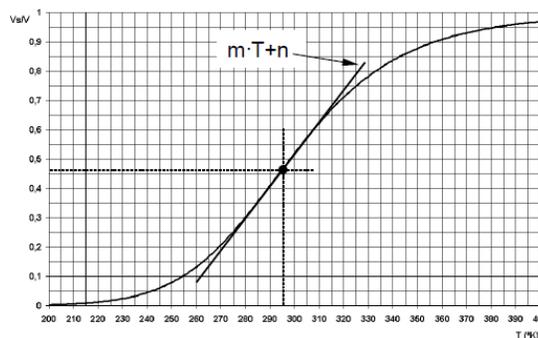
Figura 34. **Termistor en un divisor de tensión**



Fuente: GARCÍA, Juan. *Circuitos de acondicionamiento para sensores resistivos*. p. 8.

- Con la ayuda de un termistor y un potenciómetro de precisión, realizar un divisor de tensión tal y como se observa en la figura anterior.
- Usando dicho circuito, realizar las gráficas de temperatura vs. voltaje de salida del divisor de tensión, para distintas ganancias. Esto quiere decir que se requiere analizar con varias resistencias. ¿Es notorio el cambio de linealidad?
- En la industria, los termistores se encuentran basados en el tipo de materiales con el cual están hechos. ¿Cuál es la diferencia entre un termistor NTC y PTC, y de qué manera puede obtenerse ventaja de estas características en algún tipo de aplicación?

Figura 35. **Linealidad del termistor**



Fuente: GARCÍA, Juan. *Circuitos de acondicionamiento para sensores resistivos*. p. 9.

En otras circunstancias, la hoja de características del sensor no cuenta con la gráfica de ganancias en función de la temperatura; por tanto, se requiere

hacer un pequeño análisis matemático del voltaje de salida, para que en función de este tengamos un resultado adecuado y que sea lineal el divisor de tensión.

- Con el termistor anteriormente utilizado, ¿cuál es la resistencia matemáticamente obtenida que se debe colocar en serie con el termistor?
- ¿Cuál es la gráfica de temperatura vs. voltaje de salida, con una aproximación del divisor con el termistor y la resistencia anterior obtenida?
- Si la linealidad no se cumple, ¿cuáles serían las causas?

5.4. Práctica 4: Termistores, voltaje de salida

El divisor de tensión, como comúnmente se conoce, es un arreglo sencillo de dos resistencias en serie con una fuente de alimentación de voltaje constante. Tal y como nos es útil en la instrumentación, una de esas resistencias es un termistor que varía su resistividad en función de la temperatura.

- Objetivo

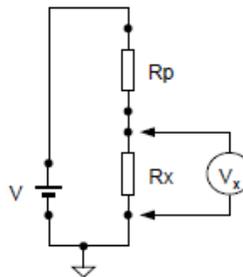
En la práctica anterior, se calcula el arreglo de resistencias correcto para que el voltaje de salida en el divisor de tensión tenga la mayor linealidad posible. Dicho ejercicio depende únicamente de la resistencia colocada en serie del termistor, y del rango de temperaturas que se desea medir; esto último en función de la aplicación que se desea.

Para este apartado, se analiza nuevamente la linealidad que se puede obtener en el voltaje de salida del divisor de tensión, a excepción de que esta vez, depende de dónde se toma la salida.

- Procedimiento

Con el mismo termistor de la práctica anterior, realizar el arreglo de divisor de tensión para el cual se obtiene la mayor linealidad posible en el voltaje de salida. Es necesario notar que, en el arreglo del divisor de tensión de la práctica anterior, el termistor es el inmediato que sigue a la fuente de alimentación y que el voltaje de salida se mide desde la resistencia fija. Esta resistencia fija es la que depende mucho de la linealidad del sistema.

Figura 36. **Divisor en divisor de tensión**



Fuente: GARCÍA, Juan. Circuitos de acondicionamiento para sensores resistivos, p. 9.

- Obtener la expresión del voltaje de salida para el circuito de medición de un divisor de tensión en el que el termistor se encuentra inmediato siguiente a la fuente de alimentación, y el voltaje de salida tomado desde la resistencia fija.

- Conectar el anterior, para el que se obtuvo la expresión de voltaje de salida. Posteriormente, graficar el voltaje de salida a medida que cambia la temperatura de medición manualmente. Las mediciones deben realizarse con un multímetro o voltímetro de baja escala.
- Comparar la gráfica anterior obtenida experimentalmente con una gráfica de variación de tensión teórica, usando la expresión del primer inciso.

Tras los incisos anteriores, el objetivo se cumple. A continuación, debe realizarse pasos similares únicamente cambiando de posición el voltaje de salida.

- Calcular matemáticamente la expresión del voltaje de salida, en el que el termistor de nuevo se encuentra inmediato a la fuente de alimentación y luego en serie la resistencia fija. Esta vez, el voltaje de salida se toma desde el termistor.
- Realizar la conexión física del circuito anterior y graficar la variación del voltaje, alterando la temperatura manualmente y tomando medidas con nuestro dispositivo de medición.
- Realizar las gráficas de medición experimental y teórica, luego compararlas.

Realizar conclusiones. ¿De qué manera existe mayor linealidad en el divisor de tensión? ¿Cómo se puede mejorar?

5.5. Práctica 5: El microcontrolador Arduino

Gracias a la facilidad con la que en el último siglo se pueden construir chips, integrados y semiconductores, obtener un microcontrolador programable no es tarea complicada. Menos es complicado realizar una aplicación en específico con él.

Desde luego, es necesario de conocimiento en programación y electrónica para ejecutar nuestro propio código en uno de ellos. Para tales labores, se recomienda el uso del microcontrolador Arduino UNO para la recepción de entradas y salidas. Además, en apartados siguientes será necesario agregar conectividad Wifi, motivo a las aplicaciones, para el cual se recomienda usar el circuito integrado ESP8266.

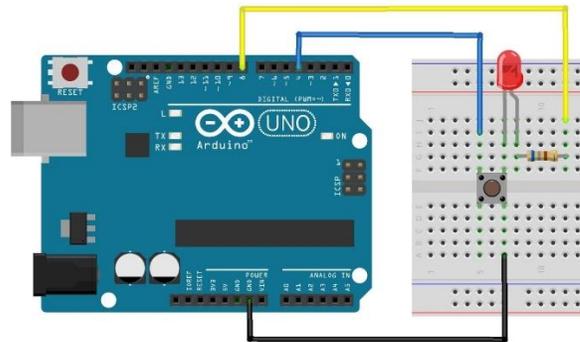
No obstante, la versatilidad de los dispositivos electrónicos y microcontroladores hoy en día, permiten que las prácticas sean realizadas con otro tipo de microcontrolador.

Entre estos se encuentra la *Raspberry Pi*, la Tiva C, la MSP430 o el NodeMCU. Lo mismo ocurre con el circuito integrado para el Wifi. Existen otras opciones que también son plenamente aceptadas y es asegurada su compatibilidad.

- Objetivo

El alcance que debe tener esta parte es que el estudiante logre conectar el microcontrolador Arduino a la computadora, y desde ella compilar una parte de código.

Figura 37. **Led en Arduino**



Fuente: *Led en Arduino*. fritzing.org. Consulta: 18 de junio de 2019.

Debido a la complejidad que se añade en las siguientes prácticas, en esta parte únicamente se conectará un led a uno de los pines digitales del microcontrolador. Además, un pulsador normalmente abierto debe realizar la función de accionador; este estará conectado a una entrada digital.

- **Procedimiento**

Como primer punto, se debe conectar la fuente de alimentación de DC con el microcontrolador. Se puede verificar buscando el led indicador de energía que cada placa programable posee.

Posteriormente, al conectar el microcontrolador Arduino a la computadora, los *drivers* necesarios se instalan automáticamente y listo, la placa es reconocida por la computadora. A continuación, se ejecuta el programa para compilar código en la placa llamado Arduino IDE.

Con la ayuda de este *software* se escribe el código necesario para habilitar la entrada y salida, ya que luego debe ejecutarse sin ningún

inconveniente. En la web existen distintas páginas para referencia de cómo programar para aquellos que no son expertos. Entre esas páginas, esta es una recomendación arduino.cc/en/tutorial/button que será bastante útil.

- ¿La conexión fue realizada con éxito?
- En la computadora existe un puerto de comunicación habilitado con el Arduino para el envío y recepción de datos. Después del procedimiento anterior, investigar acerca de dicho puerto y escribir una nueva programación, con la creatividad de cada uno.
- La placa del microcontrolador tiene integrado un led y un pulsador para que sea programado. Habilitar una salida PWM interna para que el led de la placa varíe la intensidad de brillo.

5.6. Práctica 6: IIOT usando un microcontrolador

Conforme han transcurrido los años, el desarrollo de tecnología de punta y vanguardista ha seguido líneas de tendencia en cualquiera de las vías de la ingeniería. La mecánica automotriz, la mecánica industrial, la ingeniería sanitaria, ambiental y por supuesto, la rama de la automatización es una de las que más se lleva el papel.

Así es como el internet industrial de las cosas ha cobrado auge en los últimos años, tal y como se describió detalladamente en el capítulo anterior.

- **Objetivo**

En esta práctica se da por sentado el conocimiento básico para utilizar el microcontrolador Arduino y el estudiante debe conectar varios dispositivos en

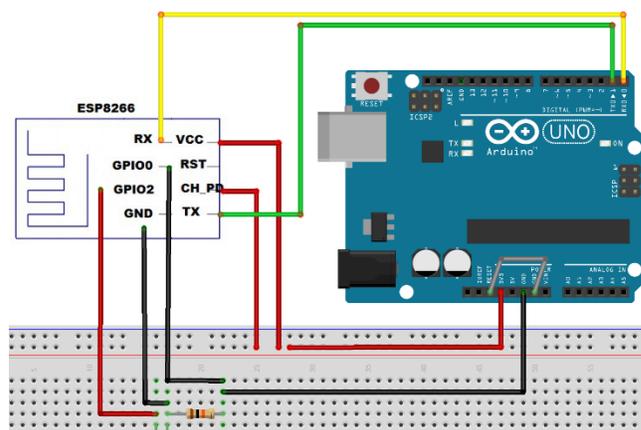
una misma red de internet. Los dispositivos que se deben conectar son el Arduino, la placa ESP8266 y un celular inteligente con Android o IOS.

Realizada la conexión, mediante el uso del módulo PWM de la placa y con la interfaz gráfica de la aplicación Blynk, se debe variar la intensidad del led en el microcontrolador con un regulador de intensidad. Este último es a criterio propio, además de que hay varias opciones para seleccionarlo en la aplicación Blynk.

- Procedimiento

Se debe realizar la conexión entre el Arduino y la fuente de alimentación y verificar que el indicador visual de alimentación se encuentre encendido. Luego se debe conectar el integrado ESP8266 con el microcontrolador Arduino y estos dos con la computadora.

Figura 38. Diagrama de conexión



Fuente: *Diagrama de conexión*. create.arduino.cc. Consulta: 18 de junio de 2019.

Los puertos que posee el módulo ESP8266 para realizar el envío y recepción de datos son:

- TX, RX: ambos pines sirven para el envío de bits entre el microcontrolador y el módulo WiFi.
- CH_PD: entrada usada para activar o desactivar el módulo.
- RESET: reinicia el módulo completo.
- VCC: voltaje de alimentación.
- GPIO 2, GPIO 0: pines que se pueden programar para tener indicadores visuales de estado.

Una vez conectado el módulo al microcontrolador, se puede referir a la página web bit.ly/arduino_led que ejemplifica de manera detallada los pasos por seguir para conectarse con la aplicación móvil Blynk.

Con todos los dispositivos conectados, ya se podrá enviar y recibir datos del celular hacia el microcontrolador y viceversa. Si se diseña una interfaz sencilla en la aplicación, se consigue fácilmente que desde un pulsador, se encienda un led del microcontrolador.

- ¿La conexión fue realizada con éxito?
- ¿La recepción y transmisión de datos se da lo suficientemente rápido?
¿A qué velocidad?
- En la aplicación Blynk hay una serie de módulos para trabajar con PWM. Se debe integrar en la programación el cambio de intensidad en el led del microcontrolador, a partir de la *app*.
- Integrar la consola del *software* Arduino IDE con el programa y enviar un dato desde la computadora hacia el Arduino y la aplicación Blynk.

5.7. Práctica 7: El sensor fotoeléctrico y el IIOT

Entre los dispositivos que con mayor facilidad se pueden integrar a una red inteligente de sensores en el internet industrial de las cosas, son los sensores fotoeléctricos.

Estos tienen un sencillo funcionamiento, el cual consiste en recibir la señal lumínica del entorno, y a partir de un transductor convertirla en un tipo de señal eléctrica que nos sea útil para trabajar. Tal y como se mencionó en el capítulo 3 de sensores y su funcionamiento, de estos existen distintos tipos.

- Objetivo

En este apartado, se debe poner en práctica la conexión entre los sensores de un dispositivo celular y un microcontrolador. Además, se realizará un proyecto para control de estado de variables en el celular.

Se usará el sensor fotoeléctrico y el sensor lumínico que se encuentran casi en cualquier dispositivo celular de gama media en adelante. El sensor lumínico, a diferencia del sensor fotoeléctrico, mide la cantidad de lúmenes que se reflejan en la parte frontal de nuestro dispositivo.

- Procedimiento

El valor de los lúmenes se utilizará para modificar la velocidad de giro de un motor *brushless* con el uso extra de un módulo PWM, que ya se encuentra añadido en el dispositivo programable.

- Dispositivos

Se debe seleccionar el dispositivo móvil, microcontrolador y componentes necesarios para realizar la conexión, medición y modificación de valores en tiempo real. Además, debe verificarse el correcto funcionamiento del sensor de proximidad y el sensor lumínico del dispositivo móvil.

- Aplicación de transferencia de datos

En cualquier tipo de dispositivo móvil, hay tiendas la mayoría gratuitas, que tienen aplicaciones enfocadas al internet industrial de las cosas. Entre ellas, están Blynk y MQTT.

Es importante verificar que tengan compatibilidad con nuestras placas o microcontroladores programables. Después de instalar la aplicación, se debe realizar el proyecto en el que utilicemos los recursos de nuestro dispositivo móvil: el sensor de proximidad y el sensor fotoeléctrico o lumínico.

- Lenguaje de programación

En el microcontrolador debemos escribir el código necesario que nos permita enviar paquetes de datos entre el dispositivo móvil y nuestra placa programable.

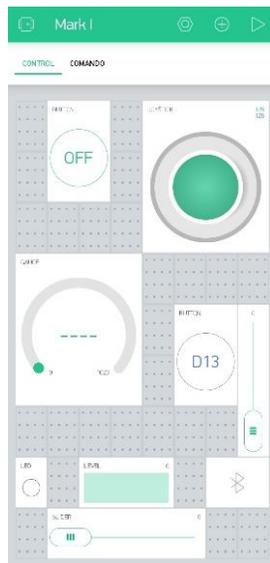
Además, debe llevar las líneas de código necesarias para que se pueda realizar la modulación de ancho de pulsos para modificar la velocidad de rotación del motor. Como ayuda de referencia, vale la pena visitar esta web bit.ly/arduino_led, en la que se encuentran los pasos detallados de como realizar la conexión.

- Integración

Usando la aplicación en el dispositivo móvil, se debe establecer conexión con la placa programable a través del protocolo de comunicación que se debió escoger bajo criterio propio; preferiblemente debe ser vía WiFi, usando el módulo ESP8266.

Posteriormente, debe verificarse que el envío de señales corresponda a lo deseado. Los valores análogos del sensor fotoeléctrico y las señales digitales del sensor de proximidad deben verse reflejadas con claridad en la placa de programación, para que estas puedan ser útiles en la interacción con los otros dispositivos.

Figura 39. **Ejemplo de desarrollo móvil en Blynk**



Fuente: elaboración propia, empleando BLYNK.

- Puesta en marcha

Tras haber verificado manualmente las entradas y salidas en nuestro microcontrolador programable, se procede a operarlo. El aumento o disminución de la luz que incida sobre el dispositivo móvil debe aumentar o disminuir la velocidad de rotación del motor gradualmente.

Alterar el estado físico del sensor de proximidad, significa que debe reflejarse en un contactor, para que la aplicación sea similar a la que dicho arreglo de sensores se encontraría en un entorno industrial.

- Interpretación

La conectividad entre los dispositivos debe converger hacia un futuro inalámbrico, donde los datos sigan compartiéndose a velocidades altas, pero mediante otro medio no convencional: el aire. Claro, influye mucho el tipo de seguridad que se tendrá, dado que la mayoría de información transmitida es sensible y de uso privado.

Con lo de este apartado, el objetivo se cumple. Simular una red de dispositivos conectados que a partir de pequeñas distancias pueda controlarse desde un dispositivo móvil.

5.8. Práctica 8: Diseño de un encoder incremental

El encoder es un tipo de dispositivo electrónico que depende de una fuente de energía externa para emitir pulsos; con estos es posible identificar cuál es el estado actual de las rotaciones del eje.

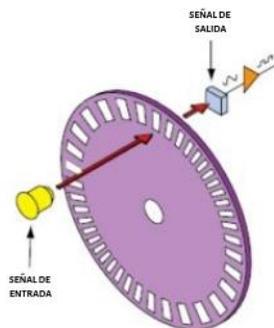
Según la aplicación que se requiera, la importancia y resolución que manejan es indispensable. Desde el sentido de giro de una caja reductora hasta la posición exacta de una turbina de vapor. En ambas, la cantidad de pulsos que da por revolución depende de la construcción y capacidad de este.

Desde los 4 pulsos por revolución hasta los 5000, esta medida se conoce como PPR por sus siglas en inglés, que significa *pulses per revolution*. Es seguro afirmar que mientras mayor sea la cantidad de pulsos por rotación, proporcional será el precio. No obstante, el límite de precio oscila entre los 300 USD de alguna marca reconocida.

- **Objetivo**

Según la ocasión que se presente, la implementación del encoder óptico será reflejada en la calidad de medida y retroalimentación que tengamos en nuestro autómatas programable. Para conocer de lleno el funcionamiento y operación, se creará un encoder incremental con un sensor inductivo.

Figura 40. **Encoder incremental**



Fuente: Encoder incremental. analogictips.com. Consulta: 18 de abril de 2019.

Como se aprecia en la imagen anterior, es necesario tener una señal de entrada y una de salida para una simulación del comportamiento real de un encoder óptico.

- Procedimiento

Para la señal de entrada, se utilizará un sensor de proximidad de tipo inductivo. Para la de salida, se usará directamente la señal del contacto normalmente abierto del sensor inductivo. Esto quiere decir que la señal de alimentación del sensor será la entrada digital que tendremos en nuestro autómeta o microcontrolador. La construcción es la siguiente.

- Eje motriz

Basados en la disposición del eje motriz del motor y en función del diámetro de este, se debe realizar 8 perforaciones equidistantes alrededor de uno de los extremos del eje. Esto significa que habrá 8 sectores idénticos de la circunferencia que nos van a permitir determinar la ubicación del eje. En cada una de las perforaciones, debe colocarse un tornillo, clavo o algún elemento mecánico con cabeza, de material ferroso, para que pueda ser medido por el sensor de proximidad.

- Sensor de proximidad

En alineación perpendicular a los tornillos colocados en el eje, debe fijarse el sensor inductivo para que tras $1/8$ de rotación del eje, cierre los contactos y envíe una señal de salida a nuestro autómeta programable o microcontrolador. La velocidad de rotación influye en la cantidad de pulsos por minuto que puede recibir el controlador. Por ejemplo, para un microcontrolador tipo Raspberry Pi,

puede recibir los 1 000 pulsos por minuto en las entradas digitales. En el caso de los PLC estos pueden llegar a tener un tiempo de actualización hasta de 7 000 pulsos.

- Visualización

A través de la aplicación y el protocolo de conexión que se aprendidos en la práctica anterior, se debe implementar la misma metodología, únicamente que se debe visualizar la cantidad de revoluciones por minuto que está entregando el eje motriz.

Durante la práctica, influye mucho el tipo de motor que se usará. Basados en su simplicidad, se puede utilizar un motor de DC sin escobillas, dado que poseen un bajo precio y fácil manejo. Otra opción es utilizar un motor de tipo AC, el cual es más robusto pero muchas veces más caro.

Si se cuenta con un variador de frecuencia para la alimentación del motor, estos ya poseen un circuito de retroalimentación que permite identificar la velocidad actual a la que se encuentra girando con el motor. En dado caso si existiera, ¿concuerta la velocidad del encoder con la mostrada del variador de frecuencia?

5.9. Práctica 9: Panel de datos y análisis

En el campo de la automatización industrial, existen las conocidas HMI que por sus siglas en inglés significa *human-machine interface*. Estas son pantallas *touch* cuya función es mostrar el estado actual de algunas variables del proceso que se está llevando a cabo, además de algunas muestras de los pasos del proceso.

Son muy útiles cuando al lado de una línea de producción, los operarios encargados de la línea necesitan modificar alguna variable o hacer alguna anotación para que quede registro físico.

En cambio, si se lleva a cabo una reunión de directivos, y estos desean verificar el estado actual de los sensores, algunas variables significativas del proceso o algún conteo de producto que se requiere ver en tiempo actual, ¿es útil mostrar la misma pantalla que usa el operario? La respuesta es no, y en situaciones como la mencionada es donde se requiere que el instrumentista/automatista pueda diseñar y crear un panel de información.

- Objetivo

Un panel de información para mostrar las variables de proceso accesibles. Debe ser amigablemente vistoso para que cualquier persona (sin importar rama y especialización) pueda entender la información que se muestra en la pantalla. El objetivo es que el estudiante pueda diseñarlo con estas características en mente.

La diferencia casi evidente entre este tipo de panel y un panel de control de una HMI es que el primero solo busca mostrar información específica en tiempo real o almacenada en los servidores, ideal para reuniones y personas de cualquier rama.

Figura 41. **Dashboard de datos**



Fuente: Dashboard de datos. freeboard.io. Consulta: 19 de abril de 2019.

Además de ser cómodo visualmente, este tipo de panel debe ser accesible desde cualquier plataforma móvil o versión web en los dispositivos electrónicos. Esta característica debe considerar el hecho de que la información que se maneja es sensible y, por tanto, la seguridad y control web debe ser minucioso y detallado.

- **Procedimiento**

En este último apartado se debe crear un panel informativo que muestre el estado actual de tres sensores como mínimo.

En la primera parte se debe realizar la conexión con la placa del microcontrolador programable para que sea capaz de recibir las señales de entradas.

- Red de sensores

Como mínimo se deben conectar tres sensores al microcontrolador para que la información enviada sea suficiente para hacer un análisis de los cambios progresivos. Se puede utilizar un termistor en configuración de divisor de tensión, conectado a un amplificador de instrumentación para que la señal de salida sea estándar.

Además, el sensor de proximidad utilizado en una práctica anterior también puede ser añadido. Con respecto al último sensor, queda a creatividad y criterio del estudiante.

- Vinculación con la web

Existen varias plataformas web que permiten el diseño y creación de paneles de control informativos para aplicaciones industriales, semiindustriales y caseras. Entre ellas están freeboard.io, thingsboard.io y temboo.com. Es importante ratificar la compatibilidad que tengan con nuestro microcontrolador. La plataforma más recomendada es freeboard.io, debido a su simplicidad. La siguiente página puede ser de mucha utilidad bit.ly/arduino_panel en la cual se encuentran los pasos necesarios para realizar la conexión.

Después de seleccionar la plataforma adecuada, se vincula nuestra placa de microcontrolador junto con el módulo wifi con la plataforma. El intercambio de datos debe ser casi instantáneo, por lo que es recomendado tener una buena velocidad de internet.

- Visualización y entorno

Ya establecida la conexión de dispositivos y el intercambio de datos, se debe realizar el entorno de visualización web para mostrar la información correcta. Este queda a criterio propio según el tipo de datos que se desean recibir (gráficas, entradas digitales, analógicas) y el orden de muestreo.

- Interpretación

Tal y como se detalló a lo largo del cuarto capítulo, la cuarta revolución industrial se acerca y conforme el tiempo avanza, se deben adquirir las herramientas y competencias necesarias para afrontar los cambios.

- ¿Mejora la visibilidad y comprensión de la información con este *dashboard*?
- Tomando en cuenta los cambios tecnológicos que se han llevado a cabo, y los futuros, ¿cuáles son las ventajas de utilizar un proceso automatizado interconectado con la nube? ¿es seguro?

CONCLUSIONES

1. Se diseñaron prácticas de laboratorio para el curso de instrumentación eléctrica con enfoque hacia el sensado y control.
2. Se realizó un compendio de los temas impartidos en el curso de instrumentación eléctrica, los cuales, con base en su importancia, se encuentran reflejados en los primeros tres capítulos del presente documento.
3. Entre los criterios primordiales para seleccionar un instrumento de medición se encuentra el tipo de variable por medir, el tipo de alimentación su funcionamiento, la variable física de salida. Además, se debe tomar en cuenta la escala, la repetibilidad, precisión y exactitud de este.
4. El sistema de enseñanza que se usó para concebir los nuevos temas para los estudiantes es el constructivismo. De esta manera ellos adquieren las habilidades técnicas necesarias para brindar soluciones con criterio y raciocinio propio.
5. Se crearon nueve prácticas de laboratorio orientadas a los temas del curso de instrumentación eléctrica y al internet industrial de las cosas. Cada una se basa en los temas primordiales del curso y las nuevas tendencias tecnológicas.

RECOMENDACIONES

1. El impacto que tiene a nivel mundial la globalización y específicamente el internet industrial de las cosas debe analizarse conforme se acerque de lleno al mercado tecnológico guatemalteco. De esa manera se puede prevenir cambios a los programas de los cursos de la escuela y fomentar el aprendizaje continuo.
2. Los principios del sensado y control se deben aplicar metódicamente a cualquier aplicación de instrumentos de medición, ya sean inteligentes o no. Se debe priorizar siempre el criterio propio para minimizar los problemas en su totalidad.
3. En la elaboración del segundo capítulo, únicamente se tomaron en cuenta 4 puentes de medición de corriente alterna y directa. No obstante, se recomienda cubrir la otra parte de puentes de medición existentes, entre ellos el puente de Kevin y Hay.
4. Los circuitos de adquisición de datos presentan alta carga de contenido en el curso de instrumentación eléctrica. En esta tesis se detalló el acondicionamiento de señal para sensores resistivos; también se recomienda para futuras investigaciones, el acondicionamiento de señal para generadores y sensores de reactancia variable.
5. Un microcontrolador programable tiene la ventaja ante un PLC de que el precio es casi cinco veces más económico. No obstante, es posible

migrar de un microcontrolador sin representación de altos costos ni pérdida de compatibilidad de dispositivos.

6. El conocimiento adquirido debido a las prácticas de laboratorio debe verificarse a posteriori de la realización, a través de pruebas de comprensión o demostración de los métodos.
7. Aunque se cubrieron los tipos de sensores que se utilizan comúnmente en una planta industrial, se puede ampliar mucho más las prácticas de laboratorio con todos los otros tipos de instrumentos que existen.
8. Para la conexión de los dispositivos en las prácticas que requieran internet, se usa el protocolo de Ethernet IP. Sin embargo, existen otros protocolos de conexión a internet con los dispositivos y es recomendable dar otro tipo de cobertura a estos en otra investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALANDÍ, Antonio. *Estudio de la implantación del Internet de las Cosas, en las redes Logísticas de la Cadena de Suministro* Tesis de maestría. España: Universidad Politécnica de Valencia, 2010. 26 p.
2. CREUS, Antonio. *Instrumentación industrial*. 8a ed. México: Alfaomega Grupo Editor, 2010. 251 p.
3. GARCIA, Juan. *Circuitos de acondicionamiento resistivo*. Ciudad Real: Universidad de Castilla – La Mancha. 20 p.
4. GUBBI, Jayavardhana, et al. *Internet of Things (IoT): A vision, architectural events, and future directions*. Future Generation Computer Systems.
5. LUIS, Luis. *Estudio del impacto técnico y económico de la transición de internet al internet industrial de las cosas (IoT) para el caso colombiano* Tesis de pregrado. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2008. 37 p.
6. MALONEY, Timothy. *Electrónica industrial moderna*. 5a ed. México: Pearson Educación, 2006. 306 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Práctica núm. 1 y 2**

Dispositivo / material	Equivalente
Fuente de alimentación DC ajustable	
Resistencias variables	X
Resistencias fijas	X
2 galgas extensiométricas	X
Multímetro	

Fuente: elaboración propia.

En la práctica 1 y 2, se lleva a cabo la aplicación de conocimiento y diseño de puentes sensores elaborados por galgas extensiométricas simples.

Las siguientes prácticas consistieron sobre el uso de los divisores de tensión conjunto a los termistores, dispositivos comunes de medición que encontramos en la mayoría de plantas industriales.

Apéndice 2. **Práctica núm. 3 y 4**

Dispositivo / material	Equivalente
Fuente de alimentación DC ajustable	
Resistencias variables	
1 termistor	X
Multímetro	

Fuente: elaboración propia.

Las prácticas 4, 5 y 6 consisten sobre la conexión y el envío de señales digitales a través de una aplicación enfocada al internet industrial de las cosas. Esto facilita a que el envío de datos sea vía inalámbrico.

Apéndice 3. **Práctica núm. 5, 6 y 7**

Dispositivo / material	Equivalente
Fuente de alimentación DC	
Microcontrolador	X
Celular móvil de gama media	
Módulo PWM	X
Motor <i>brushless</i>	X
Leds	X

Fuente: elaboración propia.

En la octava práctica, se busca entender de lleno el funcionamiento de un encoder óptico, a través del diseño y construcción de uno.

Apéndice 4. **Práctica núm. 8**

Dispositivo / material	Equivalente
Fuente de alimentación DC	
Sensor inductivo	X
Variador de frecuencia	X
Microcontrolador	X
Dispositivo móvil	
Motor <i>brushless</i>	X
Tornillos	

Fuente: elaboración propia.

Para la última práctica de laboratorio, se puede percibir que tiene un alcance de interoperabilidad. Tres sensores conectados por medio de un

microcontrolador, capaz de subir datos en tiempo real a la web. A la vez, estos datos pueden ser Consultas desde cualquier punto.

Apéndice 5. **Práctica núm. 9**

Dispositivo / material	Equivalente
Microcontrolador programable	X
Sensor de proximidad	X
Termistor	X
Dispositivo móvil	X
Fuente de alimentación	
Computadora	

Fuente: elaboración propia.

El presupuesto completo, tomando en cuenta que sería un equipo por descripción es de Q3 920,00; tomando en cuenta el variador de frecuencia, que es uno de los dispositivos más costosos.

Apéndice 6. **Compendio**

Numeral de práctica	Tema
Práctica 1	Puentes de medición
Práctica 2	Puentes de medición
Práctica 3	Divisor de tensión
Práctica 4	Divisor de tensión
Práctica 5	Montaje de Arduino
Práctica 6	Arduino y su conectividad
Práctica 7	Arduino y el internet
Práctica 8	Diseño de encoder
Práctica 9	Panel informativo de datos

Fuente: elaboración propia.

Las nueve prácticas anteriores, se realizaron con base en el método de aprendizaje que se investigó. Si posteriormente se desean modificar por motivos de reestructuración de contenido, es recomendable ampliar el uso de fuentes bibliográficas. Además, si así se requiere, la actualización de los dispositivos electrónicos que se usaron previamente.

ANEXO

Anexo 1. **Placa Arduino**

El uso de placas de microcontroladores programables, minicomputadoras que permiten uso de software gratuito y controladores lógicos programables, permite que estudiantes a nivel mundial tengan métodos de aprendizaje innovadores, tecnológicos e incluso disruptivos.

Por ejemplo, un estudiante de ingeniería puede desarrollar un proyecto de mediana escala con algún sistema PID integrado sin mayor dificultad. Basta con reunir el equipo (no costoso) y comenzar a programarlo. Esa es una de las ventajas que presenta el uso de estos equipos.

Además, hay placas de microcontroladores enfocadas a desarrollo más profesional, incluso de nivel investigativo. Para las prácticas anteriores, sería idóneo que se llevaran a cabo en módulos de enseñanza con PLC integrado. No obstante, este último es costoso.

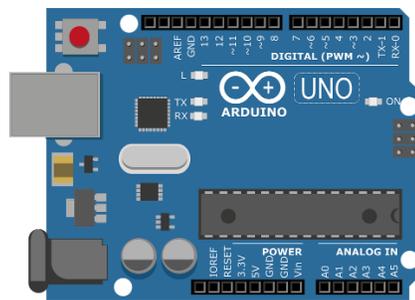
Al contrario, si se usa una placa programable como Raspberry Pi, Tiva C o Arduino, el precio total de los equipos y materiales se reduce considerablemente, ayudando a que se disponga equipo por grupo de laboratorio o incluso por estudiante.

La placa Arduino es una de las más económicas. Esta cuenta con las siguientes características:

Continuación del anexo 1.

- Microcontrolador ATmega328
- Voltaje operativo de 5VDC
- 14 pines de entradas y salidas digitales (6 cuentan con PWM)
- 6 entradas analógicas
- Velocidad de reloj de 16 MHZ

Figura A. **Placa Arduino**



Fuente: *Placa Arduino*. arduino.cc. Consulta: 20 de abril de 2019.

Además de los dispositivos que se mencionaron anteriormente, existen otras placas y controladores que fueron diseñados estrictamente para entornos y aplicaciones enfocadas al internet industrial de las cosas. Sin embargo, a manera de aprendizaje, cualquiera de los dispositivos que se mencionaron son suficientes para las prácticas.