



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

**SELECCIÓN TÉCNICA DE SENSORES DE TEMPERATURA PARA EL CONTROL DEL
CALENTAMIENTO DE BÚNKER EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO**

Edgar Danilo Morales De León

Asesorado por la Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota

Guatemala, octubre de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**SELECCIÓN TÉCNICA DE SENSORES DE TEMPERATURA PARA EL CONTROL
DEL CALENTAMIENTO DE BÚNKER EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

EDGAR DANILO MORALES DE LEÓN

ASESORADO POR LA INGA. INGRID SALOMÉ RODRÍGUEZ DE LOUKOTA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	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. Christian Moisés De La Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
EXAMINADOR	Ing. Luis Eduardo Coronado Noj
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

SELECCIÓN TÉCNICA DE SENSORES DE TEMPERATURA PARA EL CONTROL DEL CALENTAMIENTO DE BÚNKER EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 3 de octubre de 2019.

Edgar Danilo Morales De León

Guatemala 13 de abril de 2020

Ingeniero
José Aníbal Silva de Los Ángeles
Coordinador del Área de Electrotecnia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

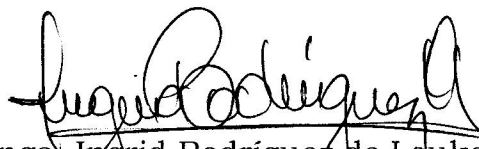
Apreciable Ingeniero Silva.

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado **"Selección técnica de sensores de temperatura para el control del calentamiento de bunker en un tanque de almacenamiento**, del señor **Edgar Danilo Morales De León**, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

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

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,



Inga: Ingrid Rodríguez de Loukota
Colegiada 5,356
Asesora

Ingrid Rodríguez de Loukota
Ingeniera en Electrónica
colegiado 5356

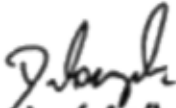
Señor Director
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **SELECCIÓN TÉCNICA DE SENSORES DE TEMPERATURA PARA EL CONTROL DEL CALENTAMIENTO DE BUNKER EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO**, del estudiante; Edgar Danilo Morales De León, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

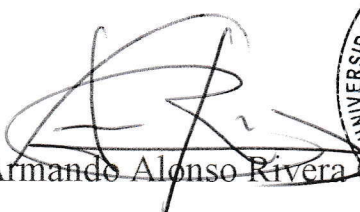
Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

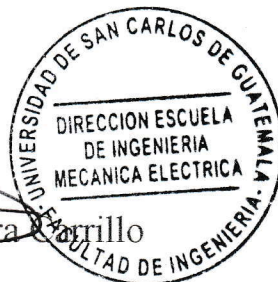
Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. José Aníbal Silva de los Angeles
Coordinador de Electrotécnica

REF. EIME 288.2020.

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 del estudiante Edgar Danilo Morales De León titulado: **SELECCIÓN TÉCNICA DE SENSORES DE TEMPERATURA PARA EL CONTROL DEL CALENTAMIENTO DE BUNKER EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo



Guatemala, 8 de julio de 2020.

DTG. 296.2020.

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 Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **SELECCIÓN TÉCNICA DE SENSORES DE TEMPERATURA PARA EL CONTROL DEL CALENTAMIENTO DE BÚNKER EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO**, presentado por el estudiante universitario: **Edgar Danilo Morales De León**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, octubre de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la oportunidad de la vida y seguir adelante con mis sueños.
Mis padres	Edgar Danilo Morales Gil y Zandra Rosalinda De León Rivadeneira de Morales, por su incondicional apoyo, guía y amor a lo largo de toda mi vida.
Mis hermanas	Dulce Valeria y Dana Mariana del Rocío Morales, por su apoyo incondicional.
Mis familiares y amigos	Por cada grato detalle que guardo en mi corazón y el gran apoyo en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de superación por medio de la educación.
Facultad de Ingeniería	Por darme los conocimientos necesarios para desenvolverme como un profesional correcto y capaz.
Mi asesora	Inga. Ingrid Rodríguez de Loukota, por tan valioso apoyo.
Mis amigos de la Facultad	Por su apoyo, tiempo y guía cuando lo necesitaba.
Mis catedráticos	Por compartir sus conocimientos para desarrollar mi formación académica.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. SELECCIÓN DE SENSORES.....	1
1.1. Selección de sensores basada en experiencia y comportamiento de sistemas previos	1
1.2. Selección de sensores basada en tecnicidad.....	3
1.3. Consideraciones generales en selección de sensores.....	7
1.3.1. Definición de la aplicación	7
1.3.2. Definición de las características de objetos a detectar.....	8
1.3.3. Características del medio donde se va a instalar el sensor	8
1.3.4. Selección de la tecnología del sensor	9
2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SENSORES.....	11
2.1. Características estáticas.....	11
2.1.1. Rango de medida	12
2.1.2. Resolución	12
2.1.3. Precisión	13
2.1.4. Repetibilidad	13

2.1.5.	Linealidad	14
2.1.6.	Sensibilidad	14
2.1.7.	Ruido	15
2.2.	Características dinámicas	15
2.2.1.	Velocidad de respuesta	15
2.2.2.	Respuesta en frecuencia	15
2.2.3.	Estabilidad	16
3.	MEDICIÓN DE TEMPERATURA	17
3.1.	Termocuplas (TC)	19
3.1.1.	Tipos de termocuplas	25
3.2.	Detectores de temperatura resistivos (RTD)	28
3.2.1.	Tipos de detectores resistivos	30
3.3.	Termistores	33
3.3.1.	Tipos de termistores	36
3.4.	Pirómetros infrarrojos	37
3.4.1.	Campos de aplicación de pirómetros	38
4.	SISTEMA DE CONTROL	39
4.1.	Definición de sistema de control	39
4.2.	Componentes de un sistema de control	39
4.2.1.	Proceso	40
4.2.1.1.	Variable de proceso	40
4.2.2.	Sensor	40
4.2.3.	Transmisor	41
4.2.4.	Controlador	41
4.2.5.	Accionador	41
4.2.6.	Elemento final de control	42

4.3.	Clasificación de los sistemas de control según comportamiento y medición.....	42
4.3.1.	Sistema de control de lazo abierto.....	42
4.3.2.	Sistema de control de lazo cerrado	43
4.3.2.1.	Estabilidad	44
5.	PROCESO DE ALMACENAMIENTO DE BÚNKER	45
5.1.	Precalentamiento de búnker en tuberías	45
5.2.	Calentamiento de búnker en tanques de almacenamiento.....	51
5.2.1.	Principio de calentamiento en tanque.....	52
5.3.	Primera etapa del circuito de circulación de búnker en caldera.....	53
5.4.	Lazo de control del proceso.....	53
6.	COMPARATIVA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES EN UN CONTROL DE TEMPERATURA DEL CALENTAMIENTO DE BÚNKER EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO	55
6.1.	Comparativa de características estáticas	56
6.2.	Comparación de características dinámicas	58
6.3.	Modelo matemático de primer orden: respuesta de los sensores	61
6.4.	Simulación de medición y acción de los sensores de temperatura	64
6.4.1.	Circuito de termocupla.....	65
6.4.2.	Circuito de RTD	66
	CONCLUSIONES	69
	RECOMENDACIONES	71
	BIBLIOGRAFÍA	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Efecto <i>seebeck</i> en un termopar	20
2.	Efecto peltier	21
3.	Curvas características fem/temperatura de las termocuplas.....	22
4.	R-t curva de comparación entre termistores y RTD	37
5.	Componentes básicos de un sistema de control.....	39
6.	Diagrama de un sistema de control de lazo abierto	43
7.	Diagrama de un sistema de control de lazo cerrado	44
8.	Circuito de transporte de búnker	46
9.	Líneas de tracing.....	49
10.	Líneas de tracing de vapor con aplicación recubierta	51
11.	Lazo de control cerrado del proceso de calentamiento de búnker	53
12.	Características de la respuesta tipo escalón del instrumento de primer orden (sensor de temperatura)	63
13.	Simulación de medición por termocupla.....	66
14.	Simulación de medición por RTD	68

TABLAS

I.	Tipos de sensores	9
II.	Características de los materiales usados para los RTD	32
III.	Comparativa de características de los sensores de temperatura: termocuplas, RTDs y termistores	56
IV.	Dinámica de elementos de detección desnudos	64

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
AO	Amplificador operacional
c.c.	Corriente continua
fem	Fuerza electromotriz
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
kΩ	kilo ohmio
μV	Microvoltio
mA	Miliamperio
mV	Milivoltio
Ω	Ohmio
%	Porcentaje
in o inch	Pulgada
R	Resistencia
R_o	Resistencia offset
τ	Tau (constante de tiempo del sistema)
V	Voltio
I/P	Señal de entrada eléctrica a salida neumática

GLOSARIO

Alifáticos	Los hidrocarburos alifáticos son compuestos orgánicos constituidos por carbono e hidrógeno. Su carácter no es aromático.
Atomización	Proceso previo a la combustión de un combustible líquido, que consiste en pulverizarlo en partículas de diámetro lo más pequeño posible.
Bomba	Máquina que se usa para extraer, elevar o impulsar líquidos y gases de un lugar a otro, en este caso, búnker.
Caldera	Aparato dotado de una fuente de calor donde se calienta o se hace hervir el agua. Puede tener varias aplicaciones.
Chaqueta	Es el encamisado de un recipiente (tanque de almacenamiento de combustible).
Corrosión	Es el deterioro de un material metálico a consecuencia de un ataque de su entorno (aire, agua, entre otros).
Impedancia	Es una medición de la oposición de corriente en un circuito cuando se aplica tensión en AC.

Oxidación	Es el ataque del oxígeno (normalmente del aire o agua) a un material, lo que produce una corrosión.
Planta	Conjunto de elementos con el objetivo de efectuar una operación particular.
Pt 1 000	Es el segundo tipo más común de RTD de platino. Pt se refiere a que el sensor está elaborado de platino; 1 000 hace referencia que a 0 °C el sensor tiene una resistencia de 1 000 ohmios.
Resistencia	Es toda oposición que encuentra la corriente a su paso por un circuito eléctrico. Frena el libre flujo de circulación de las cargas eléctricas o electrones.
Serpentín	Tubo frecuentemente espiral, utilizado para el intercambio de calor entre dos fluidos o medios.
Traceado	Sistema de calentamiento de las tuberías para evitar que aumente la viscosidad de los combustibles y que se puedan solidificar.
Viscosidad	Es el grado de mayor o menor resistencia que ofrece un líquido para fluir libremente.

RESUMEN

En este trabajo de graduación se evalúan las formas de seleccionar sensores, principalmente tres criterios: selección basada en la experiencia de los instrumentistas, el comportamiento de sistemas previos y la tecnicidad.

El trabajo está enfocado en la tecnicidad. Los sensores son evaluados de acuerdo con sus características generales. Las de más importancia para garantizar el proceso óptimo que se evalúa son el rango de medida, exactitud, linealidad, sensibilidad, velocidad de repuesta y estabilidad, así como el costo, el cual no se presenta dentro de las clasificaciones previas.

El proceso de análisis es el calentamiento de búnker por medio de la transferencia de calor de la tubería de vapor hacia el búnker en un tanque de almacenamiento. La variable de proceso es la temperatura. Al adecuar este proceso se requiere hacer énfasis únicamente en la selección de sensores de temperatura, tomando en consideración a los sensores siguientes: detectores de temperatura resistivos, termistores y termocuplas, debido a que son los adecuados para procesos industriales.

La selección del sensor de temperatura para el proceso se determina al comparar las características estáticas y dinámicas. La respuesta de los sensores en el modelo matemático de primer orden difiere por las constantes de tiempo de cada uno e incluye la simulación de la medición de temperatura. Se obtiene el sensor adecuado al obtener un balance en todos los medios mencionados, únicamente lo requerido por el sistema.

OBJETIVOS

General

Seleccionar técnicamente sensores de temperatura para el control de calentamiento de búnker en un tanque de almacenamiento.

Específicos

1. Clasificar los sensores de acuerdo con la variable de proceso por tratar.
2. Plasmar el modelo matemático del comportamiento de un sensor de temperatura con base en la respuesta frecuente a sistemas de primer orden.
3. Comparar los sensores de temperatura de acuerdo con las características estáticas y dinámicas que presentan.
4. Determinar la optimización ideal que se obtiene en el proceso de control al seleccionar técnicamente los sensores de temperatura.
5. Modelar el sistema de control con los sensores de temperatura.

INTRODUCCIÓN

En todo sistema la confianza en los resultados es de primordial importancia. Los instrumentos de medición describen su comportamiento al apartarse en mayor o menor grado del comportamiento ideal deseado, lo que muchas veces recae en la falta de confianza en el sensor o incluso en el proceso parcial o totalmente; por ende, será necesario seleccionar de forma correcta los sensores para que el proceso en cuestión asegure de forma efectiva el comportamiento apropiado.

La selección de sensores comienza con la distinción de la señal física o química, es decir, la variable de proceso. Se conoce previamente el proceso que se desea controlar; además, con esto se contará con las características apropiadas que deben tener los sensores.

La selección técnica de los sensores de temperatura es prioritaria porque el comportamiento de un sistema puede verse alterado con su variación, razón por la cual pueden ser los sensores más requeridos en la industria.

El proceso de enfoque será el control del calentamiento de búnker en tanques de almacenamiento, el cual es considerado como la primera etapa del circuito de circulación de búnker de una caldera. Lo anterior recae en la variable de proceso, la temperatura, y en seleccionar técnicamente los sensores que se adecuen a la variable.

Con el enfoque en la selección técnica de los sensores de temperatura se priorizan las características estáticas y dinámicas de estos, se desarrollan

modelos comparativos que sustenten la estabilidad y adecuándose objetivamente al comportamiento ideal o valor teórico de un sensor.

Al referir la terminología “selección técnica de los sensores” se incurre en la optimización, porque se habla de la instrumentación necesaria para tener un buen control, eficiencia e incluso un buen ahorro económico. Por ende, al garantizar una correcta selección de sensores de acuerdo al proceso se podrá hacer mediciones concretas, eficientes y con muy pequeño error.

1. SELECCIÓN DE SENSORES

1.1. Selección de sensores basada en experiencia y comportamiento de sistemas previos

Seleccionar adecuadamente sensores en la industria corresponde en gran parte al criterio del personal que trabaja en instrumentación, el cual posee conocimiento previo acerca del sistema que trata o de sistemas similares o relacionados. Es por este criterio que en los procesos de selección de personal se busca a instrumentistas o expertos en la materia, para que desarrollen el control de procesos y selección de sensores basados en una trayectoria a lo largo de la carrera profesional, principalmente en la industria y en el control de procesos. Por tanto, se busca instrumentistas con amplia experiencia en su campo, es decir, que brinden soluciones por medio de todo lo que conocen.

La selección de sensores con base en la experiencia del personal de instrumentación se puede correlacionar con los procesos de calibración. Los profesionales mencionan que los instrumentistas con demasiada experiencia en el campo obvian la documentación en los procesos de calibración, por su amplia experiencia, pero tal paso es requerido actualmente en cualquier proceso certificado.¹

Dada esta correlación se puede afirmar que la experiencia del personal abarca muchos procesos, tales como la calibración de los instrumentos y la selección de los sensores. Lo indicado por el autor abarca nuevos parámetros

¹ CREUS SOLÉ, Antonio. *Instrumentos industriales, su ajuste y calibración*. p. 2.

por cumplir para satisfacer los procesos en nuevos ámbitos que la industria exige.

Se debe recordar que la experiencia es fundamental para el uso apropiado de la información disponible, lo cual concatena con los juicios a priori que los profesionales plantean sobre los sistemas industriales, basados en la experiencia y conocimientos generales. Esta es la destreza que puede adquirirse con la práctica.²

En referencia a la primera división de selección de sensores, para entrar en esta clasificación deben tener o ser personal con un nivel de entrenamiento, educación, conocimiento técnico y experiencia suficientes para el trabajo que tienen asignado.³

El personal de instrumentación que se basa en sistemas previos para definir parámetros en sensores o seleccionarlos, primero prefijan valores en un proceso con sensores arbitrariamente seleccionados con base en la observación previa, para posteriormente ajustar tales valores definitivamente; es decir, adoptar valores iniciales con base en su experiencia y luego ser ellos quienes corrijan su valor deseado, lo que afecta el lazo de control.

La experiencia corresponde a un campo más amplio que solo conocer los sistemas por haber trabajado en ellos. La experiencia del personal de instrumentación se basa en saber que los sensores se limitan con ciertas características que los hacen más fiables y precisos en sus tareas. Deben conocer a la perfección cada estructura e incluso el principio de funcionamiento

² CREUS SOLÉ, Antonio. *Instrumentos industriales, su ajuste y calibración*. p. 3.

³ *Ibíd.*

de cada uno de ellos, y saber que cada uno adoptará un trato diferente para que funcione óptimamente.⁴

En última instancia, la selección de sensores basada en experiencia estará ligada a los proveedores en el mercado, porque su experiencia será necesaria para que ellos mismos comprendan los retos que el cliente (personal de instrumentación de planta) afronta; necesitarán ser conocedores, lo cual es vital para la confiabilidad y productividad de la planta o un simple proceso.⁵

1.2. Selección de sensores basada en tecnicidad

En la selección basada en tecnicidad se debe interpretar como la parte técnica reconocer los tipos, normas, construcción, montaje, conexión y características de sensores.

La tecnicidad corresponde a la comparación exhaustiva referente a los atributos que presenten los distintos tipos de sensores y que puedan calificar como una mejor opción sobre los demás. Al referenciar los tipos de sensores, se está expresando la tecnología o principios de funcionamiento de cada uno; por ejemplo, al referenciar sensores de temperatura se puede mencionar los siguientes tipos: RTD, termistores, termocuplas, pirómetros infrarrojos, entre otros. Cada una de las tecnologías mencionadas también posee su subdivisión o tipos. Por ejemplo, los tipos de termocuplas más comunes son:

- Tipo E–Cromel y constantán
- Tipo J–Hierro y constantán

⁴ CABEZA, Carlos. *Instrumentación industrial*. <https://bit.ly/2wco396>.

⁵ ROSEMOUNT. *Instrumentación de Rosemount para la industria petroquímica*. <https://www.emerson.com/documents/automation/brochure-instrumentaci%F3n-de-rosemount-para-la-industria-petroqu%EDmica-es-76352.pdf>.

- Tipo K–Cromel y alumel
- Tipo R y S–Platino y rodio (diferente en el % de platino)
- Tipo T–Cobre y constantán

Los tipos de termocuplas u otro tipo tecnología también harán una diferencia al seleccionar el sensor. No solo se considerará el principio de funcionamiento sino también el tipo de construcción referenciado a los materiales o aleaciones empleados. Estos denotarán las características estáticas y dinámicas de los sensores.

En la construcción de los sensores cabe recalcar los materiales contenedores, los cuales proporcionan protección contra la entrada de materiales extraños, polvo, filtraciones de agua, entre otros. Los materiales de construcción contenedora o protección externa de un sensor pueden seleccionarse con base en el área de montaje o ambiente al cual será sometido el instrumento. Es posible determinar este grado bajo la norma IEC 60 529, el estándar DIN 40 050 – 9 y NEMA 250, los cuales detallan la protección que se le brinda al sensor. Por regla, en la medida de lo posible se debe elegir sensores que resulten menos sensibles al ambiente de operación. Como ejemplo se puede mencionar, con base en IEC 60 529, los grados de protección que presentan los sensores de temperatura en algunas de sus aplicaciones:

- Sensor de temperatura de inserción (aplicación: monitorización de la temperatura durante la elaboración de cerveza)–IP 69 K/IP 67/IP 68
- Sensor de temperatura sin contacto (aplicación: control de temperaturas de proceso)–IP 67

- Termocupla Tipo K/ Termocupla Tipo J/ para enroscar (aplicación: temperatura de gas)–IP 67

Tal como se observa en los ejemplos, actualmente la mayoría de los sensores que se comercializan en el mercado tienen un nivel de protección mínimo de IP 67, lo cuales los hacen aptos para soportar la mayoría de los ambientes agresivos que se dan en la industria.

Para seleccionar el sensor basado en tecnicidad se toma en cuenta la conexión/montaje. Estos aspectos irán en forma paralela de acuerdo con las disponibilidades que presente el sistema; por ende, se corroboran todos los aspectos técnicos antes mencionados y se sigue con los que serán propios de los fabricantes de sensores. Estos aspectos influyen en la adecuación del sensor a las necesidades del proceso. Por lo general, dichos aspectos están presentes en los manuales de usuario que presentan los fabricantes y pueden ser solicitados para una revisión exhaustiva antes de adquirir los sensores. Por ejemplo, se menciona sensores de temperatura de inserción, de temperatura de inmersión, de temperatura sin contacto (roscado), los cuales son opciones de montaje de acuerdo a la disponibilidad del sistema. En la etapa de conexión/montaje, dentro de los manuales generalmente se presenta la forma de adecuar el sensor al sistema, por ejemplo: se puede citar a un sensor de temperatura en un recalentador y su forma de instalación estará dada, ya sea en forma vertical a la dirección del flujo, inclinados contra la dirección del flujo, con grados de inclinación, etc. Esta disposición es de gran importancia al momento de adquirir un sensor. En casos extremos de no poder adaptarlo se tendrá que modificar el sistema (solo si es posible) o sustituir el sensor por otro que cumpla con la disponibilidad del sistema, lo cual incurre en gastos no contemplados.

La comunidad instrumentista tiene a su disposición normas o estándares que establecen los lineamientos para representar e identificar los instrumentos con sus funciones inherentes, sistemas y funciones de instrumentación. Las normas están creadas por instituciones nacionales e internacionales para que se pueda mantener un estándar o comparativa en la rama de instrumentación. Dentro de las instituciones se puede mencionar las siguientes: International Electrotechnical Commission (IEC), Deutsches Institut für Normung (DIN), American National Standards Institute (ANSI), International Society of Automation (ISA), entre otras.

Como última instancia y posiblemente la más importante, se plasman las características de los sensores que se adecuan como una clasificación de tecnicidad. El término hace referencia a la forma de actuación o comportamiento del sensor en distintos regímenes.

Coloquialmente las características son reconocidas, se afirma que, en la clasificación de los instrumentos al aceptar ciertos atributos particulares como la exactitud, sensibilidad, resolución y el costo, así como la disponibilidad en diferentes aplicaciones; las dos últimas no corresponden a características sino a disposiciones o limitaciones inherentes a las características.⁶

Al enfatizar el punto anterior, se afirma que el punto de partida en la selección del instrumento específico para una medición particular en un proceso, consiste en estudiar minuciosamente las características requeridas, en especial parámetros como exactitud, resolución y sensibilidad deseados en la medición.⁷

⁶ MORRIS, Alan S. *Principios de mediciones e instrumentación*. p. 8.

⁷ *Ibíd.*

Lo importante y necesario únicamente es vincular el sensor con los requerimientos. Resulta contradictorio no seguir tal recomendación, porque elegir un sensor con características distintas implicaría un costo elevado al seleccionar algo con peores o mejores características.

De forma correlativa, si un sistema exige mejores características de un sensor, sería necesario adquirirlo a pesar del costo elevado que pueda presentar. El costo inicial es un factor, pero lo importante es su duración, mantenimiento y constancia del desempeño a través del tiempo.

1.3. Consideraciones generales en selección de sensores

Existe diversidad de consideraciones al seleccionar sensores. Las más comunes son las siguientes.

1.3.1. Definición de la aplicación

Seleccionar un sensor es adaptarlo a las necesidades del sistema, lo cual se traduce como primera consideración en cuál es el futuro trabajo del sensor.

A continuación se presentan las aplicaciones que pueden efectuar los sensores de forma general. El sensor podría determinar:

- Presencia y conteo de objeto o productos
- Inspección de productos
- Medición de distancia
- Posición de parte móvil en máquina
- Detección de una marca
- Medición de temperatura, presión o flujo

1.3.2. Definición de las características de objetos a detectar

Se debe conocer las características del objeto por detectar, debido a que es oportuno para la selección de la familia de sensores.⁸ La definición de las características a detectar son:

- Tamaño, dimensiones o forma
- Color
- Características físicas
- Material o estado del material

Al hacer una retrospección de algunas de las aplicaciones o características del objeto por detectar mencionadas, se debe fijar claramente que son procesos de cualquier índole ligados a las variables de proceso y variables mecánicas, las cuales ponen las pautas para la elección del sensor.

1.3.3. Características del medio donde se va a instalar el sensor

En muchas ocasiones, el mal funcionamiento de un proceso se debe a la falta de contemplación del medio en el cual se instalan los sensores, por lo cual se debe contemplar:

- Temperatura recomendada en la hoja técnica del sensor
- Humedad y condensación
- Polvo
- Ambientes controlados e intemperie
- Vibraciones

⁸ FLORES, Randal. *7 pasos para elegir adecuadamente el tipo de sensor para mi aplicación*. <https://bit.ly/2weXyjf>.

- Campos electromagnéticos

1.3.4. Selección de la tecnología del sensor

La clasificación de sensores se presenta principalmente de acuerdo con su actuar en la electricidad y magnetismo, por lo tanto, se presentan de forma ordenada con sus respectivas subdivisiones:

Tabla I. **Tipos de sensores**

Sensores resistivos	Resistencias metálicas dependientes de la temperatura
	Galgas extensiométricas
	Termistores y otros sensores resistivos (NTC, LDR, Magneto-resistencias)
	Sensores potenciométricos
Sensores capacitivos	Condensadores planos
	Condensadores cilíndricos
	Condensadores diferenciales
	Sensores capacitivos de proximidad
Sensores inductivos	Sistemas de inductancia variable
	LVDT y otros sensores similares
	Sensores inductivos de proximidad
Sensores generadores de señal	Termopares
	Sensores termoelectrónicos
	Sensores optoelectrónicos
	Sensores de efecto Hall

Fuente: elaboración propia.

La tabla I presenta una clasificación de sensores basada en el funcionamiento, porque es la más acorde en selección; a pesar de esto, existen otro tipo de clasificaciones generales de sensores.

Lo más importante es conocer el principio de funcionamiento de los sensores porque a partir de esta base, el personal de instrumentación elegirá adecuadamente para su sistema en cuestión.

Al enfatizar sobre el principio de funcionamiento y la medición de temperatura, se menciona que existe diversidad de fenómenos que se encuentran determinados por la variable “temperatura”, que son utilizados para medirla: variaciones en volumen o estado de los cuerpos, en resistencia de un conductor o semiconductor, la fem creada en la unión de dos metales, intensidad de radiación, entre otros.⁹

Al observar algunos fenómenos o variaciones, es notorio que cada uno representa un principio de funcionamiento; por ejemplo, las variaciones en volumen o en estado de los cuerpos es denominada técnicamente “expansión térmica” y corresponde a un principio de funcionamiento, porque es un principio físico que rige la operación de un sensor.

La mención de los principios de funcionamiento de una aplicación en particular no garantiza que cualquiera de estos deba ser utilizado en cualquier sistema, porque se debe recordar la regla de seleccionar con base en las necesidades y limitaciones del sistema y adecuarse únicamente a ellas.

⁹ CREUS SOLÉ, Antonio. *Instrumentación industrial*. p. 235.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SENSORES

A partir de la selección técnica de sensores, con base en la tecnicidad en donde se hace énfasis en la consistencia de estudiar con todo cuidado la especificación de las características requeridas del sensor, se procede a su examen a profundidad. Este conocimiento resulta esencial cuando se diseñan sistemas de medición para asegurar el cumplimiento de los requerimientos de la medición, así como el uso adecuado de los sensores con relación a las condiciones de operación previstas del sistema.¹⁰ Es por esto que el desempeño y exactitud de los sistemas está impactado en gran medida por las características de los sensores.

Se debe considerar la existencia de variaciones en las características de los sensores, tanto cuando se evalúa la señal de salida como ante entradas constantes o entradas que varían, lo que repercute en la rapidez de la señal de salida. Por esta razón se pueden dividir las características de los sensores en dos categorías: estáticas y dinámicas.

2.1. Características estáticas

La pauta para la caracterización de un sensor parte de condiciones estáticas o permanentes, o de la actuación del sensor en régimen permanente. En este se hace referencia a cómo se comporta la salida de un sensor cuando

¹⁰ CREUS SOLÉ, Antonio. *Instrumentos industriales, su ajuste y calibración*. p. 3.

la entrada se mantiene en un valor constante o ha transcurrido un tiempo suficientemente largo desde el último cambio en la entrada.¹¹

2.1.1. Rango de medida

También denominado escala o intervalo de un sensor, corresponde al conjunto de valores admisibles en la entrada al sistema, y abarca entre un menor y un mayor valor.

En otras palabras, se expresa al establecer dos valores extremos. Por ejemplo, un instrumento de temperatura de 100 – 300 °C.

Se menciona que existe otro concepto denominado dinámica de medida o rangeabilidad, correspondiente a la relación entre el valor superior e inferior de la medición de un instrumento. También se define conceptualmente como la relación que existe entre el alcance y la resolución.¹²

2.1.2. Resolución

Se define como el mínimo cambio o variación en la entrada que causa la modificación apreciable o detectable del valor de la salida. La resolución está expresada en tanto por ciento de la salida de toda la escala o al igual que el umbral. Se especifica algunas veces como un valor absoluto.

“Uno de los principales factores que afectan la resolución de un instrumento es la cantidad de subdivisiones que presenta la escala de salida”.¹³

¹¹ PÉREZ ARCHILA, Luis Manuel. *Diseño de simulaciones, utilizando Labview, para el curso de sistemas de control 1 de la Escuela de Mecánica Eléctrica*. <https://bit.ly/2wfGSrQ>. p. 6.

¹² CREUS SOLÉ, Antonio. *Instrumentos industriales, su ajuste y calibración*. p. 6.

¹³ MORRIS, Alan S. *Principios de mediciones e instrumentación*. p. 22.

2.1.3. Precisión

Es el grado de dispersión del resultado de la medida cuando esta se repite un número determinado de veces bajo condiciones especificadas.

En otras palabras, un sensor es preciso cuando se presenta una señal de entrada con un mismo valor en varias ocasiones y el resultado o señal de salida se mantiene con valores muy similares.

La precisión puede ser malinterpretada en muchas ocasiones, al mezclar el valor real con el concepto de precisión. Sin embargo, es importante destacar que un sistema puede ser extraordinariamente preciso y dar un resultado muy alejado del real.¹⁴ Si se dispone de conocimiento del valor real, se pueden manejar dos conceptos que definen mejor el comportamiento de un determinado sistema:

- Veracidad: concepto cualitativo que expresa la concordancia entre el valor promediado de varias medidas con el valor real.
- Exactitud (accuracy): concepto cualitativo que agrupa la precisión y la veracidad.

2.1.4. Repetibilidad

Se puede interpretar como el error esperado al medir varias veces; de esta concepción nace el error de repetibilidad.

¹⁴PÉREZ GARCIA, Miguel Ángel. Instrumentación electrónica. <https://bit.ly/3b0113Z>.

Las medidas durante este proceso se identifican sobre un mismo valor, tomadas en tiempos próximos, con el mismo sistema de medida y realizadas por el mismo operador.

El concepto de reproducibilidad consistente en la similitud de concepto de repetibilidad, pero con las variantes de tomar las medidas en tiempos no próximos, diferentes equipos y diferentes operadores.

La repetibilidad y reproducibilidad se pueden expresar cuantitativamente o se pueden cuantificar por medio de la desviación estándar, dados los resultados dispersos.

2.1.5. Linealidad

Se espera idealmente que la respuesta real de un sensor sea del todo lineal; es decir, que la salida del sensor sea linealmente proporcional a la entrada de este. La respuesta de los sensores nunca es del todo lineal (la falta de linealidad se define como la desviación máxima); es lineal si existe una constante de proporcionalidad única que relacione los incrementos de la salida respectivamente con la entrada en todo el intervalo.

2.1.6. Sensibilidad

Es la razón entre el incremento de la señal de salida (deflexión de escala) y el incremento de la variable que lo ocasiona (valor de la cantidad que se mide el cual provoca deflexión), después de haberse alcanzado el estado en reposo. Mientras más grande sea la variación de la salida producida por la variación de la variable de entrada, el sensor es más sensible.

2.1.7. Ruido

Es una señal no deseada o perturbación eléctrica en un circuito o sistema.

2.2. Características dinámicas

Describen la respuesta dinámica de un sensor, es decir, en régimen transitorio.

La caracterización dinámica del sensor es referente al proceso de evaluar, por un lado, la rapidez en la salida de un sistema ante cambios en la entrada y, por otro, la forma en que la salida evoluciona del valor inicial al final.¹⁵

2.2.1. Velocidad de respuesta

Presente en el sensor como la capacidad de la señal de salida de seguir homológamente las variaciones de la señal de entrada. Esta característica se presenta como un tiempo fijo o puede presentarse dependiente de cuánto varíe la magnitud por medir.

2.2.2. Respuesta en frecuencia

La caracterización dinámica se puede desarrollar en dos ámbitos: dominio de la frecuencia y dominio del tiempo. En el primero se considera que el sistema es muy rápido cuando la salida es capaz de responder a frecuencias muy elevadas en su entrada. Paralelamente, se describe la respuesta en frecuencia como la capacidad del sensor de responder a las variaciones de la señal de entrada a medida que aumenta la frecuencia. “El dominio del tiempo

¹⁵ PÉREZ ARCHILA, Luis Manuel. *Diseño de simulaciones, utilizando Labview, para el curso de sistemas de control 1 de la Escuela de Mecánica Eléctrica*. <https://bit.ly/2wfGSrQ>.

se considerará muy rápido cuando, ante un cambio brusco en la entrada, su salida es capaz de pasar del valor inicial al valor final en un plazo muy corto de tiempo”.¹⁶

2.2.3. Estabilidad

La estabilidad es, en forma homóloga, una forma de indicar la “desviación” en la señal de salida respecto a un valor previo estipulado, derivado de la variación de parámetros externos distintos a la variable de medición. Afín y consecuente, es la capacidad del sensor de mantener su comportamiento.

¹⁶ PÉREZ ARCHILA, Luis Manuel. *Diseño de simulaciones, utilizando Labview, para el curso de sistemas de control 1 de la Escuela de Mecánica Eléctrica*. <https://bit.ly/2wfGSrQ>.

3. MEDICIÓN DE TEMPERATURA

La base en la selección de sensores es elegir correspondientemente la variable de proceso del sistema; en este caso se ha determinado como la temperatura. Esta es una medida de la actividad molecular interna de un material. Cuando aumenta el nivel de actividad molecular, aumenta la temperatura del material. El calor o el frío son descripciones subjetivas y cualitativas de un cambio en la actividad molecular.

La temperatura es la variable más ampliamente medida en procesos industriales o en entornos de laboratorio. “Incluso en muchos casos la temperatura no es el parámetro de interés, pero se ha de medir para incluir indirectamente su efecto en la medida deseada”.¹⁷ Por ende, la medición de temperatura se considera una parte crítica en un proceso. Si una medición de temperatura es inexacta o no es confiable, puede tener un impacto en el resultado final o un efecto perjudicial en la composición del flujo de proceso, eficiencia del proceso, el consumo de energía y la calidad del producto o servicio.

La temperatura, aparte de ser la variable más ampliamente medida, es una de las cuatro variables de proceso básicas (las otras son presión, flujo y nivel).

Actualmente se necesitan mediciones exactas de temperatura para muchas aplicaciones, investigación de materiales en laboratorio, estudios de

¹⁷ ALZATE, Edwin. et. al. *Medición de temperatura: sensores termoeléctricos*. <https://bit.ly/2WhydQj>.

componentes electrónicos o eléctricos, construcción de máquinas, instalaciones de calefacción, hornos, así como en la industria en general. “Con la necesidad en la industria de procesos de ser más consistente teniendo formas precisas de describir la temperatura, se llevó la invención de dispositivos de medición de temperatura o sensores. Estos utilizan escalas de temperatura estándar reconocidas universalmente”.¹⁸ Estas escalas dependen de procesos naturales de los que guiarse o tomar base. Las escalas proporcionan una manera objetiva-cuantitativa de describir la temperatura. Las cuatro escalas de temperatura usadas hoy son Fahrenheit, Celsius, Kelvin y Rankine. Las dos primeras son las comerciales para aplicaciones de cualquier índole.

Con mayor frecuencia, los sensores de temperatura se usan para medir la temperatura en circuitos que controlan una variedad de procesos. En entornos industriales, las altas temperaturas de proceso, presiones, vibración, se hace necesario tener un sensor de temperatura robusto con características como el rápido tiempo de respuesta, precisión y estabilidad, entre otras que definirán la aplicación del mismo sensor.

Mientras que existe una gran variedad de sensores de temperatura disponibles que se han desarrollado a lo largo de los años, se reconoce que todos ellos infieren temperatura a través de algún cambio en una característica física del sensor. Los que se encuentran comúnmente son los termistores, pirómetros infrarrojos, RTDs, termocuplas, fibra óptica, entre otros. “Los dos más utilizados en la medición en procesos industriales son los detectores de temperatura resistivos (RTD) y termocuplas (TC)”.¹⁹

¹⁸ MCMILLAN, Gregory K. *Advanced temperature measurement and control*. p. 2.

¹⁹ *Ibíd.*

“A partir del año 2002, las termocuplas midieron del 50 % al 60 % de la toda la temperatura industrial, los RTD del 30 % al 40 %, los termistores y pirómetros ópticos midieron menos temperaturas cada vez más, respectivamente”.²⁰

“Más de un 99 % de los lazos de temperatura en la industria utilizan estos sensores”²¹, siempre acorde a las necesidades de la industria y las características que solicita el proceso, así como el tema principal, que es selección del sensor acorde a las necesidades que se presenten.

3.1. Termocuplas (TC)

Las termocuplas o termopares son dispositivos para la medición de la temperatura, basados en el efecto termoeléctrico. Comúnmente son utilizados en la zona industrial. Una termocupla está formada por conductores metálicos o de aleaciones diferentes y constituye un circuito cerrado; es decir, conductores unidos por los extremos en donde se crea un diferencial de temperatura que origina una fem.

La termocupla se basa en el efecto descubierto por Thomas Johan Seebeck 1821. En una termocupla, este efecto se presenta por la aparición de una corriente eléctrica dependiente del diferencial de temperatura entre las uniones caliente (medida) y fría (referencia), como se observa en la figura 1.

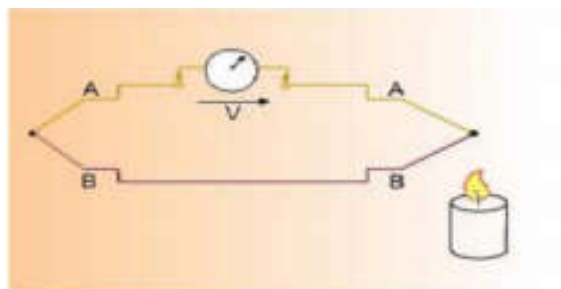
El elemento de unión caliente es posicionado dentro de una funda (vaina) del sensor y se expone al proceso. La unión fría es el punto de terminación fuera del proceso donde se conoce la temperatura y se mide el voltaje; este

²⁰ HASHEMIAN, H. RTDs vs. Thermocouples: *Measuring industrial temperatures*. <https://bit.ly/2x4EQuF>.

²¹ MCMILLAN, Gregory K. *Advanced temperature measurement and control*. p. 3.

punto de terminación suele ser una tarjeta de entrada del sistema de control o un transmisor de temperatura.²² La conexión entre los dos alambres se efectúa fundiendo soldadura de plata o, en algunos casos, solo amarrando los extremos del alambre entre sí. La soldadura es la técnica que se usa con mayor regularidad. La soldadura de plata se reserva para los instrumentos de cobre–constantán.

Figura 1. **Efecto Seebeck en un termopar**



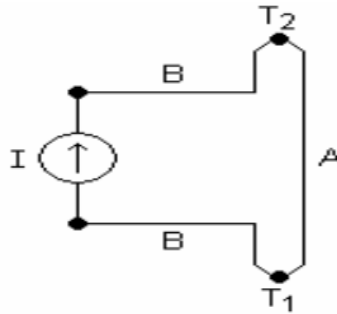
Fuente: ALZATE, Edwin. et al. *Medición de temperatura: sensores termoelectricos*.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84934001>. Consulta: 4 de febrero de 2020.

La circulación de corriente obedece a dos efectos termoelectricos combinados: el descubierto por Jean C.A. Peltier 1834 y el descubierto por William Thompson 1854.

²² STREHLKE, Natalie. *How to select the best sensor for an industrial high-temperature measurement system*. <https://bit.ly/39VFhX5>.

Figura 2. **Efecto Peltier**



Fuente: ALZATE, Edwin. et al. *Medición de temperatura: sensores termoeléctricos*.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84934001>. Consulta: 4 de febrero de 2020.

La corriente dada por la combinación de los dos efectos mencionados afecta la exactitud, directamente proporcional con la temperatura. Se recomienda tener este valor en lo mínimo, dado que afecta la medición.

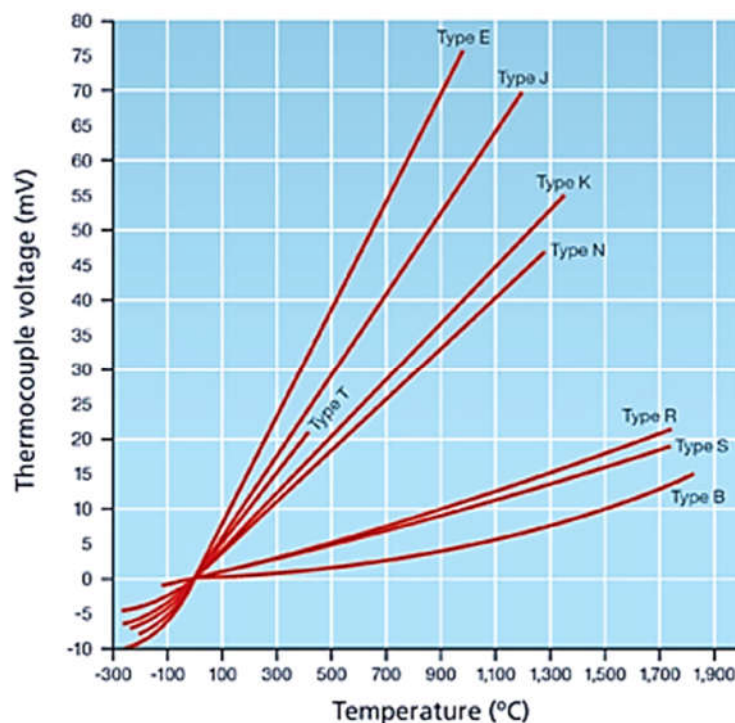
El comportamiento de las termocuplas está basado en tres leyes fundamentales:

- Ley del circuito homogéneo
- Ley de los metales intermedios
- Ley de las temperaturas sucesivas o intermedias

Tales leyes proporcionan la referencia en un circuito de termocupla. Se desarrolla una pequeña tensión continua que es proporcional a la temperatura de la unión de medida, se da cuando existe un diferencial de temperatura con la otra unión).

Las temperaturas referentes a las termocuplas termopares se pueden encontrar con la ayuda de las tablas de referencia IEC 60 584, en donde se deduce la temperatura en el punto de conexión, unión caliente. Además, se presentan las curvas características y los coeficientes de ajuste de curvas figura 3 que pueden utilizarse como guía en la selección de los mismos sensores y están disponibles en el National Institute of Standards and Technology (NIST).

Figura 3. **Curvas características fem/temperatura de las termocuplas**



Fuente: STREHLKE, Natalie. *How to select the best sensor for an industrial high-temperature measurement system*. <https://automation.isa.org/how-to-select-best-sensor-industrial-high-temperature-measurement-system/>. Consulta: 5 de febrero de 2020.

El otro aspecto importante referente a termocuplas es que se hace énfasis en los materiales de construcción de los alambres que darán las características distintivas. Se debe garantizar, independientemente del tipo de termocupla, una adecuada resistencia a la corrosión, oxidación, que sean estables, baratas, baja resistencia eléctrica, que desarrollen una fem relativamente alta relacionada con la temperatura proporcionalmente con respuestas rápidas. El término estable bajo la comparativa con otros sensores se presentará en una menor calidad; además, la característica de precisión presentará una degradación con el tiempo.

Las características de las termocuplas dependen del material de construcción, pero en general presentan:

- Rangos de medidas: se adaptan a altas temperaturas. Son los únicos sensores de contacto que pueden medir altas temperaturas. Poseen un amplio catálogo de rangos de medida.
- Resolución, precisión y repetibilidad: cuanto mayor sea la magnitud de salida de voltaje, mayor será la resolución de medición, lo que aumenta la repetibilidad y la precisión.
- Linealidad: será correspondiente al metal o aleaciones de metal utilizados en la construcción de termocuplas. Los tipos E, K y J, en una porción del rango de medida presentan linealidad. Los otros tipos mayoritariamente se desvían significativamente a temperaturas extremadamente frías o calientes.
- Resistencia a la vibración: las termocuplas son los sensores más robustos, son simples en diseño, resistentes a las vibraciones.

- Respuesta rápida: una termocupla de unión expuesta proporciona la respuesta más rápida a los cambios de temperatura.

Un aspecto importante que modifica las características de las termocuplas son las configuraciones de la unión caliente, que alteran el campo de la rapidez de respuesta, una respuesta precisa y su susceptibilidad al ruido. Por ende, se propone que las uniones pueden estar conectadas (aterrizadas a tierra) o desconectadas (no aterrizadas a tierra) a la cubierta (funda o vaina) del sensor.

A continuación, se menciona las siguientes configuraciones de unión caliente:

- Aterrizado a tierra: crea una conductividad térmica mejorada, que a su vez proporciona el tiempo de respuesta rápido (susceptibilidad al ruido).
- Sin conexión a tierra: poseen un tiempo de respuesta más lento que las uniones conectadas a tierra, pero son susceptibles al ruido eléctrico.
- Sin aislar: están a la misma temperatura, pero ambas uniones generalmente fallarán al mismo tiempo.
- Aislado: las uniones aisladas pueden o no estar a la misma temperatura. Se aumenta la fiabilidad de cada unión.

3.1.1. Tipos de termocuplas

“Al elegir una termocupla, se debe considerar el aislamiento, el tipo y la construcción de la sonda”.²³

Hay muchos tipos de termocuplas compuestas de varias combinaciones de metales o aleaciones de metales. Estas tienen diferentes características de salida que definen el rango de temperatura aplicable, así como la salida de voltaje correspondiente. Como se mencionó, cuanto mayor sea la magnitud de salida de voltaje, mayor será la resolución de medición, lo que aumenta la repetibilidad y precisión.

Los termopares se producen con materiales específicos para cubrir determinadas especificaciones, lo que asegura conocer el comportamiento termoeléctrico del instrumento con exactitud.²⁴

Las termocuplas más comunes son:

- Tipo K (NiCr–Ni): se le conoce también como la termocupla cromel–alumel. Es una de las más comunes de uso general, dada su habilidad de resistir mayores temperaturas que la tipo J. Este tipo presenta una sensibilidad de aproximadamente $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Es un sensor barato; su rango de medida es de -270°C a $+1372^\circ\text{C}$ y es relativamente lineal. Puede utilizarse en atmósferas oxidantes continuamente. Evitar la exposición en atmósferas reductoras y sulfurosas.

²³SENSORAY. *Comparison of thermocouples, RTDs, and thermistors*. <https://bit.ly/3aZtqHu>.

²⁴ MORRIS, Alan S. *Principios de mediciones e instrumentación*. p. 184.

- Tipo E (NiCr–CuNi): conocida como cromel–constantán, adjudicada como la termocupla con mayor fem de salida en comparación a las otras (estándar). Posee la sensibilidad más alta de $68 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ y un rango de medida de -270°C a $+1\,000^\circ\text{C}$. “Estas termocuplas se desempeñan satisfactoriamente en vacío o en atmósfera inerte o medianamente oxidante o reductora”.²⁵
- Tipo J (Fe–CuNi): es conocido como la termocupla hierro–constantán, “es el segundo tipo más utilizado a nivel industrial”.²⁶ Tiene un potencial de rango de medida más restringido que el tipo K y comprende desde -200°C a $+1\,200^\circ\text{C}$, pero posee una mayor sensibilidad de aproximadamente $50 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. “Las atmósferas tanto oxidantes como reductoras afectan poco su desempeño”.²⁷
- Tipo N: este tipo es relativamente un nuevo diseño que logra una estabilidad termoeléctrica considerablemente mayor que los tipos E, J, K y T. Logra una sensibilidad de $39 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ y un rango de medida de -270°C a $+1\,300^\circ\text{C}$. Este tipo surge de intentos por mejorar el desempeño y estabilidad de las termocuplas tipo K. Su característica termoeléctrica es similar al tipo K, con una mejor estabilidad que su resistencia a la oxidación a altas temperaturas.
- Tipo B (PtRh 30 %–PtRh 6 %): este tipo posee una sensibilidad de $10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, tiene un rango potencial de medida de 0°C a $+1\,820^\circ\text{C}$, sufre menos por los problemas de exposición a altas temperaturas que afectan a las tipo R y S. Además, poseen ventajas sobre las termocuplas

²⁵ CREUS SOLÉ, Antonio. *Instrumentación industrial*. p. 257.

²⁶ ALAS RAMOS, Lucas Gilberto. *Elaboración de una guía para la selección de sensores y accionadores en el control de procesos industriales. Aplicación práctica*. <https://bit.ly/2U9dbRi>.

²⁷ MORRIS, Alan S. *Principios de mediciones e instrumentación*. p.186.

mencionadas porque tienen una mayor estabilidad y resistencia mecánica. Este tipo de termocupla resulta satisfactorio para uso continuo en atmósferas oxidantes o inertes; sin embargo, carece de una alta tensión de salida y no puede ser utilizado en atmósferas reductoras cuando se encuentran vapores metálicos o no metálicos.²⁸

- Tipo R (PtRh 13 %–Pt): este tipo posee una baja sensibilidad de $10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, con un potencial en su rango de medida de -50°C a $+1768^\circ\text{C}$. La exposición a altas temperaturas por largo plazo puede provocar fallas mecánicas y una deriva de calibración negativa. Como característica de aplicación, se emplean en atmósferas oxidantes.
- Tipo S (Fe–CuNi): poseen características similares a las termocuplas tipo R e igualmente pueden ser utilizados en atmósferas oxidantes o inertes. Tienen las mismas limitaciones que las tipo R y B, son menos estables cuando se utilizan en vacío en comparación las de tipo.²⁹

Se puede mencionar otras termocuplas de uso reciente como las tipo C, D, G, L y U; las dos primeras bajo la norma ASTM E 988, las siguientes tres bajo DIN 43710. De forma general, las características de las termocuplas no mencionadas están determinadas como las termocuplas de metales nobles. Siempre son caras pero poseen elevada estabilidad y una vida prolongada en condiciones de alta temperatura o ambientes oxidantes.

Las de platino y de aleación platino-rodio presentan sensibilidad de medición de solo $10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, mientras que los sensores alternativos elaborados a

²⁸ ALAS RAMOS, Lucas Gilberto. *Elaboración de una guía para la selección de sensores y accionadores en el control de procesos industriales. Aplicación práctica*. <https://bit.ly/2U9dbRi>.

²⁹ *Ibíd.*

partir de tungsteno o aleación de tungsteno/renio tienen una sensibilidad mejor que $20 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ y pueden medir temperaturas de hasta $2\,300\,^\circ\text{C}$.

3.2. Detectores de temperatura resistivos (RTD)

Los detectores de temperatura resistivos, también conocidos como dispositivos de temperatura por resistencia (DTR, por sus siglas en español o RTD, por sus siglas en inglés) pertenecen a los dispositivos de resistencia variable. Se fundamentan en el principio físico de la variación de la resistencia con la temperatura, es decir, el sensor responde al proceso de aumento de temperatura y genera un aumento de resistencia medible, un fenómeno conocido como termorresistividad.

Los RTD se consideran entre los sensores de temperatura más precisos disponibles. Además de esta característica ofrecen excelente estabilidad, repetibilidad y alta inmunidad al ruido eléctrico.³⁰ Los RTD se utilizan en lugar de termocuplas en muchas aplicaciones industriales por debajo de $650\,^\circ\text{C}$ debido a su mayor sensibilidad, así como precisión (Sensoray, s.f). La resistencia tiende a ser casi lineal con la temperatura en un amplio rango, sucede principalmente con las RTD de platino. Los otros metales o aleaciones de los que se fabrican las RTD presentan un comportamiento distinto, lo cual está directamente relacionado con las características termorresistivas de los sensores.

En los RTD se requiere que pase una pequeña corriente para determinar la resistencia; esto puede causar el autocalentamiento, por lo que es importante minimizar la corriente para reducir los errores de autocalentamiento. Por último,

³⁰ KUGLESTADT, Thomas. *Semiconductor temperature sensors challenge precision RTDs and thermistors in building automation*. Texas Instruments. <https://bit.ly/38WWIoP>.

se debe tener cuidado para evitar cualquier tensión en el RTD en su aplicación. No se requieren cables de extensión especiales ni compensaciones de unión fría (como en termocuplas).

En termocuplas, las características de los sensores serán dependientes de los metales o aleaciones de metales de los que son construidas. De la misma forma sucede con los RTD, pero de forma general, presentan características inherentes sobre las otras tecnologías:

- Rango de medida: en teoría, se puede usar RTD para medir temperaturas de hasta aproximadamente 1 000 °C, lo cual es poco común en la práctica porque es difícil obtener mediciones precisas si la temperatura es superior a 650 °C. La disponibilidad de rangos de medida se ve limitada en comparación con las termocuplas.
- Precisión, estabilidad y repetibilidad: la ventaja de los RTD es la salida precisa estable durante un largo periodo. Además, efectúan lecturas que se mantienen repetibles durante mucho tiempo.
- Linealidad: la relación de temperatura-resistencia en RTD es casi lineal en el rango de medición del sensor. Esto dependerá del metal o aleación del metal. Los que presentan un mejor comportamiento son los RTD de platino; es por esta razón su gran adquisición en la industria.
- Sensibilidad: los RTD reaccionan a los cambios de temperatura con cambios predecibles en la resistencia. Cambian la resistencia en ohmios por grados con un número menor de ohmios comparado con los

termistores que pertenecen a la misma familia de dispositivos de resistencia variable.³¹

- Ruido: “los RTD presentan alta inmunidad al ruido eléctrico. Los Pt 100 son la mejor opción para aplicaciones en entornos de automatización industrial, donde existen motores, generadores y otros equipos de alto voltaje”.³²
- Velocidad de respuesta: poseen un tiempo de respuesta generalmente bajo de 1 a 50 segundos. Son lentos en comparación con otras tecnologías, lo cual es considerado una desventaja.

Las características que se mencionan son las ventajas de los sensores, pero además presentan desventajas que definen la adquisición del sensor si no se adapta a los requerimientos. Uno de los más importantes es el elevado precio de los RTD en comparación con otras tecnologías; por ejemplo, un RTD comúnmente tiene de dos a tres veces el precio de una termocupla con el mismo rango de medida o estilo. Además, presentan un tiempo de respuesta bajo, falta de resistencia a la vibración (en contraposición con las termocuplas) y, por último, el tamaño de los sensores (los hace poco asequibles).

3.2.1. Tipos de detectores resistivos

Las características termorresistivas de los sensores RTD varían dependiendo del metal o aleación de metal con el cual son elaborados. Así, la relación resistencia/temperatura es más o menos lineal sobre una escala de temperatura limitada en algunos metales, sobre todo platino, cobre y níquel.

³¹ OMEGA. *Temperature probes. How to choose the right temperature sensor type?*
<https://bit.ly/2QBmGrJ>.

³² *Ibíd.*

- Platino: son el tipo más comúnmente usado en los procesos industriales. Tienen alta precisión, alta repetibilidad y un elevado cambio de resistencia por grado de cambio de temperatura. Además, la salida de elementos RTD de platino es altamente lineal en todo su rango de temperatura. “Los elementos RTD de platino también tienen buena inactividad química: por estos motivos se prefiere el uso del RTD de platino en la mayor parte de las aplicaciones”.³³
- Cobre: los elementos RTD de cobre son altamente lineales en todo su rango de temperatura, pero tienen una precisión limitada y un rango de temperatura más estrecho que los elementos de platino. Son menos costosos, más usados para la medición de temperatura en rodamientos y bobinados de motores (aplicaciones en las que la precisión no es crítica). “Estos RTD son susceptibles a la oxidación y a la corrosión, lo que limita su exactitud y longevidad”.³⁴

Además de los RTD de cobre o platino, también existen los RTD de níquel que comparten la misma característica de susceptibilidad a la oxidación y a la corrosión que los de cobre. Sin embargo, debido de un alto costo por parte de los RTD de platino, se usan algunas veces los de cobre o níquel. Otro metal, el tungsteno, igualmente se usa en RTD en algunas circunstancias, en particular para mediciones de alta temperatura. El intervalo de trabajo de cada uno de estos cuatro tipos de RTD se indica a continuación:

³³ MORRIS, Alan S. *Principios de mediciones e instrumentación*. p. 187.

³⁴ *Ibíd.*

Tabla II. **Características de los materiales usados para los RTD**

Material	Rango de medida (°C)	Variación (%/°C) a 100 °C
Platino	-270 a +1 000	0,39
Cobre	-200 a +260	0,38
Níquel	-200 a +430	0,67
Níquel-Acero	-200 a +260	0,46

Fuente: ALZATE, Edwin. et al. *Medición de temperatura: sensores termoelectrónicos*.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84934001>. Consulta: 8 de febrero de 2020.

Principalmente se habla del autocalentamiento del sensor como la forma de evitar cualquier tensión en él. Para esto se debe considerar la resistencia del cable del conductor al adoptar las conexiones de tres y cuatro cables (*three and four wire connections*) que pueden eliminar los efectos de resistencia en los cables de conexión en las mediciones.

Los elementos RTD están disponibles en varias formas. Los más comunes son:

- Alambre enrollado (*Wire-Wound* RTD): los elementos RTD de alambre enrollado son muy resistentes como confiables. Comparado con elementos RTD de película delgada (*thin-film* RTD), su precisión tiende a ser mayor con su tiempo de respuesta más rápido que los elementos de película delgada. Esta forma puede fallar en aplicaciones de alta vibración (cables encapsulados en vidrio son los adecuados para esta aplicación) pero puede resistir altas temperaturas al ser enrollado en aislantes cerámicos. El uso de esta configuración de forma individual, dual o incluso con tres sensores proporciona características adquisitivas. El uso de tres sensores y señal intermedia proporciona la reducción del

ruido y de la deriva, incluyendo la protección automática contra una sola falla de cualquier tipo.

- Película delgada (*Thin-film* RTD): son menos costosos que el alambre enrollado RTD porque se requiere menos resistencia del metal para la construcción. Sin embargo, tienden a ser menos estables con el tiempo; generalmente tienen una temperatura más limitada y pueden ser susceptible a daños por manejo brusco.³⁵

3.3. Termistores

Los termistores son sensores de temperatura que pertenecen a la familia de los dispositivos de resistencia variable. Basan su funcionamiento en la variación de la resistividad que presenta un semiconductor con la temperatura.

“Los termistores se fabrican con óxidos de níquel y manganeso (lo que los vuelve susceptibles a daño), hierro, cobalto, cobre, magnesio, titanio, incluyendo otros metales, los cuales se encuentran encapsulados en sondas o en discos”.³⁶

Los termistores son empleados para la detección de temperatura en distintos estados de la materia; además, debido a su pequeño tamaño, son posicionados en encapsulamientos o sondas especiales diseñados para su protección y posicionamiento, independiente del medio en el cual tengan que trabajar.

³⁵ MCMILLAN, Gregory K. *How to select the optimal temperature sensor for industrial applications*. <https://bit.ly/2TTG7ha>.

³⁶ CREUS SOLÉ, Antonio. *Instrumentación industrial*. p. 251.

En los últimos años, los termistores se han vuelto cada vez más populares debido a las mejoras en medidores y controladores. Los medidores actuales son lo suficientemente flexibles como para permitir a los usuarios configurar una amplia gama de termistores e intercambiar las sondas fácilmente.

Sin embargo, a diferencia de los RTD que ofrecen estándares establecidos, las curvas de los termistores varían según el fabricante.

Las características que presentan generalmente los termistores son:

- Rango de medida: los termistores trabajan en rangos de temperatura bajos, menor que la diversidad de rangos de termocuplas y RTD.
- Exactitud, precisión y estabilidad: a diferencia de las termocuplas o RTDs, el termistor no ofrece la ventaja de exactitud de salida y estabilidad, pero sí mediciones precisas.
- No linealidad: la falta de linealidad es elevada y no se puede establecer una aproximación lineal a la curva incluso sobre un pequeño intervalo de temperatura.
- Sensibilidad: los termistores ofrecen mayor sensibilidad que los RTD debido a un alto coeficiente de temperatura y a la operación a niveles de corriente inferiores en contraposición con los mencionados. La alta proporción de esta característica con respecto a las variaciones de temperatura posiciona al termistor como un sensor adecuado en mediciones precisas. Es utilizado ampliamente para aplicaciones de control en el rango de 150 °C a 450 °C.

- Resistencia a la vibración: a pesar de que los óxidos de níquel y manganeso vuelven susceptibles a daños a los termistores, estos son capaces de manejar mejor los choques mecánicos, térmicos e incluso las vibraciones más que otros sensores.
- Velocidad de respuesta: ante los cambios relativamente pequeños en la variable de medición se presentan variaciones rápidas extremadamente grandes. Aunque su tiempo de respuesta depende en gran medida de la capacidad térmica y la masa del termistor, variando de 0,5 a 10 segundos, es mayor que el tiempo de respuesta de RTD pero similar que al tiempo de las termocuplas. Esta característica es particularmente útil para sistemas de control con monitoreo de temperatura que requieren retroalimentación rápida.

Entre las ventajas que caracterizan a los termistores está su costo relativamente bajo (incluso hasta dos o tres veces menor que un RTD; pero los termistores con rango de temperatura extendido a menudo son más caros que los RTD) y su tamaño pequeño. “Sin embargo, la reducción del tamaño disminuye también su capacidad de disipar calor y, por ello provoca un mayor efecto de autocalentamiento”.³⁷ Otra de sus desventajas es el alcance de medición dentro de alcance amplios, ya que los termistores no sirven para tal función dadas sus altas variaciones de resistencia, aspecto que dificulta la medición con tan solo este instrumento.

³⁷ MORRIS, Alan S. *Principios de mediciones e instrumentación*. p. 187.

3.3.1. Tipos de termistores

Los termistores también se denominan NTC (*Negative Temperature Coefficient*), pero también existen casos especiales de coeficiente positivo cuando su resistencia aumenta con la temperatura, denominados PTC (*Positive Temperature Coefficient*).

Los termistores están fundamentados en la variación de la resistencia del semiconductor con la temperatura, variación referente al número de portadores. Al aumentar la temperatura, lo hace de la misma forma el número de portadores y se reduce la resistencia, es por esto que se presenta NTC. La dependencia de resistencia del semiconductor con la temperatura varía con la presencia de impurezas, y si el dopado es muy intenso, el semiconductor adquiere propiedades con PTC en un margen de temperatura con limitantes.³⁸

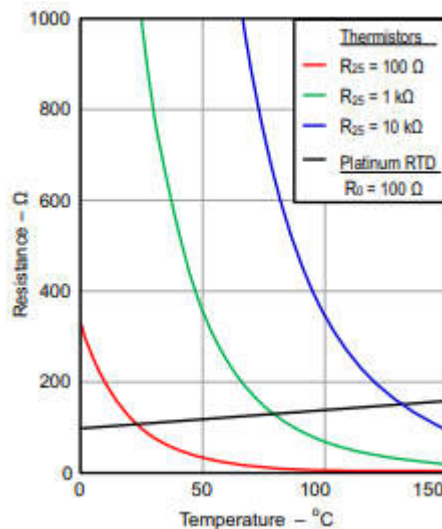
Los termistores NTC exhiben una disminución de la resistencia eléctrica al aumentar la temperatura. Dependiendo de materiales o métodos de fabricación, generalmente se utilizan en el rango de temperatura de -50°C a $+150^{\circ}\text{C}$ y, hasta 300°C para algunas unidades encapsuladas en vidrio. El valor de resistencia de un termistor es típicamente referenciado a 25°C (abreviado como R 25). Para la mayoría de las aplicaciones, los valores R 25 están entre $100\ \Omega$ y $100\ \text{k}\Omega$.

La resistencia frente a la temperatura (R/T) característica del termistor NTC es una función no lineal, negativa y exponencial. Existen varias ecuaciones de interpolación que describen con precisión la curva R/T, la más conocida es la ecuación de Steinhart-Hart.

El cambio relativamente grande en la resistencia del termistor NTC frente a la temperatura, típicamente en el orden de $-3\ \%/^{\circ}\text{C}$ a $-6\ \%/^{\circ}\text{C}$, proporciona un orden de magnitud de respuesta de señal mayor que los RTD.

³⁸ ALZATE, Edwin. et. al. *Medición de temperatura: sensores termoelectricos*. <https://bit.ly/2WhydQj>.

Figura 4. R-T curva de comparación entre termistores y RTD



Fuente: KUGLESTADT, Thomas. *Semiconductor temperature sensors challenge precision RTDs and thermistors in building automation*. <http://www.ti.com/lit/an/snaa267a/snaa267a.pdf>.

Consulta: 11 de febrero de 2020.

La curva característica R/T y el valor R₂₅ de un termistor están determinados por la formulación particular de óxidos. En los últimos 15 años, mejores materias primas como avances en la tecnología de procesamiento de cerámica han contribuido a mejoras generales en la confiabilidad, intercambiabilidad e incluso rentabilidad de termistores.³⁹

3.4. Pirómetros infrarrojos

Los pirómetros de radiación se fundamentan en la ley de Stefan-Boltzmann.

³⁹ KUGLESTADT, Thomas. *Semiconductor temperature sensors challenge precision RTDs and thermistors in building automation*. Texas Instruments. <https://bit.ly/38WWIoP>.

Todos los objetos emiten radiación electromagnética como una función de su temperatura arriba del cero absoluto y los pirómetros de radiación miden esta radiación para calcular la temperatura del objeto.

La ventaja importante que presentan los pirómetros de radiación respecto a otros de su tipo, es que estos no tienen contacto con el cuerpo caliente mientras se está midiendo la temperatura. De tal modo que no se perturba el sistema de medición, beneficia los procesos con altas temperaturas que muchas veces las termocuplas, RTDs y termistores no pueden cubrir de forma adecuada.

Enfocados en el título principal, pirómetros infrarrojos, se deduce la técnica utilizada denominada termografía o formación de imágenes térmicas que utilizan el mismo principio que los pirómetros de radiación. El pirómetro de infrarrojos percibe la radiación espectral del infrarrojo, puede medir temperaturas inferiores a 700 °C en contraposición con el pirómetro óptico, que mide temperaturas superiores a la mencionada.

Las versiones más simples de los instrumentos de formación de imágenes térmicas consisten en visores manuales que se apuntan hacia el objeto de interés. La resolución de la medición es alta, se detectan diferencias de temperatura tan pequeñas como 0,1 °C.

3.4.1. Campos de aplicación de pirómetros

Estos instrumentos se usan en una amplia variedad de aplicaciones como la supervisión de flujos de producto a través de tubería, detección de fallas del aislamiento y detección de puntos calientes en revestimientos de hornos, transformadores eléctricos, máquinas, cojinetes, entre otros.

4. SISTEMA DE CONTROL

4.1. Definición de sistema de control

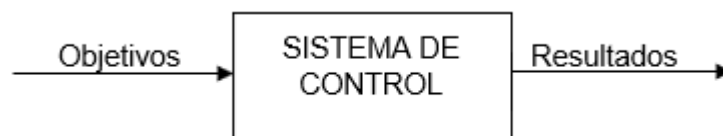
Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos con el fin de ejecutar un objetivo determinado. Un sistema de control es un conjunto de elementos que trabajan conjuntamente para controlar una variable o proceso.

Actualmente un sistema de control es necesario para controlar cualquier proceso. Por eso la implementación de un sistema de control de equipos es muy importante para garantizar seguridad y eficiencia de una planta. Derivado de un sistema de control, se controlan todas las variables que intervienen en el proceso que podrían afectar a este.

4.2. Componentes de un sistema de control

Los componentes se pueden describir o entrelazar mediante los objetivos de control que se identifican como las entradas o señales actuantes u , y los resultados o salidas correspondiente a las variables controladas y .

Figura 5. Componentes básicos de un sistema de control



Fuente: KUO, Benjamín. *Sistemas de control automático*. p. 3.

4.2.1. Proceso

Serie de acciones u operaciones que conducen a un fin, o una operación que se hace de forma progresiva y que consta de una serie de acciones, sistemáticamente dirigidas hacia un propósito determinado.⁴⁰ Para simplificar referente a sistemas de control, se llamará proceso a cualquier operación que se va a controlar.

4.2.1.1. Variable de proceso

Es una condición física o química del proceso que es de interés medir y/o controlar porque puede alterar el proceso de alguna manera.

Existen muchas variables por medir que son de interés industrial y se clasifican en físicas y químicas. Las cuatro variables principales que se consideran son: nivel, temperatura, presión, flujo; sin embargo, existen más variables como peso, humedad, conductividad, velocidad, densidad, viscosidad, entre otros.

4.2.2. Sensor

Los sensores o transductores se encargan de convertir una señal física en eléctrica que puede ser manipulada. Además, el sensor se conoce como el circuito que adquiere datos, pero no proporciona una señal estándar.

⁴⁰ OGATA, Katsuhiko. *Ingeniería de control moderna*. p. 3.

4.2.3. Transmisor

La función de un transmisor es la adquisición de datos, la amplificación de la señal, la conversión a señal estándar y la visualización.

Referente a la variable de proceso por tratar, se tiene a los transmisores de temperatura. Son compatibles con RTD, termocuplas y otros sensores. El transmisor contiene cuatro elementos principales para su funcionamiento. Además, los modelos existentes comercialmente disponen de autodiagnóstico.⁴¹

4.2.4. Controlador

Instrumento creado para detectar y corregir los errores producidos al comparar el valor de referencia con el valor medido del parámetro más importante por controlar en un proceso.⁴²

4.2.5. Accionador

También llamado actuador, es un dispositivo capaz de intervenir en el proceso que se pretende controlar. Es un dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica activando un proceso con la finalidad de generar un efecto sobre este. El accionador recibe la orden de un controlador y en función a ella genera la orden para activar un elemento final de control.⁴³

⁴¹ CREUS SOLÉ, Antonio. Instrumentación industrial. p. 60.

⁴² GRIMANEY, Jorge Cosco. *Controles eléctricos y automatización*. <https://bit.ly/2w3gLVh>.

⁴³ MASSACCESI, Diego. *Técnicas de control automático, un estudio comparativo*. <https://bit.ly/3cWcdAg>.

4.2.6. Elemento final de control

Es un mecanismo que perturba el valor de la variable manipulada en respuesta a una señal de salida desde el dispositivo de control automático; comúnmente recibe una señal del controlador manipulando un flujo de material o energía para el proceso. El elemento final de control (EFC) puede ser una válvula, un variador, un motor, un relé, un amortiguador o un calefactor de carácter eléctrico.

El EFC está constituido primordialmente de dos partes: un actuador y un mecanismo para ajustar la variable manipulada.

4.3. Clasificación de los sistemas de control según comportamiento y medición

El conjunto de elementos necesarios para que exista una comparación en el proceso (una unidad de medida, una unidad de control, un elemento final de control y el propio proceso) en donde las correcciones de la señal sean posibles, forman un bucle o lazo que recibe el nombre de lazo de control. El lazo puede ser abierto o cerrado.

4.3.1. Sistema de control de lazo abierto

Estos sistemas son aquellos cuya señal de salida no influye en la señal de entrada o no tiene efecto sobre la acción de control (es decir, no tiene una retroalimentación).

Estos sistemas se pueden utilizar en aplicaciones que no sean muy críticas, primordialmente solo se usa si se conoce la relación entre la entrada y

la salida. Las características de estos sistemas es que tienden a ser más económicos, simples, sin problemas de estabilidad, con la desventaja de poseer un grado alto de errores debido a las perturbaciones, como los derivados de los cambios en la calibración; por ende, será necesario recalibrar en tiempos más cortos.

Figura 6. **Diagrama de un sistema de control de lazo abierto**



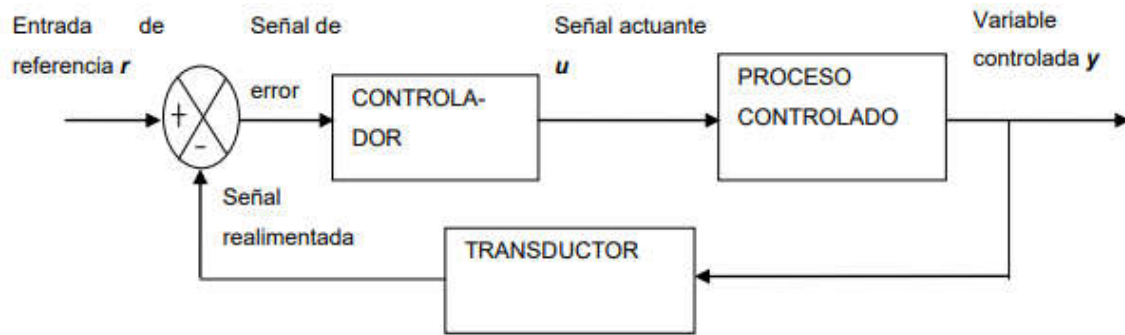
Fuente: KUO, Benjamín. *Sistemas de control automático*. p. 9.

4.3.2. Sistema de control de lazo cerrado

Estos sistemas son aquellos en los que la señal de salida influye en la señal de entrada, es decir, un sistema que se realimenta con la señal de salida, donde vuelve al principio para que analice la diferencia y que el error sea cero.

La figura 7 presenta un diagrama a bloques de un sistema de control de lazo cerrado o retroalimentado, el cual fue diseñado para mantener cierta variable de salida y (o variable controlada) de un proceso controlado P en un valor de referencia r (entrada de referencia). El valor de la variable controlada y se determina con la ayuda del instrumento de medición M (transductor o sensor), se compara con el valor de referencia r , y la diferencia e se aplica como una señal de error a la unidad de corrección C (controlador), la cual modifica la salida del proceso de modo tal que la variable de salida está determinada por $y = r$.

Figura 7. **Diagrama de un sistema de control de lazo cerrado**



Fuente: MORRIS, Alan. *Principios de mediciones e instrumentación*. p. 6.

4.3.2.1. Estabilidad

“La realimentación (sistemas de control de lazo cerrado) también tiene efectos en características de desempeño del sistema como la estabilidad, ancho de banda, ganancia global, perturbaciones y sensibilidad”.⁴⁴

Para entender los efectos de la realimentación sobre un sistema de control, es esencial examinar el fenómeno, centrándose prioritariamente en la estabilidad del sistema.

Se establece como estabilidad la capacidad del sistema de recuperar su estado normal inicial luego de que haya sido sometido a una perturbación. Un sistema es inestable si su o sus salidas están fuera de control.

Una de las ventajas de incorporar realimentación es que puede estabilizar un sistema inestable, también puede ser dañina si no se aplica adecuadamente.

⁴⁴ KUO, Benjamin C. *Sistemas de control automático*. p 11.

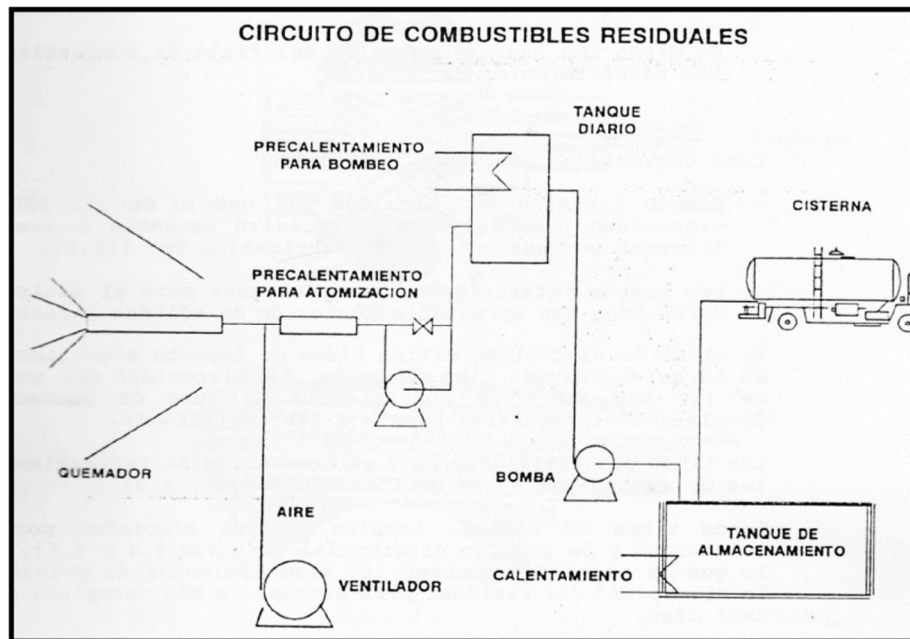
5. PROCESO DE ALMACENAMIENTO DE BÚNKER

5.1. Precalentamiento de búnker en tuberías

El proceso de análisis en este trabajo es el calentamiento de búnker en un tanque de almacenamiento (denominado tanque diario o tanque de almacenamiento de consumo diario), con la única variable de proceso de interés, que es la temperatura. Este proceso conlleva un procedimiento hasta la etapa que se analizará.

Primordialmente se debe reconocer que el fluido que se transporta por las tuberías es el búnker. Los combustibles de búnker son mezclas de hidrocarburos alifáticos principalmente viscosas y oscuras que usualmente son sólidas o semisólidas a temperatura ambiente, que requieren de un precalentamiento a varios grados antes de su uso.

Figura 8. **Circuito de transporte de búnker**



Fuente: GORDILLO, Carlos. *Sistema de calentamiento de petróleo R-500 para caldera de 800 BHP y tendido de línea de tracing de 700 m.* p. 14.

El proceso de almacenamiento de búnker da inicio cuando la cisterna llega a depositar el combustible al tanque de almacenamiento general, ver figura 8. En este tanque debe existir un sistema de calentamiento interno para que el combustible se mantenga a una temperatura adecuada sin que se solidifique o se torne viscoso; este procedimiento será denominado precalentamiento para el bombeo y utiliza comúnmente resistencias eléctricas o vapor. En el tanque de almacenamiento general se presenta un sistema que es diseñado en torno a la temperatura a la que se debe de mantener el búnker, la capacidad del tanque y el flujo que se desea transportar por las tuberías; esto determinará el tamaño o tipo de la bomba para impulsar el búnker por las tuberías.

El primer aspecto por considerar es el bombeo de materiales viscosos búnker y se debe aceptar las siguientes consideraciones para diseñar el sistema:

- Los materiales viscosos tienen una mayor pérdida de carga por fricción que el agua en la misma tubería.
- El diámetro de los tubos de aspiración y de descarga debe ser por lo menos el mismo que las conexiones de la bomba.
- Debido a la selección basada en experiencia y tecnicidad, se tendrá como principal consideración que las bombas de trasiego sean rotativas de desplazamiento positivo, que pueden ser del tipo tornillo, engranajes, paletas o lóbulos.

Al salir el búnker caliente impulsado por la bomba desde el tanque de almacenamiento, recorrerá el circuito de tuberías hasta el tanque diario o de almacenamiento de consumo diario. Las consideraciones básicas para las tuberías de trasiego son:

- El diseño total del sistema de tubería debe ser lo más recto y corto únicamente en la medida de lo posible, con un mínimo de curvas en el sistema, pero generalmente son sistemas de largas distancias.
- Los cambios imprevistos en el diámetro de la tubería pueden ocasionar turbulencia y pérdida de carga en el sistema; por ello, en la medida de lo posible, deben evitarse.

- El sistema de tuberías debe estar diseñado para permitir al personal encargado del mantenimiento de la bomba trabajar con seguridad y facilidad.
- Los materiales de diseño de la tubería deben ser resistentes a la temperatura de operación, corrosión, erosión en los medios de contacto interno o externo y resistentes al desgaste.

La tubería se dimensiona en función de la velocidad; es por ello que los cálculos se basan en el volumen de combustible que se transporta con relación a la sección de la tubería. Así, para un caudal determinado del fluido a bombear, con velocidad máxima del mismo, se determina de forma inmediata el diámetro mínimo de conducción y se escoge el diámetro normalizado basado en la norma vigente.

El principal aspecto por tratar es el precalentamiento de búnker en la tubería. Este precalentamiento es la etapa previa al calentamiento principal que se debe de dar al búnker en los tanques diarios o tanque de almacenamiento de consumo diario.

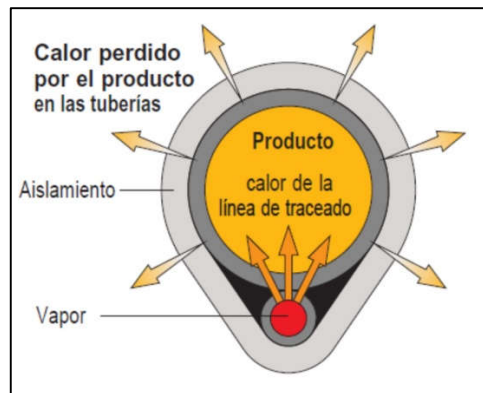
El sistema que se usa generalmente en la industria para este proceso es denominado líneas de *tracing* ("traseo" o rastreo de vapor). Se menciona que estas líneas son secundarias y pueden ser de resistencias eléctricas o vapor, utilizadas para mantener fluidos a temperaturas constantes durante su transporte en distancias muy pronunciadas.⁴⁵ Las líneas de tracing proporcionan un grado de calentamiento con regulación de temperatura en la

⁴⁵ GORDILLO ANDÍA, Carlos. *Sistema de calentamiento de petróleo R-500 para caldera de 800 BHP y tendido de línea de tracing de 700 m.* <https://bit.ly/2vsnuHZ>.

tubería y estaciones de almacenamiento para el transporte, todo esto debido a la alta viscosidad que presenta el búnker.

Las líneas primarias y secundarias son enchaquetadas para evitar la transferencia de calor hacia el exterior, ver figura 9.

Figura 9. **Líneas de tracing**



Fuente: GORDILLO, Carlos. *Sistema de calentamiento de petróleo R-500 para caldera de 800 BHP y tendido de línea de tracing de 700 m.* p. 20.

“Las líneas de acompañamiento o tracing de vapor se deben utilizar cuando es la opción más fiable y práctica para la industria o planta, pero existen divisiones o especificaciones precisas para distintos procesos en líneas de tracing”.⁴⁶

Los tipos de sistemas de tracing se dividen de acuerdo al tipo de aplicación y al método que se emplea para calentar el fluido por transportar.

⁴⁶ GORDILLO ANDÍA, Carlos. *Sistema de calentamiento de petróleo R-500 para caldera de 800 BHP y tendido de línea de tracing de 700 m.* <https://bit.ly/2vsnuHZ>.

En la primera división se tienen aplicaciones recubiertas, críticas, nocríticas, anticongelación y aplicación en instrumentos; se adapta a este proceso la aplicación no-crítica porque en esta se procura mantener la viscosidad del producto (búnker) a su nivel óptimo de bombeo. Es únicamente durante la etapa de trasiego desde el tanque de almacenamiento general hasta el tanque diario (o tanque de almacenamiento que sirve para el consumo diario de búnker hacia la caldera).

En la segunda división de acuerdo con el criterio de calentamiento del fluido se tiene *steam tracing*, *thermic fluids tracing* y *electric tracing*; el método que se adapta es *steam tracing* porque se procura utilizar las tuberías de vapor que generalmente se poseen en la industria como medio de transferencia de calor hacia el búnker que pasa por otra tubería adyacente. También se pueden situar estaciones de vapor a ciertas distancias de la tubería, las cuales servirán como intercambiadores de calor en cierto punto para que la viscosidad del búnker se mantenga fluido y llegue hasta su siguiente destino.

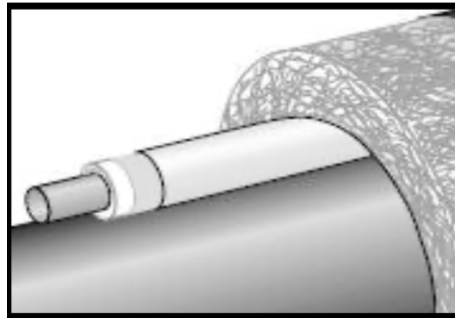
Las líneas de acompañamiento de vapor sobresalen ante las de fluidos térmicos y las líneas de acompañamiento eléctrico debido a las siguientes características o consideraciones:

- Alta eficiencia
- Alto grado de controlabilidad
- Alta flexibilidad
- Bajo factor económico

En las líneas *tracing* de vapor se deberá utilizar la aplicación recubierta (aislada), como se observa en la figura 10, porque dicha forma está determinada para aplicaciones de media y baja temperatura. Las líneas de

acompañamiento aisladas son tubos preaislados con una chaqueta protectora de polímero.

Figura 10. **Líneas de *tracing* de vapor con aplicación recubierta**



Fuente: GORDILLO, Carlos. *Sistema de calentamiento de petróleo R-500 para caldera de 800 BHP y tendido de línea de tracing de 700 m.* p. 23. <https://bit.ly/2vsnuHZ>. Consulta: 1 de marzo de 2020.

5.2. Calentamiento de búnker en tanques de almacenamiento

Al finalizar la etapa de trasiego de búnker por las tuberías, el combustible entra a los tanques diarios o de almacenamiento de uso diario. Estos no son más que recipientes cilíndricos para almacenamiento y calentamiento generalmente de uso industrial que usan un fluido caliente vapor, agua caliente, aceite térmico u otros, por medio de chaquetas convencionales, serpentines helicoidales internos o de media caña externos para el calentamiento del combustible del tanque, en este caso, el búnker. El proceso en el tanque estará constituido por serpentines helicoidales por donde circulará vapor regulado.

En el tanque diario es en donde se plantea el sistema de control de lazo cerrado, introduciendo el sensor de temperatura y su transmisor para la medición de la variable de proceso. La temperatura ideal a la que el búnker

debe terminar su calentamiento pasando a la etapa de bombeo es de 90 °C. Esto es para no optar por un diseño demasiado robusto y evitar consideraciones de selección de bombas de desplazamiento positivo grandes.

Como se mencionaba, el búnker debe pasar a su etapa de bombeo hacia el circuito de circulación de búnker en la caldera. Este paso está determinado por una válvula automática que se acciona cuando el sistema llegue a su *set point* o señal deseada. En la etapa de bombeo se ven variables como la presión y velocidad del fluido; ambas se obvian en el presente trabajo.

5.2.1. Principio de calentamiento en tanque

Se define calor como “la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas o entre un sistema y el exterior debido a una diferencia de temperatura. El calor es energía en transición, se reconoce cuando cruza la frontera de un sistema”.⁴⁷

El principio se basa en la transferencia de calor desde un medio de alta temperatura a otro de una temperatura inferior. Como se propone en el punto anterior, el calentamiento lo da el vapor circulando por serpentines helicoidales porque son los más comunes en la industria. Análogamente, se puede interpretar al tanque como un condensador o un intercambiador de calor en donde el fluido que pasa por los serpentines será el vapor y el medio exterior hacia donde se libera el calor será el búnker (porque el tanque es un medio cerrado). Por ende, el calor liberado de los serpentines hace que el búnker se caliente.

⁴⁷ ÇENGEL, Yungus; BOLES, Michael. *Termodinámica*. p. 60.

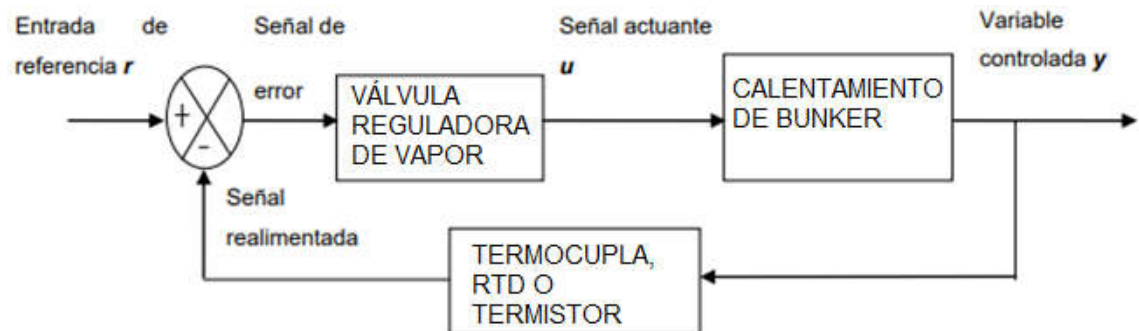
5.3. Primera etapa del circuito de circulación de búnker en caldera

Tal como se puede ver en la figura 8, la etapa siguiente al tanque de almacenamiento corresponde al bombeo hasta otro precalentamiento (denominado precalentamiento para atomización) por medio de resistencias eléctricas. Se da en etapas, generalmente de tres a seis, dependiendo de la temperatura de entrada y para elevarlo a temperaturas de hasta 105 °C. Finalmente se da la atomización del combustible por medio de la flecha en la caldera.

5.4. Lazo de control del proceso

El proceso corresponde la inclusión de los elementos principales mencionados en la etapa de control. El lazo de control del proceso se representa en la figura 11.

Figura 11. Lazo de control cerrado del proceso de calentamiento de búnker



Fuente: elaboración propia.

6. COMPARATIVA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES EN UN CONTROL DE TEMPERATURA DEL CALENTAMIENTO DE BÚNKER EN UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO

La idoneidad de cada sensor dependerá de la aplicación. Al tener una aplicación predeterminada en los aspectos técnicos se puede comparar las características de los sensores; posteriormente, emplear el sensor que cumpla con los requerimientos del sistema y que le proporcione los resultados óptimos.

La exclusión a priori del sensor pirómetro infrarrojo será adecuada debido a que el campo de aplicación del mismo no se adecua a un proceso en donde se mide la temperatura en un tanque aislado. Es así una tecnología poco viable para el fin deseado, además de que sus características son aptas para temperaturas fuera del rango seleccionado.

De forma comparativa se muestran las características de los sensores en la tabla III, con ventajas y desventajas. En los apartados siguientes se desarrolla a profundidad la comparación de estas características.

Tabla III. **Comparación de características de los sensores de temperatura: termocuplas, RTD y termistores**

	Termocupla	RTD	Termistor
Linealidad	No lineal. Requiere al menos un polinomio de cuarto grado (para ajuste de curva).	Lineal. Requiere al menos un polinomio de segundo grado (para ajuste de curva).	Requiere al menos un polinomio de tercer grado (para ajuste de curva).
Excitación	No requerida	Fuente de corriente	Fuente de voltaje
Tipo de salida	Voltaje	Resistencia	Resistencia
Ventajas	Amplio rango de temperatura Sin autocalentamiento Robustez	Exactitud Estabilidad Linealidad	Sensibilidad Exactitud Costo Robustez Sello hermético
Desventajas	Compensación de unión fría Exactitud Estabilidad Cables de extensión	Tiempo de respuesta Resistencia a la vibración Tamaño	Linealidad Estabilidad Auto calentamiento Rangos estrechos

Fuente: OMEGA. *Temperature problems. How to choose the right temperature sensor type?*
<https://www.omega.co.uk/temperature/z/thermocouple-rtd.html#>. Consulta: 2 de marzo de 2020.

6.1. Comparativa de características estáticas

Rango de temperatura: las termocuplas son mejores para aplicaciones a alta temperatura, mientras que más de un 90 % de RTD son diseñados para trabajar en aplicaciones con temperaturas menores a 400 °C.

A diferencia de los RTD o termocuplas, los termistores solo pueden controlar rangos de temperatura más pequeños. “Mientras que algunos RTD

pueden alcanzan 600 °C poco usual, las termocuplas pueden alcanzar temperaturas mayores a 1 800 °C y los termistores pueden medir hasta 130 °C”.⁴⁸

Linealidad: la relación de la resistencia a la temperatura en RTD es casi lineal en el rango del sensor, mientras que una termocupla presenta linealidad únicamente en los tipos E, K y J (en una porción del rango de medida). Los demás tipos presentan un comportamiento tipo “S” de forma gráfica. Los termistores NTC presentan un comportamiento variante de tipo exponencial decreciente.

Exactitud: los RTD son generalmente más exactos que las termocuplas. Sin embargo, algunos tipos de termocuplas pueden coincidir con la exactitud de los RTD. Los factores que pueden afectar la exactitud del sensor incluyen linealidad, repetibilidad y estabilidad.

Los RTD tienen exactitud similar a los termistores, pero la variación en la resistencia característica de linealidad es un factor de afección para tal característica. Aplicando esta variación, en los RTD es necesario el uso de cables largos en distancias largas. En cierta medida, esto puede alterar las lecturas fuera de los niveles de error aceptables, mientras que los termistores, mientras más grandes sean, mayor será el valor de resistencia del sensor. Al tratarse de distancias largas, cuando no haya opción de agregar un transmisor, el termistor será la mejor solución.

⁴⁸ OMEGA. *Temperature probes. How to choose the right temperature sensor type?* <https://bit.ly/2QBmGrJ>.

6.2. Comparación de características dinámicas

Estabilidad: las lecturas de los sensores RTD se mantienen estables y repetibles durante mucho tiempo. Las lecturas de termocuplas tienden a variar debido a los cambios químicos en el sensor (como la oxidación).

La linealidad como la falta de deriva de los RTD los hacen más estables a largo plazo. Mientras, los termistores se encuentran ausentes de estabilidad eléctrica y química.⁴⁹

Velocidad de respuesta: termocuplas y RTD responden rápidamente a los cambios de temperatura; sin embargo, las termocuplas son más rápidas. Una termocupla aterrizada (*grounded*) responderá tres veces más rápido que un RTD (PT 100).

La termocupla de punta expuesta es muy rápida en respuesta, sin embargo, las mejoras en fabricación de los RTD posicionan a las sondas PT 100 de película delgada en tiempos de respuesta rápidos.

Los tiempos de respuestas de los termistores también son superiores a los RTD porque detectan cambios en la temperatura mucho más rápido. El área de detección de un termistor puede ser pequeño y da una respuesta muy rápida.

Costo: no es una característica estática ni dinámica sino de interés dentro de este apartado. Las termocuplas son generalmente más baratas que los RTD. A menudo, un RTD costará dos o tres veces más que un termopar con la misma

⁴⁹ MCMILLAN, Gregory K. *How to select the optimal temperature sensor for industrial applications*. <https://bit.ly/2TTG7ha>.

temperatura y estilo; sin embargo, los costos pueden disminuir en la instalación de un RTD.

Las termocuplas parecen ser menos costosas hasta que se comienza a incluir el costo del cable de extensión, así como el costo adicional de variabilidad del proceso, dada la menor sensibilidad y repetibilidad.

Además del costo del cableado, las consecuencias de la deriva en términos de compensaciones de proceso y la necesidad por frecuentes calibraciones hacen los costos del ciclo de vida de las termocuplas mayores que los RTD.

Los termistores son bastante económicos en comparación con las termocuplas y los RTD. Si la temperatura de la aplicación coincide con el rango disponible, los termistores serán la opción viable. Sin embargo, los termistores con rango de temperatura extendido o con características no inherentes son a menudo más caros que los RTD.

A pesar de su bajo costo, los termistores pueden adecuarse al rango de temperatura deseado dentro del proceso de calentamiento de búnker. Estos sensores han descrito un comportamiento limitado en los procesos industriales debido a su extrema sensibilidad y respuesta rápida (milisegundos) (características dinámicas), primordialmente por su falta de estabilidad (química-eléctrica). Los termistores también son altamente no lineales, pero es una característica que se obvia en cierto modo porque puede ser abordado por instrumentación adicional.

Considerando la exclusión del termistor, se plantean dos preguntas nuevas fundamentales:

¿Por qué usar un RTD en vez de una termocupla (TC)?

- Los RTD tienen mejor exactitud y repetibilidad
- Las señales de los RTD son menos susceptibles al ruido
- Tienen mejor linealidad dentro de sus rangos de temperatura
- La compensación de la unión fría y los errores relacionados no están asociados con los RTD.
- La deriva de un RTD es predecible, mientras que en la termocupla es errática e impredecible.
- Los cambios que afectan la salida de un RTD o termocupla ocurren con el tiempo debido a choque mecánico, envenenamiento y ciclos de temperatura. Estos cambios pueden eliminarse mediante una calibración RTD en línea, una opción no disponible para una termocupla.
- No necesitan un cable de extensión especial (*special extension wire*).

¿Por qué usar una termocupla (TC) en vez de un RTD?

- Las termocuplas funcionan mejor a altas temperaturas que los RTD.
- Son menos costosas que los RTD en el rango de temperatura común (el costo total de instalación difiere en gran medida)
- Tienen un tiempo de respuesta más rápido que los RTD, pero esto es solo una consideración para los elementos desnudos en procesos de temperaturas muy rápidos.

6.3. Modelo matemático de primer orden: respuesta de los sensores

“Las características dinámicas del instrumento de medición describen su comportamiento entre el tiempo que una cantidad medida cambia de valor y el tiempo en el que la salida del instrumento alcanza un valor estable en la respuesta”.⁵⁰ Las variaciones en los parámetros dinámicos referentes a la respuesta de los sensores de temperatura serán concernientes a su expresión matemática de ecuación de primer orden.

En cualquier sistema de medición lineal e invariante en el tiempo puede escribirse la siguiente relación general entre la entrada y la salida para el tiempo $(t) > 0$:

$$a_n \frac{d^n q_0}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} q_0}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dq_0}{dt} + a_0 q_0 = b_m \frac{d^m q_i}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} q_i}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dq_i}{dt} + b_0 q_i \text{ (ec. 1.1)}$$

Donde q_i es la cantidad medida, q_0 es la lectura de salida y $a_0 \dots a_n$, $b_0 \dots b_m$ son constantes.

Si limitamos la consideración exclusivamente a cambios en escalón en la cantidad que se mide, la ecuación (1.1) se reduce a:

$$a_n \frac{d^n q_0}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} q_0}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dq_0}{dt} + a_0 q_0 = b_0 q_i \text{ (ec. 1.2)}$$

Si en la ecuación (1.2) se considera que todos los coeficientes $a_2 \dots a_n$ son iguales a cero, excepto a_0 y a_1 , entonces:

⁵⁰ MORRIS, Alan S. *Principios de mediciones e instrumentación*. p. 24.

$$a_1 \frac{dq_0}{dt} + a_0 q_0 = b_0 q_i \text{ (ec. 1.3)}$$

Cualquier instrumento que se comporte de acuerdo con la ecuación (1.3) se conoce como instrumento de primer orden. Tal es el caso de los sensores o termómetros de temperatura.

Al sustituir d/dt por el operador D ($D = d/dt$) en la ecuación (1.3) obtenemos:

$$a_1 Dq_0 + a_0 q_0 = b_0 q_i \text{ (ec. 1.4)}$$

y reordenando:

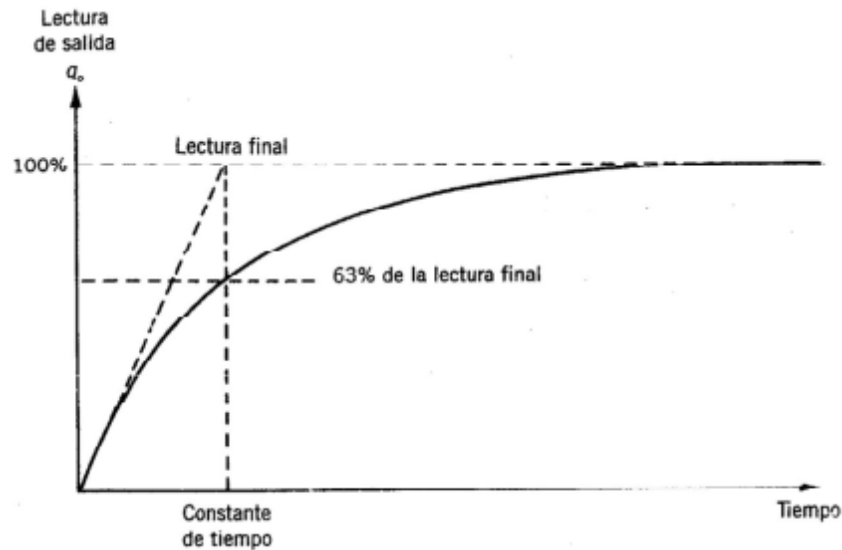
$$q_0 = \frac{(b_0/a_0)q_i}{[1+(a_1/a_0)D]} \text{ (ec. 1.5)}$$

Al definir $K = b_0/a_0$ como la sensibilidad estática y $\tau = a_1/a_0$ como la constante de tiempo del sistema, la ecuación (1.5) se convierte en:

$$q_0 = \frac{Kq_i}{1+\tau D} \text{ (ec. 1.6)}$$

Si la ecuación (1.6) se resuelve en forma analítica, la cantidad de salida q_0 en respuesta a un cambio en escalón de q_i , varía con respecto al tiempo con se indica en la figura 12.

Figura 12. **Características de la respuesta tipo escalón del instrumento de primer orden (sensor de temperatura)**



Fuente: MORRIS, Alan. *Principios de mediciones e instrumentación*. p. 24.

La constante de tiempo de la respuesta en escalón es el tiempo que necesita cantidad de salida q_o para llegar al 63 % de su valor final. Las constantes de tiempo se adecuan a cada tipo de sensor de acuerdo con su diámetro en pulgadas (in), consideraciones adicionales tales como el uso de cobertura (vaina) para una termocupla, así como estar aterrizado o únicamente aislado y consideraciones como ser elementos simples o duales para los RTD ver tabla IV.

Tabla IV. **Dinámica de elementos de detección desnudos**

Bare sensing element type	Time constant (seconds)
Thermocouple 1/8-inch sheated and grounded	0,3
Thermocouple 1/4-inch sheated and grounded	1,7
Thermocouple 1/4-inch sheated and insulated	4,5
Single element RTD 1/8 inch	1,2
Single element RTD 1/4 inch	5,5
Dual element RTD 1/4 inch	8,0

Fuente: MCMILLAN, Gregory. *Advanced temperature measurement and control*. p. 5.

Los sensores poseen los coeficientes de temperatura para expresar la velocidad de respuesta en medición de temperatura. Se debe considerar que, además, poseen cierta protección como termopozos o tubos de protección, en los cuales se presentan otras constantes de tiempo, dado que la transferencia de calor se verá afectada por los mismos. Como el proceso está estipulado como la medición de temperatura de búnker, de forma inherente se adecua el medio de detección como un líquido que es categorizado como “petróleo”; por lo tanto, la constante de tiempo del termopozo/tubo de protección estará dada con los valores de 7 y 2 segundos.⁵¹

6.4. Simulación de medición y acción de los sensores de temperatura

El proceso de medición y acción de los sensores está representado por la simulación en los siguientes circuitos eléctricos.

⁵¹ MCMILLAN, Gregory K. *Advanced temperature measurement and control*. p. 5.

6.4.1. Circuito de termocupla

El circuito, ver figura 13 posee tres etapas: puente de Wheatstone, el cual simula la diferencia de potencial de una termocupla (TC); un amplificador de instrumentación y la etapa de control, la cual es un comparador que expresa una salida lineal debido a su etapa previa amplificador de instrumentación. Se debe recordar que la salida propia de una termocupla no corresponde a un comportamiento lineal, porque el que presenta de forma inherente es no lineal y requiere un polinomio de grado cuatro para su ajuste de curva.

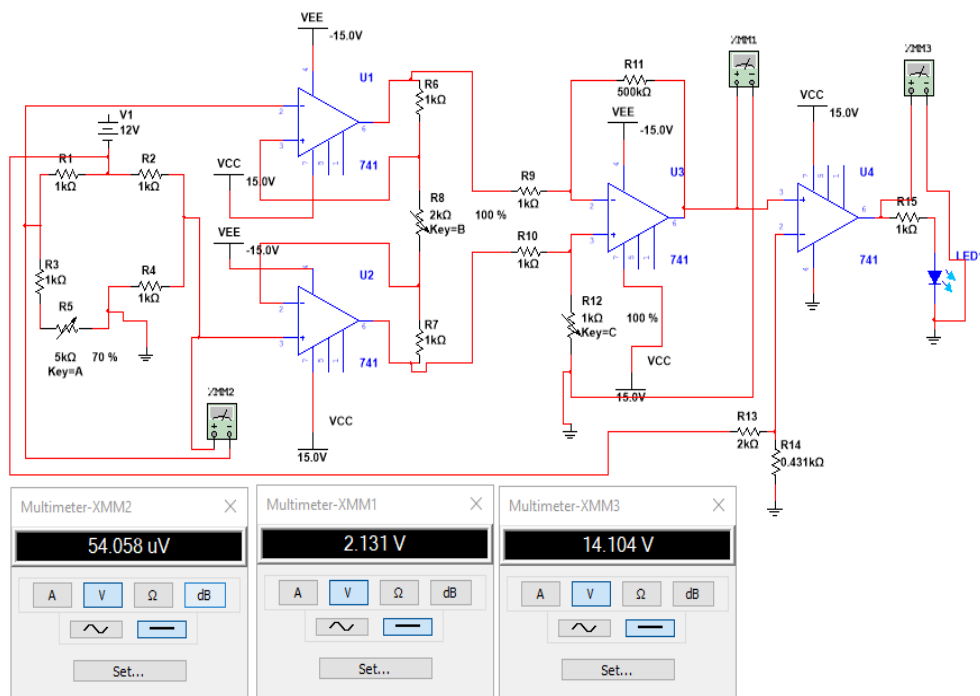
Dentro del circuito, las entradas que van al amplificador de instrumentación corresponden a la entrada inversora del primer amplificador operacional y a la no inversora del segundo amplificador operacional. Estas corresponden a la diferencia de potencial expresada por el puente de Wheatstone (expresión de la salida de un TC). El amplificador de instrumentación está alimentado con una fuente bipolar de $\pm 15\text{ V}$.

En el amplificador de instrumentación existen resistencias de $1\text{ k}\Omega$ que se pueden cambiar, dado que la salida del circuito dependerá primordialmente de R_8 . Esta es una resistencia variable, así como de las demás de conexión y R_{gain} del tercer amplificador operacional porque proporciona una gran ganancia a la señal de entrada de voltaje. Esta tiende a ser muy baja, por lo cual es necesario amplificarla en gran medida. La R_{offset} es para que la señal no presente un corrimiento vertical empezando siempre desde cero.

La etapa final corresponde a un divisor de voltaje; se alimenta con 12 V la resistencia de $2\text{ k}\Omega$ y hay un voltaje que entra a la terminal inversora que se compara con la salida del amplificador de instrumentación; si es mayor, se muestra el voltaje de salida, y si es menor, no efectuará alguna acción. El

accionamiento final corresponderá a la válvula con un convertidor I/P (señal de entrada eléctrica a señal de salida neumática).

Figura 13. **Simulación de medición por termocupla**



Fuente: elaboración propia, empleando NI Multisim.

6.4.2. **Circuito de RTD**

En el circuito de la figura 14 se utilizó un amplificador operacional LM358 N. No es de suma importancia dado que se pudo emplear cualquier otro AO. Para la fuente de alimentación se pudo utilizar + 15 V y 0 V, porque no se está trabajando con voltajes menores a 0 V, sino con voltajes positivos.

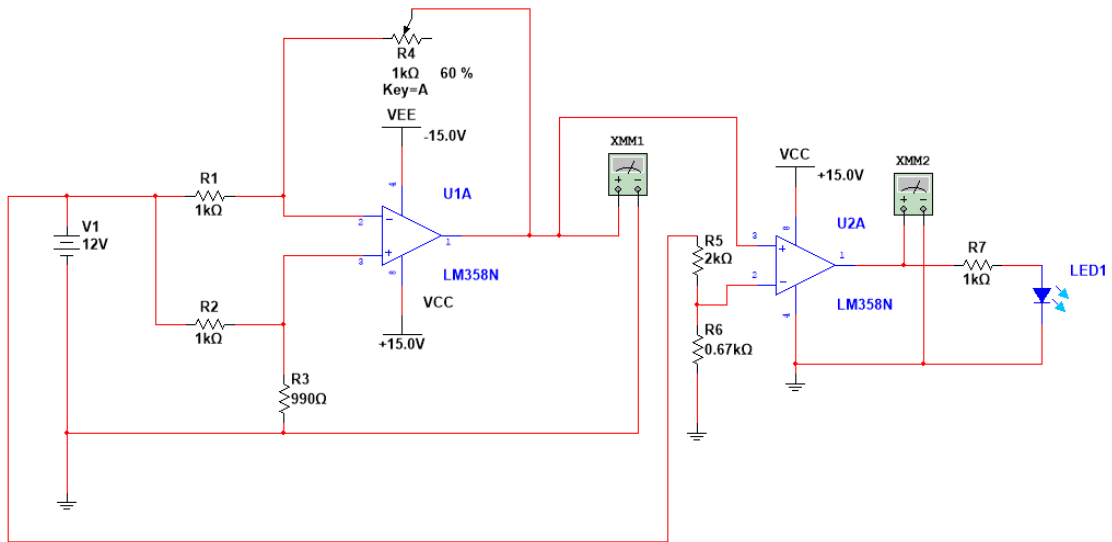
La resistencia variable que se presenta es la interpretación de un RTD o en sí, cualquier sensor resistivo. Por lo general, para que no se dependa únicamente de la resistencia del RTD, se acostumbra poner una resistencia de un valor fijo, que es por lo general el valor de la resistencia que se tiene en la entrada ($1\text{ k}\Omega$). Se coloca en serie con la resistencia del sensor (la cual varía en función de la temperatura). En este caso se puso dependiente únicamente del valor del sensor, y se colocó en la retroalimentación. Pudo ser ubicado en el apartado en donde se encuentran los $990\ \Omega$, donde estaría el sensor. En la retroalimentación se posicionaría la resistencia fija, que es la otra configuración posible.

La entrada está representada por una fuente de 12 V (o cualquier otro valor) que alimenta a dos resistencias: una que va a la configuración no inversora, otra a la inversora y retroalimentación, para obtener una salida amplificada del primer amplificador operacional.

En el circuito simulado, cuando se disminuye la resistencia (sensor) aumenta el voltaje en la medición que hace el multímetro XMM 1 y, en contraparte, cuando se aumenta la resistencia disminuye el voltaje de la salida.

En la última etapa se utiliza un comparador; cuando pasan 3 V en la entrada no inversora habrá una salida, que es prácticamente la de la alimentación. Por ejemplo: cuando el valor del sensor se encuentra en un 50% está en $3,2\text{ mV}$, no hay un indicador o accionamiento de la etapa final, pero cuando disminuye el valor de resistencia, en la segunda etapa se presentan 14 V aproximadamente, por lo tanto, la etapa final se acciona. Se recuerda que la etapa final es equivalente a la válvula de paso de búnker que posee un convertidor I/P. Como una alternativa, la etapa final del comparador se podría eliminar y utilizar un control proporcional.

Figura 14. Simulación de medición por RTD



Fuente: elaboración propia, empleando NI Multisim.

CONCLUSIONES

1. Se clasificó a los sensores con base en la variable de proceso “temperatura”, delimitada únicamente a los tipos de termocuplas, termistores y detectores de temperatura resistivos (RTD). Se determinó que el tipo de sensor adecuado para el proceso de calentamiento de búnker en un tanque de almacenamiento es el RTD.
2. El modelo matemático de primer orden determina la respuesta de los sensores de temperatura en el tiempo. Al adecuar distintas constantes de tiempo a cada uno se obtiene como la constante de tiempo más baja la de un termistor NTC, pero con el inconveniente de ser el menos estable de acuerdo a su extremada sensibilidad y respuesta rápida. El RTD de elemento simple en comparación a la termocupla, ambos dentro de un proceso de combustible, presenta una constante de tiempo mayor sin ser significativa porque presenta mejor estabilidad en su respuesta.
3. En la comparación de las características se encuentra el RTD como el sensor adecuado para el proceso de control, debido a que tiene mejor exactitud, repetibilidad y linealidad dentro de su rango de temperatura. Además, es menos susceptible al ruido y tiene un tiempo de respuesta adecuado con mejor estabilidad respecto a las otras tecnologías.
4. El proceso se optimiza en el control de temperatura dentro del tanque diario de almacenamiento por medio de la regulación adecuada del intercambio de calor del vapor en el serpentín hacia el búnker. Se evita el sobreuso de las etapas de calentamiento por medio de resistencias

dentro del circuito de búnker en la caldera y se reducen costos dentro del proceso al hacer uso de un RTD para el control. A largo plazo tiende a ser el sensor con mejor relación costo/beneficio, tanto por el mismo equipo como en su etapa de instalación y mantenimiento a largo plazo.

5. El sistema planteado fue simulado tanto con RTD y termocuplas. Se adoptó la necesidad de implementar un amplificador de instrumentación en el circuito de termocupla para linealizar su respuesta. Se demostró que el sensor no posee esta característica, en contraposición con la respuesta de un RTD.

RECOMENDACIONES

1. Contratar o capacitar al personal encargado de instrumentación para que la selección de sensores esté ligada en los aspectos de experiencia por parte del instrumentista, conocimiento de los sistemas por tratar y de las características técnicas que optimicen el proceso.
2. Eliminar mediante una calibración, ajuste–recalibración, los cambios que afectan la salida de un RTD con el tiempo, debido a choques mecánicos, envenenamiento y ciclos de temperatura.
3. Calibrar en sitio o taller si se desconfía en cierta medida de la incertidumbre del sensor RTD debido al fluido que maneja búnker. Estas calibraciones son seleccionadas por el costo que manejan y la disponibilidad de realizarlas.
4. Utilizar un buen diseño de termopozo o tubo de protección para mejorar la resistencia del RTD y obtener una robustez del sensor tan buena como la de una termocupla.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALAS RAMOS, Lucas Gilberto. *Elaboración de una guía para la selección de sensores y accionadores en el control de procesos industriales. Aplicación práctica.* [en línea]. <<https://bit.ly/2U9dbRi>>. [Consulta: 25 de enero de 2020].
2. ALZATE, Edwin. et. al. *Medición de temperatura: sensores termoelectricos.* [en línea]. <<https://bit.ly/2WhydQj>>. [Consulta: 17 de febrero de 2020].
3. CABEZA, Carlos. *Instrumentación industrial.* [en línea]. <<https://bit.ly/2wco396>>. [Consulta: 17 de febrero de 2020].
4. CREUS SOLÉ, Antonio. *Instrumentos industriales, su ajuste y calibración.* 3a ed. México: Alfaomega, 2009. 254 p.
5. CREUS SOLÉ, Antonio. *Instrumentación industrial.* 8a ed. México: Alfaomega, 2010. 794 p.
6. FLORES, Randal. *7 pasos para elegir adecuadamente el tipo de sensor para mi aplicación.* [en línea]. <<https://bit.ly/2weXyjf>>. [Consulta: 28 de enero de 2020].
7. GORDILLO ANDÍA, Carlos. *Sistema de calentamiento de petróleo R-500 para caldera de 800 BHP y tendido de línea de tracing de*

700 m. [en línea]. <<https://bit.ly/2vsnuHZ>>. [Consulta: 1 de marzo de 2020].

8. GRIMANEY, Jorge Cosco. *Controles eléctricos y automatización*. [en línea]. <<https://bit.ly/2w3gLVh>>. [Consulta: 2 de marzo de 2020].
9. GUTIÉRREZ, Marllelis.; ITURRALDE, Sadi. *Fundamentos básicos de instrumentación y control*. [en línea]. <<https://bit.ly/3a81mS0>>. [Consulta: 18 de enero de 2020].
10. HASHEMIAN, H. *RTDs vs. Thermocouples: Measuring industrial temperatures*. [en línea]. <<https://bit.ly/2x4EQuF>>. [Consulta: 28 de enero de 2020].
11. HEAT, Janet. *RTD vs. Thermocouple vs. Thermistor in temperature sensors*. [en línea]. <<https://bit.ly/3bclTUT>>. [Consulta: 28 de febrero de 2020].
12. KUGLESTADT, Thomas. *Semiconductor temperature sensors challenge precision RTDs and thermistors in building automation*. Texas Instruments. [en línea]. <<https://bit.ly/38WWIoP>>. [Consulta: 27 de enero de 2020].
13. KUO, Benjamin C. *Sistemas de control automático*. 7a ed. México: Prentice Hall, 1996. 898 p.
14. MASSACCESI, Diego. *Técnicas de control automático, un estudio comparativo*. [en línea]. <<https://bit.ly/3cWcdAg>>. [Consulta: 24 de febrero de 2020].

15. MCMILLAN, Gregory K. *Advanced temperature measurement and control*. 2a ed. Estados Unidos: ISA, 2011. 335 p.
16. _____. *How to select the optimal temperature sensor for industrial applications*. [en línea]. <<https://bit.ly/2TTG7ha>>. [Consulta: 8 de febrero de 2020].
17. MORRIS, Alan S. *Principios de mediciones e instrumentación*. 1a ed. México: Pearson, 2002. 220 p.
18. NÁJERA VILLATE, Diego Alejandro. *Análisis de fallas en bombas para distribución de búnker y sus consecuencias en la producción de vapor, para la esterilización de equipo médico cirujano del hospital de gineco-obstetricia del Instituto Guatemalteco de Seguridad Social*. [en línea]. <<https://bit.ly/2WjBxB5>>. [Consulta: 15 de marzo de 2020].
19. OGATA, Katsuhiko. *Ingeniería de control moderna*. 4a ed. España: Pearson, 2010. 904 p.
20. OMEGA. *Temperature probes. How to choose the right temperature sensor type?* [en línea]. <<https://bit.ly/2QBmGrJ>>. [Consulta: 13 de febrero de 2020].
21. PÉREZ ARCHILA, Luis Manuel. *Diseño de simulaciones, utilizando Labview, para el curso de sistemas de control 1 de la Escuela de Mecánica Eléctrica*. [en línea]. <<https://bit.ly/2wfGSrQ>>. [Consulta: 20 de enero de 2020].

22. PÉREZ GARCIA, Miguel Ángel. *Instrumentación electrónica*. [en línea]. <<https://bit.ly/3b0113Z>>. [Consulta: 20 de diciembre de 2019].
23. ROSEMOUNT. *Instrumentación de Rosemount para la industria petroquímica*. [en línea]. <<https://www.emerson.com/documents/automation/brochure-instrumentaci%F3n-de-rosemount-para-la-industria-petroqu%EDmica-es-76352.pdf>>. [Consulta: 4 de febrero de 2020].
24. SENSORAY. *Comparison of thermocouples, RTDs, and thermistors*. [en línea]. <<https://bit.ly/3aZtqHu>>. [Consulta: 20 de febrero de 2020].
25. STREHLKE, Natalie. *How to select the best sensor for an industrial high-temperature measurement system*. [en línea]. <<https://bit.ly/39VFhX5>>. [Consulta: 29 de diciembre de 2019].
26. YOKOGAWA. *Temperature transmitters*. [en línea]. <<https://bit.ly/2UfgqXx>>. [Consulta: 22 de febrero de 2020].
27. ÇENGEL, Yungus. y BOLES, Michael. *Termodinámica*. 7a ed. México: McGraw-Hill, 2012. 997 p.