

Elementos de medición y tecnología utilizada en el área de las calderas de la planta termoenergética en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara

David Ernesto Cuenca de la Vara

david.cuenca@estudiantes.uo.edu.cu

Especialidad: Ingeniería automática

Universidad de Oriente (Cuba).

Resumen: Se determinaron los sistemas de medición con las variables flujo, presión, nivel y temperatura de los instrumentos usados para medir parámetros en la planta termoenergética de la fábrica Comandante Ernesto Che Guevara. Se describieron los diferentes sistemas de medición existentes en dicha planta. Como resultado se caracterizan los sistemas de mediciones eléctricas y sus principios de funcionamiento en el área de las calderas en la planta termoenergética.

Palabras clave: instrumentos de medición; planta termoenergética; sistema de medición; caldera de vapor.

Technology and measurement elements used in boilers of the thermoenergetic plant at Ernesto Che Guevara factory

Abstract: The measurement systems were determined with variables flow, pressure, level and temperature of instruments used for measuring variables at the thermoenergetic plant of the Ernesto Che Guevara factory. The existing different measurement systems in the thermoenergetic plant of this factory were described. As a result, the electrical measurement systems and their operating principles are characterized in the area of boilers in the thermoenergetic plant.

Keywords: measurement instruments; thermoenergetic plant; measuring system; steam-boiler.

Introducción

Los sistemas de medición desempeñan una parte trascendental en el progreso de la humanidad. Con el auge de la domótica estos sistemas se han introducido en todas las esferas de la vida humana.

La medición es el medio del cual el hombre dispone para complementar su sistema sensorial y su cerebro. Es la base para establecer el cómputo de sus actividades y economía, guiando todo trabajo científico y dirigiendo el empleo de las máquinas economizadoras de esfuerzos en la industria y en el hogar. Los fenómenos eléctricos proporcionan el medio más importante y adaptable para efectuar no solo las medidas eléctricas, sino también casi todas las medidas no eléctricas.

Un sistema de medición es el conjunto de operaciones, procedimientos, instrumentos y software empleados para cuantificar una determinada magnitud física. En estos sistemas se utilizan los sistemas de adquisición de datos (SAD), cuyo objetivo básico es la integración de los diferentes recursos que lo componen, además del uso de microcontroladores como CPU (Unidad Central de Procesamiento) del SAD diseñado, aprovechando de estos todas sus prestaciones: interrupciones, temporizadores, comunicación serie, así como puertos externos. Con todo ello crea un sistema que se encarga de distintas aplicaciones, como chequear variables (PH, humedad relativa, temperatura, iluminación, concentración, etc.), para su posterior utilización, ya sea con fines docentes, científicos, de almacenamiento o control (Laffita-Gómez, 2016).

Resulta cada vez más necesario emplear las magnitudes físicas, tales como: masa, longitud, tiempo, entre otras, para describir e investigar los fenómenos y procesos tecnológicos, así como para enumerar las propiedades y características de los objetos. Pero para describir cada uno de los procesos y objetos no basta con conocer las características cualitativas de estas magnitudes físicas, sino que es necesario también dominar sus características cuantitativas, las que solamente se pueden obtener por medio de las mediciones (Lorenzo-Mustelier, 1987).

El desarrollo del comercio, la industria y la ciencia fueron obligando a un desarrollo paulatino de las mediciones que tan importante papel desempeñan hoy día en las relaciones entre los hombres, ya que forman parte de nuestra vida cotidiana, de la producción, la distribución, la investigación y otras (Sardiñas, 1995 citado por EcuRed).

La empresa Comandante Ernesto Che Guevara garantiza la producción de níquel+cobalto con una calidad reconocida a escala internacional. Esta empresa juega un papel fundamental dentro de la economía nacional, es por ello que el incremento de la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que la componen incide considerablemente en la reducción del consumo de portadores energéticos.

Este trabajo tiene como objetivo caracterizar los sistemas de mediciones eléctricas y sus principios de funcionamiento en el área de las calderas en la planta termoenergética de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Procesos tecnológicos de la fábrica Comandante Ernesto Che Guevara

El esquema tecnológico está basado en la lixiviación carbonato-amoniaco del mineral reducido o proceso Carón. La decisión de utilizar el proceso de lixiviación carbonato-amoniaco se explica por las ventajas propias de esta tecnología; a pesar de que consume mucha energía eléctrica tiene muchas ventajas en comparación con el proceso pirometalúrgico.

Al mismo tiempo este proceso se realiza con un consumo relativamente pequeño de reactivos. El único reactivo que se emplea en cantidades grandes es el amoníaco.

Es un proceso continuo que se realiza en las condiciones de presión atmosférica. El equipamiento tecnológico del proceso se distingue por su sencillez y amplio uso de los aparatos conocidos (hornos de soleras múltiples, espesadores, columnas de destilación, etc.). Estas características favorecen la creación de una producción con alto nivel de mecanización y automatización. El esquema amoniaco admite la elaboración de la mezcla de los minerales lateríticos y serpentínicos, mientras que el esquema por ejemplo de lixiviación con el ácido sulfúrico permite solamente la elaboración de la fracción laterítica.

Dentro de sus procesos productivos se cuenta con la Central Termoeléctrica (CTE), que juega un importante papel dentro de la entidad porque genera una porción de la energía eléctrica que se consume en el proceso productivo. Además, produce el vapor necesario para la destilación del licor, la cola y la recuperación de amoníaco en la planta de Recuperación de Amoníaco y para usos generales en el resto de las plantas como son: calentamiento de combustible, atomización, banco de quemadores; aparte de otros servicios como la cocción y el posterior calentamiento de los alimentos en el

área de cocina comedor, teniendo así múltiples funciones de gran importancia para la producción de níquel.

La Central Termoenergética de la fábrica Comandante Ernesto Che Guevara

La planta termoenergética produce y distribuye los portadores energéticos necesarios para el proceso tecnológico, tiene como equipos fundamentales:

- dos generadores de vapor de 150 t/h (en funcionamiento)
- cinco calderas de 75 t/h (de reserva), todas de 39 atm y 440 °C
- un turbogenerador de 25 MW
- dos turbogeneradores de 12 MW de potencia.

Está formada por siete áreas:

- Base de Petróleo
- Tratamiento Químico de Agua
- Calderas
- Turbinas y Generadores
- Torres de Enfriamiento
- Compresores
- Eléctrica.

Principios de funcionamiento de las calderas

Deben garantizar el flujo de vapor estable al proceso productivo, con los parámetros adecuados de presión y temperatura, así como el flujo de gases producto de la combustión para la carbonatación en la planta de Recuperación de Amoniaco.

El agua de alimentación a las calderas procedente de los deaeradores es bombeada mediante las bombas y, luego de pasar por los calentadores de alta presión, va al colector principal de alimentación. Posteriormente se incorpora a las calderas, entra en los economizadores de dos etapas, continúa su recorrido hasta el domo y alimenta los colectores inferiores, para dar lugar a la circulación natural por las pantallas ubicadas en el horno.

En el domo ocurre la separación agua-vapor, este vapor es sobrecalentado, mejorando su calidad para después incorporarse al proceso, una vez que realice trabajo en las

turbinas. Para la combustión se utiliza el petróleo regular o el crudo mejorado. Los gases producto de la combustión son enviados, mediante dos ventiladores y líneas de 530 mm, hacia las torres lavadoras, para una vez limpios ser transportados hacia la planta de Recuperación de Amoniaco, donde tomarán parte en el proceso de carbonatación.

A las calderas llega agua procedente de la planta de Tratamiento Químico de Agua, donde se le realiza un proceso de desmineralización. Esta agua es previamente calentada al pasar por los calentadores de baja presión, los deareadores y los calentadores de alta presión hasta alcanzar una temperatura de 145 °C.

El petróleo es suministrado a través de bombas desde la base de petróleo para alimentar los quemadores de las calderas. El vapor sobrecalentado que sale de las calderas se distribuye a las turbinas, donde llega con presión de 35 atm y 435 °C, y a las estaciones reductoras de 40/10 atm y de 40/2 atm.

El vapor de 10 atm que sale de la RED 40/10 atm con temperatura 250 °C se une al vapor de la toma regulada de la turbina. El vapor de 2 atm que sale de la RED 40/2 con temperatura 150 °C se une al vapor de la contrapresión de la turbina, esta tiene una toma no regulada de presión de 5 atm que se emplea en el calentador de alta presión.

El vapor de 10 atm se aprovecha en el proceso tecnológico en las siguientes plantas:

- Hornos de Reducción
- Lixiviación y lavado
- Calcinación
- Puerto
- Laboratorio Central
- Centro de Investigaciones
- Comedor Central.

El vapor de 2 atm se consume en la planta de Recuperación de Amoniaco y Comedor Interno.

Sistema de instrumentación y automatización en las calderas

El control de las calderas es un tema extenso que incluye, tanto los procedimientos de arranque y parada como los enclavamientos de seguridad y la operación en continuo de la caldera. Tradicionalmente, al desarrollar el control de una caldera, las acciones de modulación de esta se desarrollaban con equipos analógicos (continuos).

Las secuencias de arranque y parada, así como los enclavamientos, son acciones digitales (todo/nada) que implicaban equipos digitales. Actualmente, debido a los avances en los sistemas basados en microprocesador es posible integrar estos dos sistemas en uno solo, aunque se siguen manteniendo algunos condicionantes en lo que se refiere a los equipos dedicados a la seguridad de la caldera. Para poder desarrollar una aplicación de control adecuadamente es necesario entender correctamente los objetivos del sistema de control.

En el caso de las calderas de vapor existen tres objetivos básicos:

- Hacer que la caldera proporcione un suministro continuo de vapor en las condiciones de presión y temperatura deseadas.
- Operar continuamente la caldera al menor coste de combustibles, manteniendo un alto nivel de seguridad.
- Arrancar y parar, de forma segura; vigilar y detectar condiciones inseguras y tomar las acciones necesarias para una operación segura en todo momento.

Los dos primeros objetivos serán realizados por lo que tradicionalmente se conoce como sistema de control analógico, mientras que el tercero será labor del sistema de seguridades y manejo de quemadores.

Principales lazos de mediciones en caldera de vapor

Las principales mediciones que se realizan en la caldera son:

- 1-Medición de flujo de vapor por presión diferencial.
- 2-Medición de presión de vapor de salida (transmisores de presión, manómetros y presostatos).

3-Medición de temperatura en el domo de la caldera (termopares y termorresistencias Pt100).

4-Medición de nivel de agua por presión diferencial.

Medición de flujo de vapor por presión diferencial en la caldera 4

Utiliza dispositivos que generan una presión diferencial debido al paso de un fluido por una restricción. La razón es que el caudal es proporcional a la raíz cuadrada de las diferencias de presiones entre dos puntos, antes y después de la restricción. Uno de los elementos es la placa-orificio o placa perforada. Allí, el fluido sufre una disminución de su presión, la cual es mínima en el punto denominado vena contracta. Aunque la presión tiende a recuperarse, existe al final una pérdida de presión.

Una placa-orificio se coloca en una tubería, sujeta entre dos bridas. La forma y ubicación del agujero son el rasgo distintivo de tres tipos de este dispositivo: la placa concéntrica, la excéntrica y la segmental; la selección de algunas de estas depende de las características del fluido a medir.

Se emplea un transmisor de presión diferencial para la toma de presiones y el envío de una señal que represente el flujo. A esta señal, sin embargo, se le debe extraer la raíz cuadrada para obtener una respuesta lineal con respecto al flujo. Una placa-orificio es colocada dentro de una tubería, dicho componente crea una diferencia de presión. El sentido del flujo indica la posición de la máxima diferencia de presión, mientras que la mínima está en el sentido opuesto al flujo. El transmisor posee dos terminales: uno positivo que es conectado a donde se encuentra la mayor diferencia de presión en la tubería, y el negativo que es conectado a donde se encuentra la menor diferencia de presión. Esta diferencia se censa y la señal en corriente del orden de 4-20 mA depende de dicha diferencia entre presiones (Figuras 1 y 2).

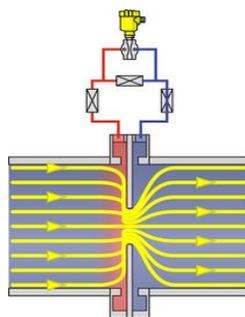


Figura 1. Ejemplo de un lazo de medición de flujo.



Figura 2. Transmisor de presión diferencial.

Principio de funcionamiento del transmisor de presión diferencial

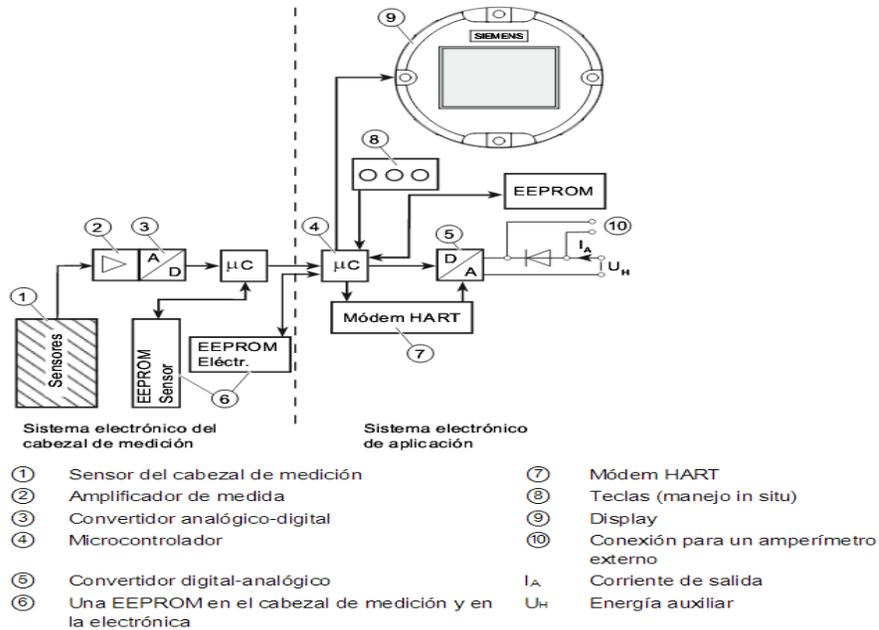


Figura 3-6 Funcionamiento del sistema electrónico con comunicación HART

Figura 3. Principio de funcionamiento del transmisor de presión diferencial.

Función

- El sensor ① transforma la presión de entrada en una señal eléctrica.
- Esta señal se amplifica con el amplificador ② y se digitaliza en un convertidor analógico-digital ③
- La señal digital se evalúa en un microcontrolador ④ y se somete a una corrección de linealidad y comportamiento térmico.

- Después, la señal digital es convertida en un convertidor digital-analógico ⑤ a la corriente de salida de 4 mA a 20 mA. Un circuito con diodos sirve de protección contra la inversión de la polaridad.
- En la conexión ⑩ es posible efectuar una medición ininterrumpida de la corriente mediante un amperímetro de baja impedancia.
- Los datos específicos del cabezal de medición, del sistema electrónico y de parametrización están guardados en dos memorias EEPROM ⑥. La primera memoria está acoplada al cabezal de medición y la segunda al sistema electrónico.

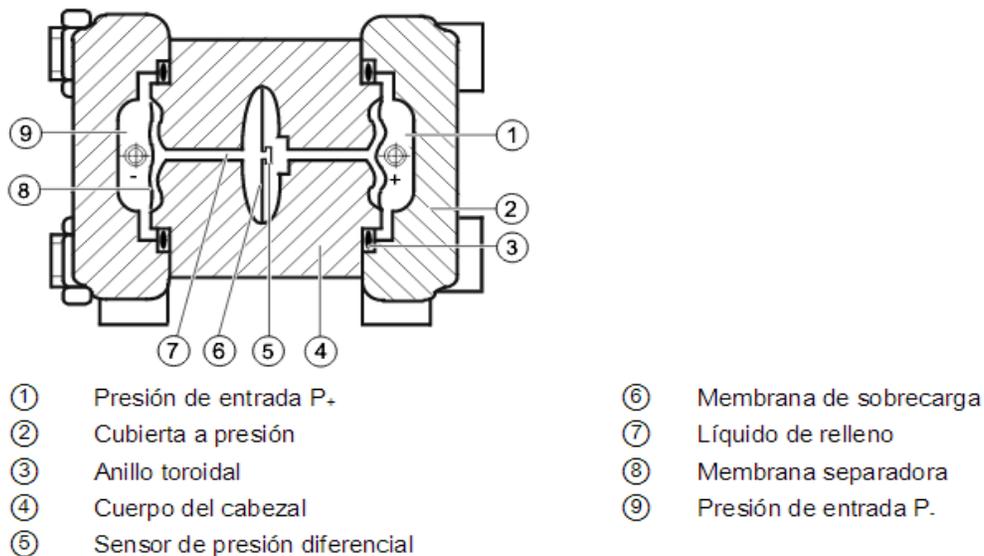


Figura 4. Cabezal de medición para presión diferencial y caudal.

La presión diferencial se transmite a través de las membranas separadoras ⑧ y del líquido de relleno ⑦ hasta el sensor de presión diferencial ⑤.

- Al sobrepasarse los límites de medida, la membrana de sobrecarga ⑥ se desvía hasta que una de las membranas separadoras ⑦ entra en contacto con el cuerpo del cabezal ④. De este modo, la membrana separadora ⑧ protege el sensor de presión diferencial ⑤ contra sobrecarga.
- La presión diferencial provoca la desviación de la membrana de medición. Esta desviación modifica el valor de resistencia de las cuatro piezorresistencias (conectadas en puente) del sensor de presión diferencial.

- La modificación de la resistencia produce una tensión de salida de puente proporcional a la presión diferencial.

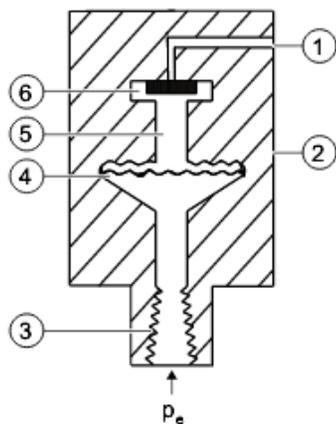
Medición de presión de vapor de salida de la caldera 4:

Para la medición de presión de vapor de la caldera 4 se utilizan transmisores de presión y manómetros para la medición local (Figuras 5, 6 y 7).



Figura 5. Transmisor de presión.

Principio de funcionamiento del transmisor de presión



- | | | | |
|---|-----------------------------------|-------|----------------------------|
| ① | Orificio de presión de referencia | ⑤ | Líquido de relleno |
| ② | Cabezal de medición | ⑥ | Sensor de presión relativa |
| ③ | Conexión a proceso | p_e | Presión de entrada |
| ④ | Membrana separadora | | |

Figura 6. Cabezal de medición para presión relativa.

La presión de entrada p_e se transmite a través de la membrana separadora ④ y del líquido de relleno ⑤ hasta el sensor de presión relativa ⑥ y su membrana de medición sufre una desviación. Esta desviación modifica el valor de resistencia de las cuatro piezorresistencias (conectadas en puente) del sensor de presión relativa. La modificación de la resistencia produce una tensión de salida de puente proporcional a la presión de entrada.

Los transmisores, cuyos márgenes de medición son ≤ 63 bar, miden la presión de entrada respecto a la atmósfera, mientras que los transmisores con márgenes de medición ≥ 160 bar, la miden respecto al vacío.

También aparece la medición local, realizada con manómetros fabricados con tubos de Bourdon.

Principio de funcionamiento del manómetro

El manómetro está destinado para la medición local en el proceso industrial. El tubo de Bourdon está acoplado a la aguja indicadora que es la que se desplaza en dependencia de la presión existente. Es el método más común para medir presiones.

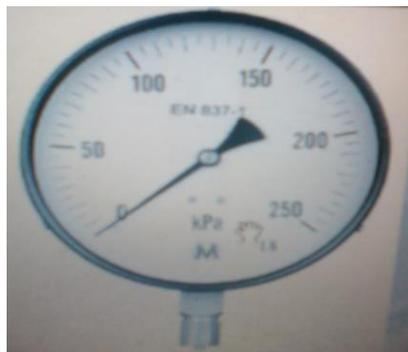


Figura 7. Manómetro.

Tubo de Bourdon: (Figura 8).

-Tubo aplanado de bronce o acero curvado en arco.

-Al aplicar presión al interior del tubo tiende a enderezarse, transmitiendo este movimiento a una aguja por medio de un mecanismo amplificador adecuado.

-Muy preciso hasta 200 atm, con precisión de 2-3 %.

-Escala máxima 7 000 kg/cm².

-Esta deformación puede trasladarse a una aguja o a un sistema de resistencia variable o a un campo electromagnético.



Figura 8. Tubo Bourdon.

Medición de nivel de agua en los tanques de la caldera 4

La medición de nivel se define como la determinación de la posición de la interface entre dos medios. Estos son usualmente fluidos, pero pueden existir sólidos o combinación de ellos. La interface puede existir entre un líquido y un gas, un líquido y su vapor, dos líquidos, un sólido o sólido diluido y un gas.

Los métodos más utilizados en la industria para la medición de nivel de líquidos pueden ser clasificados en métodos de medición directa e indirecta.

Métodos directos:

Indicadores visuales

Medidor de sonda:

- Regla graduada
- Varilla con gancho
- Cinta métrica metálica graduada con plomada
- Indicador de cristal.

Métodos indirectos:

- El empuje producido por el propio líquido
- Medidores de desplazamiento
- Mecanismo de resorte
- Mecanismo con barra de torsión.

Presión hidrostática

- Manométrico
- Caja de diafragma
- Trampa de aire
- Tipo burbujeo
- Presión diferencial.

Presión diferencial

Consiste en un sensor de diafragma en contacto con el líquido del estanque, que mide la diferencia entre la presión hidrostática en un punto del fondo del tanque y la presión en un punto de la parte superior del tanque o a la atmósfera. Para un tanque abierto, esta presión es proporcional a la altura del líquido y a su peso específico, es decir: $P = \gamma h$ en la que:

P = presión

h = altura del líquido sobre el instrumento

γ = densidad del líquido

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

El diafragma forma parte de un transmisor neumático, electrónico o digital de presión diferencial.

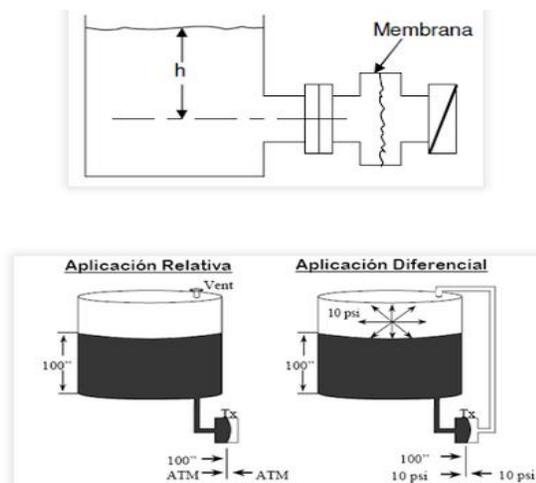


Figura 9. Ejemplo de aplicación del transmisor de nivel.

Medidor de presión diferencial:

En la medición de nivel con este principio se debe tener en cuenta dos conceptos importantes para calibración y ajuste de los transmisores. Los dos conceptos son:

- Supresión de cero
- Elevación de cero

Supresión de cero: Se necesita un cero suprimido cuando un transmisor de presión absoluta o un medidor está montado por debajo de la toma de alta presión (conexión inferior del proceso). Cuando el transmisor está montado por debajo de la toma de alta presión el fluido de llenado en el capilar ejerce presión en el sensor del transmisor, haciendo que emita una lectura positiva de presión, incluso cuando el depósito esté vacío (Figura 10).

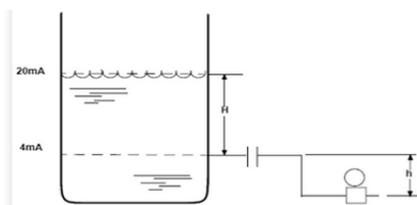


Figura 10. Supresión de cero.

Elevación de cero: Se necesita un cero elevado para un transmisor de presión absoluta o un medidor montado por encima de la toma de alta presión (conexión inferior del proceso) o para una aplicación de presión diferencial de dos juntas. En estos casos, el

transmisor lee una presión negativa cuando el depósito está vacío, debido al efecto de presión principal del fluido de llenado del capilar (Figura 11).

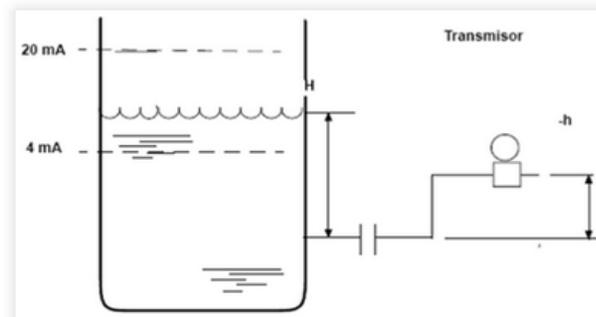


Figura 11. Elevación de cero.

Uso de un transmisor para la medición de nivel: Se emplea en tanques abiertos y cerrados a presión y vacío; no presenta partes en movimiento dentro del tanque, son confiables, admite temperaturas del fluido hasta 120 °C, es de fácil limpieza y no experimenta la influencia de los cambios de presión. El material del diafragma puede ser de acero inoxidable, acero inoxidable recubierto de teflón, monel, tantalio, hastelloy B. La precisión está en $\pm 0,5\%$ en los neumáticos, $\pm 0,2\%$ a $\pm 0,3\%$ en los electrónicos, y de $\pm 0,15\%$ en los "inteligentes" con señales de salida de 4-20 mA c.c.

Medición de temperatura en el domo de la caldera 4

Los dos tipos de termómetros más usados son: los termómetros de resistencia o termistores (RTDs en inglés) y los termopares (*thermocouples*), los más utilizados a nivel industrial y, por tanto, los más económicos. Cuando se requiera mayor exactitud y fiabilidad se usarán los termistores. Los primeros se basan en el principio de que, al aumentar la temperatura, aumenta la resistencia del conductor que forma el elemento propio de la resistencia. La variación de resistencia de las sondas es medida con un circuito de puente *Wheatstone* dispuestos en montajes de dos, tres o cuatro hilos, según sea el número de hilos de conexión a la resistencia. La sonda Pt100 es el termistor más común. Los termopares se basan en el efecto descubierto por Seebeck en 1821, de la circulación de una corriente en un circuito formado por dos metales diferentes, las uniones de las cuales (unión de medida o caliente y unión de referencia o fría) se mantienen a diferente temperatura (Figura 12).

Como la f.e.m. generada es una función de las temperaturas de las dos uniones es necesario controlar o referir las medidas a la temperatura de la unión de referencia o unión fría.

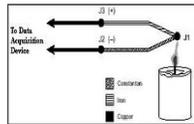


Figura 12. Efecto Seebeck.

El termopar tipo k es el que se encuentra en uso en el área. De cromel/alumel (el cromel es una aleación de cromo y níquel y el alumel es de aluminio y níquel). Para temperaturas moderadas (hasta alrededor de 260 °C), combinaciones de hierro y cobre, hierro y constantán (aleación de cobre y níquel) son usadas frecuentemente. A altas temperaturas (hasta alrededor de 1 640 °C) los hilos son fabricados de platino o aleación de platino y rodio.

Termorresistencias Pt100

Se basan en el aumento de resistencia de un hilo conductor con el incremento de la temperatura. La magnitud de este cambio, con respecto al cambio de temperatura en él, se llama "coeficiente térmico de resistencia" del material conductor.

Para la mayoría de metales puros este es constante sobre cierto rango de temperatura. Por ejemplo, el coeficiente del platino (α) es 0,00392 ohm / (ohm) (°C) sobre un rango de 0 °C a 100 °C, teniendo una resistencia de 100 ohm para una temperatura de 0°C, por lo que recibe el nombre de Pt100. Para la mayoría de conductores, el coeficiente mencionado (α) es positivo. Comúnmente los materiales empleados incluyen platino, níquel, cobre, níquel-hierro y tungsteno. Entre todos ellos, el platino es el más usado debido a su característica lineal sobre la mayor parte de su rango; también el níquel, por su gran coeficiente de resistencia, aunque no tiene una característica lineal. Para el Pt100 se puede utilizar la siguiente fórmula: para obtener la respuesta aproximada del sensor para una temperatura dada: $R = 100 (1 + \alpha T)$.

Debido al diámetro tan pequeño del hilo utilizado en estos RTD (0,05 mm) su construcción incluye blindajes protectores contra choques mecánicos. A menudo las sondas de resistencia se fabrican con tres o cuatro hilos de salida con fines de eliminar los efectos de cambio de resistencia en los hilos de extensión por cambios de la

temperatura ambiente. Los circuitos de medición comunes emplean puentes de Wheatstone (Figura 13).



Figura 13. Termorresistencia.

Conclusiones

Se identifican los sistemas de medición con las variables flujo, presión, nivel y temperatura y el principio de funcionamiento de los instrumentos usados para medir estas variables en la planta termoenergética de la fábrica Comandante Ernesto Che Guevara.

Se caracterizan los diferentes sistemas de medición existentes en la planta termoenergética de la fábrica Comandante Ernesto Che Guevara.

Agradecimientos

A los ingenieros Frank Verdecia Fonseca y Armando Reyes Borges y a los instructores Tomás Cuenca Roche y Dayron Ortiz Torres.

Referencias bibliográficas

ECURED. Historia de la medición. Consultado: 13 jun 2018. Disponible en: https://www.ecured.cu/Historia_de_la_medición

LAFFITA-GÓMEZ, D. E. 2016. *Diseño e implementación de un sistema de medición de temperatura con fines docentes*. Eduardo Smith Galano (tutor). Trabajo de diploma. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 69 h. Consultado: 13 jun 2018. Disponible en: <BVIRTUAL/electrica/tesis/2016/LaffitaGomez.pdf>.

LORENZO-MUSTELIER, A. 1987. *Mediciones eléctricas*. T. 1. Ministerio de Educación Superior, La Habana.