



Medición de temperatura mediante sensores inteligentes basados en microcontrolador*

Anghelo Marino López Rubio¹✉

Fecha de recepción: 2 de septiembre de 2014

Fecha de revisión: 11 de diciembre de 2014

Fecha de aprobación: 25 de diciembre de 2014

Cómo citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: López, A. (2014). Medición de temperatura mediante sensores inteligentes basados en microcontrolador. *Revista UNIMAR*, 32(2), 107-127.

RESUMEN

La temperatura es una de las variables a tener en cuenta dentro del desarrollo de cualquier proceso a nivel industrial, comercial e investigativo, entre otros, ya que su influencia en el desarrollo del mismo es primordial y, en algunos casos, definitoria. El presente trabajo busca abordar los diferentes elementos básicos de medición de temperatura de mayor uso en los últimos años y su aplicación en algunos casos específicos, en especial, aquellos relacionados con el desarrollo e implementación de sensores inteligentes basados en microcontroladores y microprocesadores de carácter comercial y de bajo costo. Finalmente, se discuten los avances encontrados, y se concluye sobre lo encontrado y lo que se espera desarrollar a futuro en este campo.

Palabras clave: Medición, microcontrolador, sensor inteligente, temperatura.

Temperature measurement through intelligent sensors based on microcontroller

ABSTRACT

Temperature is an important variable in the development of any process, both industrial and commercial and research level, given its influence on its progress, which results decisive in some cases. This paper seeks to address the different key elements of temperature measurement in recent years and their application in specific cases, such as those related to the development and implementation of intelligent sensors based on microcontrollers and commercial and inexpensive microprocessors. Eventually the progress is discussed and it is concluded with the findings and expectations for future development in this field.

Key words: Measurement, microcontroller, intelligent sensor, temperature.

* Artículo de Revisión. Este artículo recopila datos respecto al tema de interés, mediante una revisión de fuentes bibliográficas primarias y secundarias disponibles en bases de datos especializadas; se realizó la búsqueda haciendo uso de palabras clave como: dsPIC, microcontrolador, sensor de temperatura inteligente, medición de temperatura e instrumentación electrónica, entre otras. Esto con el fin de lograr una base teórica que permita el desarrollo, discusión del tema y la formulación de conclusiones.

¹ ✉ Maestrando en Sistemas Automáticos de Producción, Universidad Tecnológica de Pereira; Ingeniero Electrónico, Universidad de Nariño; Docente investigador, Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia. Correo electrónico: alopez@umariana.edu.co

Medição de temperatura usando sensores inteligentes baseados em microcontrolador

RESUMO

A temperatura é uma variável importante no desenvolvimento de qualquer processo, tanto no nível industrial e comercial como no de investigação, devido à sua influência sobre o seu progresso, o que resulta decisiva em alguns casos. Este artigo procura abordar as diferentes noções básicas de medição de temperatura de mais utilização nos últimos anos e sua aplicação em casos específicos, como os relacionados com o desenvolvimento e execução de sensores inteligentes baseados em micro controladores e microprocessadores comerciais e de baixo custo. Finalmente, o progresso é discutido e conclui-se com base em as expectativas para o futuro desenvolvimento neste campo.

Palavras-chave: Medição, micro controlador, sensor inteligente, temperatura.

1. Introducción

La temperatura de un cuerpo o sistema determinado, produce diversos comportamientos que se relacionan estrechamente con el valor de esta, es por eso que las mediciones de dicha variable son preponderantes para el desarrollo de gran parte de las actividades de la sociedad. Gracias a la temperatura se pueden definir conceptos de gran importancia como son energía, masa, presión, vibración, desgaste, fricción, así como el comportamiento de muchas reacciones químicas de la naturaleza, o realizadas dentro de un laboratorio.

Debido a esto, la temperatura es una de las variables más importantes a tener en cuenta en los procesos de monitoreo y control a nivel industrial, según Sarma, Chakraborty y Boruah (2009) dichos sistemas demandan del proceso de medición, la mayor exactitud, resolución, adecuación al ambiente y diferentes rangos de operación, ya que tiene que ver con la producción de alimentos, su almacenamiento y vida útil, también con la agricultura, la generación de energía, la metalurgia, los materiales, la medicina, la farmacéutica, la informática, el medio ambiente, y en general, con todos los campos de la ciencia, por lo cual es determinante en el desarrollo de la sociedad.

Sin embargo, la temperatura es un concepto abstracto, el cual se explica por su efecto en las condiciones del medio ambiente, los objetos y sus propiedades, en general se relaciona con el comportamiento de la materia, y en la mayoría de

los casos define su estado. En la cultura popular la temperatura se asocia a los conceptos de frío y calor; de manera que algo es más caliente si presenta una mayor temperatura, o está más frío si se presenta una disminución en ella. No obstante, aunque este concepto es común y aceptable, en la realidad la temperatura se define de manera física como la cuantificación de la actividad molecular de la materia, y es preponderante realizar su medición de la manera más exacta y confiable posible, por lo cual los sensores de temperatura necesitan estar al alcance de la investigación, la industria y la domótica, entre otras.

El principio de medición de los sensores de temperatura, se basa en usar componentes y materiales que tienen un comportamiento característico frente a cambios en esta variable, materiales que pueden ser sensitivos a la temperatura, pueden tener buena repetitividad, baja histéresis, desgaste, alta precisión, desempeño estable y confiabilidad, entre otros (Liu, Ma & Yang, 2011).

En este medio, las termocuplas son los sensores más populares y confiables, ya que tienen un amplio rango de operación y pueden ser aplicados en diferentes ambientes industriales, ya que el límite inferior de una termocupla puede ser de hasta -270°C y el límite superior puede llegar alrededor de los 1.800°C .

En los sistemas de medición es muy común el uso combinado de sensores analógicos, como las termocuplas en el caso de la temperatura y sistemas de ad-

quisición de señales. Estos últimos, se han incluido en variedad de aplicaciones ya que traen numerosos beneficios al sistema. Para lograr la construcción de este tipo de sistemas, es necesario hacer uso de microcontroladores, elementos que disponen de características que se acoplan a las necesidades de los sistemas actuales de medición, además de la existencia de diversos componentes adicionales que se diseñan para conectarse directamente a los puertos de entrada/salida del microcontrolador, y causan el menor impacto al circuito que se esté diseñando (Fisher & Kebede, 2010).

El presente artículo de revisión pretende dar una visión general de los sensores de temperatura de uso extendido a nivel industrial, doméstico y académico en Colombia, y la manera de potenciar sus características aprovechando las prestaciones de las que disponen los sistemas basados en microcontroladores; elemento que hoy en día se encuentra presente en la mayoría de dispositivos de medición, ya que permite el procesamiento de la señal que contiene la información de las variaciones de temperatura de un determinado proceso o sistema, y permite trabajar con ella, de manera que se pueda amplificar, filtrar ruidos, almacenar en memoria, mostrar en pantalla, realimentar hacia un sistema de control y transmitir hacia otro sistema de procesamiento/almacenamiento superior.

Esta capacidad implica que la medición de temperatura a través de microcontroladores, se ha convertido en una tendencia, que como muchas otras, busca reemplazar de forma rápida a los instrumentos puramente analógicos por sistemas digitales que proveen mayores prestaciones a la hora de trabajar con este tipo de señales, que son determinantes en el comportamiento de un sistema, y se convierten en parte fundamental del instrumento, ya que se constituyen como el puente entre la variable, tal y como se presenta entre el medio y el usuario final, gracias a que las variaciones y niveles de temperatura se pueden medir con mayor precisión y en tiempo real.

2. Metodología

Para la localizar los insumos bibliográficos se utilizaron varias fuentes documentales, entre las que

cabe destacar la búsqueda bibliográfica realizada en las bases de datos Scopus, Springer, ScienceDirect e IEEE Xplore, que son especializadas en temas relacionados con ciencia, tecnología e ingeniería eléctrica y electrónica; para ello, se utilizaron las palabras clave: medición (measurement), temperatura (temperature), sensor inteligente (intelligent sensor), microcontrolador (microcontroller). Los registros obtenidos oscilaron alrededor de los 500 registros tras la combinación de las diferentes palabras clave. También, se realizó una búsqueda en Internet por medio de Google Académico (Google Scholar) con los mismos términos.

Se seleccionaron aquellos documentos cuyo contenido oscilaba entre temas y aplicaciones prácticas de mayor relevancia sobre tipos de sensores de temperatura, medición de temperatura mediante el uso de microcontroladores, sensores de temperatura inteligentes y sistemas de adquisición de señales provenientes de sondas de temperatura a nivel industrial y doméstico. La revisión realizada es descriptiva, cuya intención es agrupar información sobre conceptos útiles en cuanto a la medición de temperatura mediante el uso de sistemas micro controlados.

3. Medición de temperatura

Según Neaca M. y Neaca A. (2012) la medición de temperatura es un tema que viene de tiempo atrás, pero aún es de gran interés, ya que los procesos que involucran cambio de temperatura siguen vigentes y en constante cambio, demandando sistemas cada vez más exactos y confiables. En la actualidad, el procesamiento de datos proveniente de dicho proceso, debe ser desarrollado por equipos con alta capacidad de cómputo y velocidad para el tratamiento y almacenamiento de la información disponible, como por ejemplo, los microcontroladores y microprocesadores, lo cual implica realizar una adaptación de la señal analógica que entrega el sensor al sistema digital que realiza su procesamiento.

En cuanto a los sistemas de medición en general, es necesario aclarar que existe una terminología, que es preciso dominar, para obtener una clara comprensión de las características dinámicas y estáticas

del instrumento que permite realizar la medición. En Villalobos, Rico, Ortiz y Eli (2006) se reconoce que la terminología es uno de los puntos principales para poder conocer las especificaciones con la que los fabricantes de equipos e instrumentos diseñan, desarrollan, prueban y calibran.

En el control de procesos en industrias como química, petroquímica, alimenticia, metalúrgica, energética, textil, papel, etc., los instrumentos utilizados como indicadores, registradores, controladores, transmisores y válvulas de control, entre otros, tienen su propia terminología, la cual se ha unificado con el fin de que los fabricantes, usuarios y los organismos o entidades que intervienen directa o indirectamente en el campo de la instrumentación puedan emplear el mismo lenguaje (Creus, 2011). Los términos empleados se toman en base a sugerencias de la norma ANSI/ISA-S51.1-1979 (R1993), y para el caso específico de la medición de temperatura la ITS-90 (por sus siglas en inglés International Temperature Scale - Escala de Temperatura Internacional), que se pueden considerar como los referentes más relevantes en esta materia.

Un término importante dentro de los sistemas de medición de temperatura es el campo de medida (*range*), el cual según Creus (2009), es el espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida, de recepción o de transmisión del instrumento. De este concepto se deriva la dinámica de medida o rangeabilidad (*rangeability*), que es el cociente entre el valor de medida superior e inferior de un instrumento. Por ejemplo el campo de medida de un instrumento de temperatura puede ser de 10 - 200°C y su rangeabilidad para este caso sería de $200/10 = 20$.

Otro concepto importante a tener en cuenta en medición es el alcance (*span*), que se considera como la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento. Que para el ejemplo del instrumento de medición de temperatura sería de 190°C.

Ya que toda medida es susceptible a errores, la referencia que hace Creus (2011), también describe el

término de error estático, que se presenta cuando el proceso está en condición de régimen permanente. Cuando el sistema de medición se encuentra en condiciones dinámicas el instrumento tiene características comunes a los sistemas físicos, como la absorción de energía del proceso y la transferencia de la misma, lo cual da lugar a retardos en la lectura del aparato, este último aspecto se conoce como el error dinámico.

El valor del error siempre es desconocido pero se puede acotar estimando su incertidumbre, es decir, si existen errores de importancia desconocida, en vez de utilizar la palabra error debe más bien hablarse de incertidumbre; ya que por ejemplo, en un proceso de medida de temperatura con un termopar con vaina, en tratamientos térmicos con gases, puede ocurrir que el gas difunda a través de los poros de la vaina y ataque químicamente el hilo del termopar, con lo que éste verá afectada su relación temperatura-f.e.m., y el instrumento indicará valores que no tendrán nada que ver con la temperatura.

Otro aspecto importante en termometría y en general en cualquier proceso de medición es la exactitud (*accuracy*), la cual según Creus (2011), es el grado de aproximación al valor verdadero, es decir, es la cualidad del instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al verdadero valor de la variable. Esta característica viene relacionada con la fabricación del instrumento, y define los errores cometidos cuando se emplea el dispositivo de medida en condiciones normales del servicio durante un periodo de tiempo determinado.

La precisión (Creus, 2011), de una medida se puede entender como el grado de dispersión del resultado de la medida cuando ésta se repite un número determinado de veces bajo condiciones especificadas, es decir, es la cualidad por la que el instrumento tiende a dar lecturas muy próximas unas de otras, dicho en otros términos, con un grado de dispersión relativamente bajo.

Asimismo, otro valor importante a tener en cuenta es la incertidumbre de la medida (*uncertainty*) (Gómez, Reyes y Guzman, 2008) que es un parámetro asociado al resultado de una medida, que caracteri-

za la dispersión de los valores que pueden atribuirse razonablemente a la variable particular sujeta a la medida -por ejemplo: temperatura-, y es un estimado de la magnitud del campo expresada con un nivel de confianza determinada.

También son importantes otros conceptos como la trazabilidad (*traceability*) (Creus, 2011), la cual es una propiedad del resultado de las mediciones efectuadas con un instrumento o con un patrón, que puede relacionarse con patrones nacionales o internacionales, a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones, todas ellas con incertidumbres determinadas en cada comparación, esto se documenta en un informe de calibración o ensayo. La zona muerta (*dead zone o dead band*) (Creus, 2011) es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento, es decir, que no produce su respuesta.

La sensibilidad (*sensitivity*) (Creus, 2009) es la razón entre el incremento de la señal de salida o de lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona, después de haberse alcanzado el estado de reposo. Y la repetibilidad (*repeatability*) expresa cuantitativamente la capacidad de reproducción de las mediciones sucesivas cuando se da el mismo procedimiento, instrumento, condiciones de trabajo, instrumentista, lugar y tiempo.

La histéresis (*hysteresis*), se puede tomar como la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por la señal de salida para el mismo valor cualquiera del campo de medida, cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos, ascendente y descendente (Creus, 2011). La linealidad es la aproximación de una curva de calibración a una línea recta especificada.

También se manejan conceptos como campo de medida con elevación cero, campo de medida con supresión de cero, elevación de cero, supresión de cero, deriva, fiabilidad (*reliability*), resolución, resolución infinita, ruido, temperatura de servicio, vida útil de servicio, reproductibilidad (*reproductibility*) y respuesta frecuencial, que también son de gran importancia en los sistemas de medición y, que deben ser analizados dentro de un proceso serio de adquisición de datos o diseño de instrumental.

3.1 La escala ITS-90

En sistemas de medición de temperatura, no solamente son importantes las características del instrumento, sino que también hay necesidad de unificar las escalas de medición de ésta variable, con el fin de que haya uniformidad global en cuanto a los sistemas de referencia de medición y a las conversiones entre diferentes escalas. Es por ello, que en 1927 se estableció por primera vez una escala internacional de temperatura, donde se consignaron una serie de puntos fijos para diferentes escalas.

Hoy en día la escala que se aplica para termometría es la ITS-90, establecida por Preston-Thomas (1990). Dicha escala fue adoptada por el Comité Internacional de Pesos y Medidas, y suprimió a las normas anteriores. En ella se encuentra información sobre unidades, principios, definiciones, funciones y tablas de lo que a medición de temperatura se refiere. Esta escala cubre el rango que va desde los 0.65°K hasta la temperatura más alta medible por medio de un pirómetro monocromático.

3.2 Sensores usados para medición de temperatura

Una vez establecidos las características de mayor importancia en los sistemas de medida de temperatura y las escalas mundialmente aceptadas, se describen los principales elementos sensores de la variable. Según Neaca M. y Neaca A. (2012) para medir temperatura, entre los elementos más utilizados están los termistores, los RTD (Resistance Temperature Detectors), las termocuplas, los sensores tipo circuito integrado, y actualmente, los basados en fibra óptica. La elección del sensor siempre se fundamenta en el análisis del campo de temperatura que será medido.

3.3 Termistores

Los termistores son elementos resistivos dependientes de la temperatura, fabricados con materiales semiconductores como óxidos de metal, polímeros y cerámicos, sus resistencias son generalmente incluidas entre 2 – 100 KOhm, y la mayoría poseen coeficiente de temperatura negativo (NTC), también existen los de coeficiente de temperatura positivo (PTC). Estos dispositivos se caracterizan por tener un bajo costo y una linealidad predecible. Se usan

generalmente para medir temperaturas por debajo de los 150°C pero se pueden encontrar en rangos de hasta 550°C. Necesitan circuitos de acondicionamiento de señal. Tienen una buena estabilidad térmica y se recomiendan para instalaciones donde se demande alta exactitud.

Según Huddleston (2007), los termistores requieren una corriente para poder operar, lo cual les acarrea el problema de autocalentamiento y su rango de operación es menor al de una termocupla o un RTD, aunque dentro de su rango de medición y configurados de manera apropiada pueden llegar a ser muy exactos.

3.4 Detectores de temperatura resistivos

La autores Boris, Hocenski y Cvitas (2006) señalan que los RTD operan bajo el principio de los cambios en la resistencia eléctrica de metales puros, caracterizados por un coeficiente de temperatura positivo. Los RTD hechos de platino (Pt), son comúnmente usados debido a su amplio rango de temperatura, exactitud y estabilidad. La aproximación a trozos de la curva característica de los RTD es un polinomio de la forma de la ecuación (1) y el diagrama de bloques típico para este tipo de sensor se encuentra en la Figura 1.

$$T_{RTD}(R_{RTD}) = \sum_{k=0}^m c_k \cdot R_{RTD}^k, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (1)$$

Donde:

T_{RTD} , es la temperatura del sensor, [°C]

$R_{RTD}(T)$, es la resistencia del sensor a la temperatura T_{RTD} , [Ω]

c_k , son los coeficientes del polinomio para cada subsegmento, [$^\circ\text{C}/\Omega^k$]

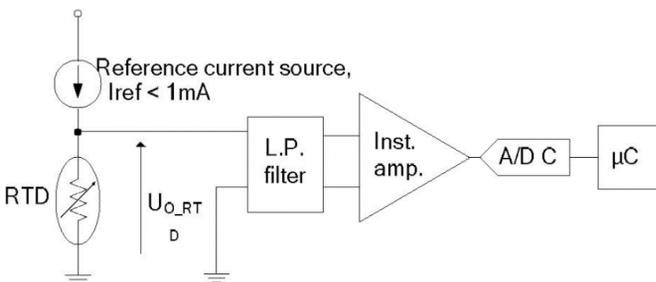


Figura 1. Diagrama de bloques funcional de un transductor en base a un RTD.

Fuente: Boris et al. (2006).

Ya que la relación entre resistencia y temperatura no es lineal, se pueden proponer dos modelos en rangos de temperatura razonables para la mayoría de aplicaciones. La ecuación (2) se aplica al rango de -200°C a 0°C y la ecuación (3) para el rango de 0°C a 850°C.

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3] \quad (2)$$

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + Ct^3] \quad (3)$$

Donde los valores de los coeficientes son:

$$A = 3,90802 \times 10^{-3}$$

$$B = -5,802 \times 10^{-7}$$

$$C = -4,27350 \times 10^{-12}$$

3.5 Termocuplas

Kochan O., Kochan R., Bojko y Chyrka (2007) establecen que los sensores de temperatura basados en termocuplas son ampliamente utilizados en la industria, ciencia y otros campos. Uno de los requerimientos de los equipos modernos es la alta precisión, por lo tanto, los elementos secundarios de medida están en constante evolución.

En el trabajo de Machin (2012) se presenta el principio básico de operación de las termocuplas, ya que establece que están conformadas por dos alambres de metales diferentes unidos en una junta de medición. En el momento en que los alambres cruzan una región donde la temperatura cambia, se genera en ellos una fuerza electro-motriz o f.e.m., también conocido como termo-voltaje. Este fenómeno se denomina Efecto Seebeck que tiene una magnitud típica de alrededor de 10 – 40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, dependiendo de los coeficientes de los alambres de la termocupla y la diferencia de temperatura a lo largo de la longitud total de estos.

Un modelo matemático de primer orden simplificado, para una termocupla puede encontrarse en Hung, McLoone, Irwin y Kee (2008), quienes establecen que bajo condiciones de flujo constante, el modelo puede expresarse matemáticamente como una ecuación diferencial en tiempo continuo, como se presenta en la ecuación (4).

$$T_g(t) = T_m(t) + \tau \dot{T}_m(t) \quad (4)$$

Donde τ es la constante de tiempo de la termocupla mientras T_g y T_m son las temperaturas de un gas y de la termocupla, respectivamente. En Reyes, Cid y Vargas (2013) se presentan varios tipos de termocuplas o termopares, que se clasifican dependiendo del tipo de metal o aleación usada para su construcción; entre los más importantes están:

- *Tipo E*, de Níquel-Cromo (cromel)/Cobre-Níquel (constantán). Recomendable para temperaturas entre -200°C y $+900^{\circ}\text{C}$. Tienen una sensibilidad de $68\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.
- *Tipo T*, de Cobre/Cobre-Níquel (constantán). Elevada resistencia a la corrosión, puede usarse en atmosferas oxidantes o reductoras. Se prefiere para medidas entre -200°C y $+250^{\circ}\text{C}$.
- *Tipo J*, de Hierro/Cobre-Níquel (constantán). Adecuada para atmósferas inertes y para temperaturas entre -200°C y $+1.200^{\circ}\text{C}$. El hierro sufre una alta oxidación por encima de los $+550^{\circ}\text{C}$, para lo cual se recomienda usar un mayor diámetro del hilo, y a temperaturas menores, a 0°C , se deben tomar precauciones debido a la condensación del agua sobre el hielo. Tienen una sensibilidad de $55\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.
- *Tipo K*, de Níquel-Cromo (cromel)/Níquel-Aluminio (constantán). Se recomienda para temperaturas de trabajo entre -200°C a $+1.270^{\circ}\text{C}$. Su respuesta tiene un comportamiento lineal con una sensibilidad de $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.
- *Tipo R*, de Platino-13% Rodio/Platino. Se emplea en atmosferas oxidantes a temperaturas de trabajo de hasta $+1.300^{\circ}\text{C}$. Presentan una sensibilidad de $10\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.
- *Tipo S*, de Platino-10% Rodio/Platino. Adecuada para mediciones a altas temperaturas de hasta 1.300°C . Se usa para calibración universal del punto de fusión del oro, debido a su alta estabilidad. Posee una sensibilidad de $1.2\text{mV}/100^{\circ}\text{C}$.
- *Tipo B*, de Platino -30% Rodio/Platino- 6% Rodio. Adecuada para altas temperaturas, superiores de $+1.800^{\circ}\text{C}$.
- *Tipo N*, de 84,6% Níquel – 14% Cromo – 1.4% Silicio/95.6% Níquel – 0.4% Silicio. Adecuada para mediciones a altas temperaturas de hasta $+2.316^{\circ}\text{C}$, gracias a su elevada estabilidad y resistencia a la oxidación.
- *Tipo C*, de Tungsteno – 5% Renio/Tungsteno - 26% Renio (ASTME 988). Con temperaturas de trabajo de entre 0°C a $+2.320^{\circ}\text{C}$.
- *Tipo D*, de Tungsteno – 3% Renio/Tungsteno – 25% Renio (ASTME 988). Con temperaturas de trabajo de entre 0°C a $+2.495^{\circ}\text{C}$.
- *Tipo G*, de Tungsteno/Tungsteno – 26% Renio. Con temperaturas de trabajo entre 0°C a $+2.320^{\circ}\text{C}$.
- *Tipo L*, de Hierro/Cobre – Níquel (DIN 43710). Similar al tipo J, con temperaturas de trabajo de entre -200°C a $+900^{\circ}\text{C}$.
- *Tipo U*, de Cobre/Cobre – Níquel (DIN 43710). Similar al tipo J, con temperaturas de trabajo de entre -200°C a $+600^{\circ}\text{C}$.

La Figura 2 tomada de Bolton (2013) muestra las curvas de respuesta de las termocuplas tipo J, K y N.

En Creus (2011) y Preston-Thomas (1993) se encuentran las funciones polinómicas f.e.m – temperatura de NIST (National Institute of Standards and Testing) definidas para la mayoría de los termopares. Por ejemplo, para los termopares tipo J, la ecuación (5) muestra el voltaje termoeléctrico (E) en función de la temperatura (T) y los correspondientes coeficientes en la Tabla 1. Y en la ecuación (6) y la Tabla 2, se encuentran el polinomio que representa la temperatura (T) en función del voltaje termoeléctrico (E) y los correspondientes coeficientes.

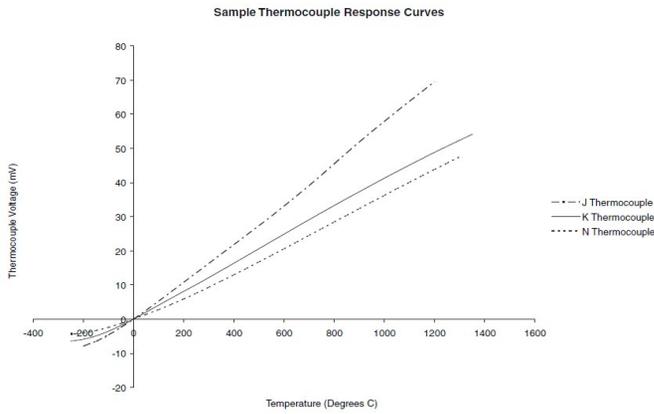


Figura 2. Curva de respuesta de termocuplas tipo J, K y N. Fuente: Bolton (2013).

$$mV = \sum_{i=0}^n a_i \times T^i, \text{ con } T \text{ en } ^\circ\text{C}. \quad (5)$$

En los circuitos con termopares se presenta la denominada unión fría, que es cualquier unión de dos metales, distinta a la unión que se calienta, es decir, la que toma la medida (Creus, 2011). Normalmente no se encuentran las temperaturas

de la unión fría y la que se desea medir de manera independiente, sino que se emplean métodos para medir directamente el voltaje que corresponde a la diferencia entre las dos temperaturas en cuestión.

Para realizar la compensación de temperatura de la unión de referencia los diseñadores por lo general optan por dos opciones: compensación por software y compensación por hardware. En la compensación por software, se usa otro sensor auxiliar para determinar la temperatura del bloque isotérmico y se calcula el voltaje equivalente a la unión de referencia. Luego, al voltaje medido se le resta el voltaje de referencia de la unión de referencia, para encontrar el voltaje del termopar, y después convertirlo en temperatura equivalente, siendo ésta la temperatura que realmente se desea conocer. En la compensación por hardware, en este caso, en lugar de determinar la temperatura del bloque isotérmico y posteriormente hallar el voltaje equivalente, lo que se hace es insertar directamente un voltaje equivalente a ésta en el circuito termoeléctrico, de manera que ambas se compensen y la medida realizada, sea directamente la tensión correspondiente a la temperatura que se desea medir.

Tabla 1. Coeficientes polinómicos para los termopares tipo J, para voltaje termoeléctrico en función de la temperatura

Campo de medida (°C)	Coeficientes		Campo de medida (°C)	Coeficientes	
-210 a +760	a0	0.000000000000E+00	+760 a +1200	a0	0.296456256810E+03
	a1	0.503811878150E-01		a1	-0.149761277860E+01
	a2	0.304758369300E-04		a2	0.317871039240E-02
	a3	-0.856810657200E-07		a3	-0.318476867010E-05
	a4	0.132281952950E-09		a4	0.157208190040E-08
	a5	-0.170529583370E-12		a5	-0.306913690560E-12
	a6	0.209480906970E-15			
	a7	-0.125383953360E-18			
	a8	0.156317256970E-22			

Fuente: NIST, ASTN, IEC, ITS-90 (Preston-Thomas, 1993).

$$T = c_0 + c_1E^1 + c_2E^2 + \dots + c_iE^i \quad (6)$$

Tabla 2. Coeficientes polinómicos para los termopares tipo J, para temperatura en función de voltaje termoeléctrico

Rango de Temperatura	-210 a 0°C	0 a 760°C	De 760 a 1200°C
Rango de voltaje	-8.095 a 0 μ V	0 a 42.919 μ V	42,919 a 69.533 μ V
c0	0.00000000...	0.00000000...	-3.11358187E+03
c1	1.9528268E-02	1.978425E-02	3.00543684E-01
c2	-1.2286185E-06	-2.001204E-07	-9.94773230E-06
c3	-1.0752178E-09	1.036969E-11	1.70276630E-10
c4	-5.9086933E-13	-2.549687E-16	-1.43033468E-15
c5	-1.7256713E-16	3.585153E-21	4.73886084E-21
c6	-2.8131512E-20	5.344285E-26	
c7	-2.3963370E-24	5.099890E-31	
c8	-8.3823321E-29		
Rango de error	0.03 a -0.05°C	0.04 a -0.04°C	0.03 a -0.04°C

Fuente: NIST, ASTN, IEC, ITS-90.

3.6 Sensores de temperatura en circuito integrado

En general los sensores de silicio que se presentan a manera de circuito integrado pueden llegar a ser tan exactos como los RTD o los termistores, pero usualmente se ven limitados a un rango de operación reducido que por lo general está en el orden de los -50°C a $+150^{\circ}\text{C}$, y sufren de problemas de autocalentamiento al igual que cualquier sensor que necesita una corriente para funcionar (Huddleston, 2007). Hoy en día estos dispositivos no suelen ser costosos.

Los sensores integrados se pueden dividir en dos categorías de acuerdo a su señal de salida: voltaje y corriente (Liu et al., 2011). El sensor LM35 (Texas Instrument Incorporated, 2013a), por ejemplo, pertenece a la categoría de salida en voltaje en el rango de -55°C a $+150^{\circ}\text{C}$, y tiene una exactitud de alrededor de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, su máximo consumo de corriente es de $70\mu\text{A}$ y su autocalentamiento afecta la medida en alrededor de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$. Por otro lado, el AD590 (Analog Devices, 2013), es un sensor de temperatura de salida en corriente en el rango de -55°C a $+150^{\circ}\text{C}$.

3.7 Sensores de temperatura infrarrojos

Algunas aplicaciones en medición de temperatura excluyen el uso de un sensor que esté en contacto físico con el material que está siendo monitoreado,

como por ejemplo, sustancias extremadamente calientes -sobre los 2.300°C , límite de las termocuplas- o materiales que se verían gravemente afectados si son tocados como películas delgadas o superficies de secado, etc. En estos casos es necesario medir la radiación infrarroja emitida por el objeto y calcular la correspondiente temperatura, basándose en la energía electromagnética emitida por el objeto.

Según Keränen et al. (2010), la detección infrarroja se basa en el hecho de que la intensidad de la radiación emitida por una superficie depende de su temperatura en una primera aproximación, y de acuerdo a la ley de Boltzmann. La dificultad se encuentra en que el detector, por lo general, cubre un campo de visión que envuelve varias superficies distintas a la que es objeto de medida, y todas ellas se encuentran a diferentes temperaturas, compuestas de materiales de diferentes emisividades, lo que se conoce como efecto Narciso. Debido a esto, los sensores de temperatura infrarrojos tienen un costo varias veces superior al de los sensores discutidos anteriormente.

3.8 Sensores de temperatura basados en fibra óptica

Tanto los RTD como los termopares han llegado a ser los sensores de temperatura "naturales" a la hora de escoger un elemento de medida para dicha labor.

Sin embargo, existen múltiples aplicaciones que son demasiado exigentes para este tipo de sensores y llegan a ser inadecuados debido a sus características constructivas y funcionales. Como respuesta a este hecho, y entre otras varias opciones, los sensores de fibra óptica surgen como una alternativa para realizar la medición de temperatura, ya que ofrecen precisión y fiabilidad en ambientes con alta incidencia de ruido electromagnético, puesto que este tipo de sondas están fabricadas de materiales dieléctricos que no se ven afectados por las radiaciones, microondas y ondas de radiofrecuencia.

El principio de funcionamiento de este tipo de medición se describe en Kyuma, Tai y Nunoshita (1982), quienes desarrollaron el diseño de un instrumento basado en fibra óptica para medida de temperatura, basándose en que la brecha de energía (*bandgap*) de la mayoría de materiales semiconductores decrece casi linealmente cuando la temperatura aumenta cerca de la temperatura ambiente.

Por lo tanto, la longitud de onda correspondiente a su límite de absorción óptica fundamental se desplaza hacia una longitud de onda mayor con la temperatura. De esta manera, cuando se emplea una fuente de luz LED con un espectro de radiación coincidente con la longitud de onda de un semiconductor seleccionado, la intensidad de la luz transmitida a través del semiconductor decrece con la temperatura.

La aplicación de este tipo de sensores es común en el rango de 0°C hasta los 300°C, y son muy fuertes a la hora de mantener su calibración. Estos termómetros reducen el tiempo de diseño y coste por errores de sensores defectuosamente aislados, y se pueden colocar en campos electromagnéticos variables, grandes gradientes de voltajes, líquidos agresivos, a altas temperaturas, etc., sin añadir accesorios adicionales y, en algunos casos, la baja potencia (<1mW) del acceso únicamente óptico proporciona seguridad intrínseca.

Como se puede observar en el trabajo de Ding, Dai y Zhang (2010) quienes aplican este tipo de sensores a la medición de temperatura en equipos de potencia eléctrica de alto voltaje, quienes destacan que en este tipo de sistemas existe una fuerte interferencia electromagnética y se hace necesario el uso de un sensor basado en fibra óptica.

Los sensores de temperatura basados en fibra óptica no necesitan protecciones como barreras Zener, etc., y los materiales de las sondas -encapsulado de teflón, fibra de vidrio, etc.- son muy resistentes a medios químicamente agresivos. Este tipo de sensores están basados en el efecto de absorción/transmisión a través de un cristal semiconductor llamado AsGa (Arseniuro de Galio). A medida que la temperatura del cristal aumenta, el espectro de transmisión del cristal cambia a mayores longitudes de onda. Una fuente de luz blanca inyecta luz en la fibra óptica, viajando hasta el cristal semiconductor donde parte es absorbida. La luz no absorbida es reflejada por el espejo dieléctrico y vuelve hacia el espectrómetro.

En estos, a diferencia de los sensores de temperatura basados en metales, la pequeña masa térmica de la puntas en las sondas de fibra óptica no actúan como un sumidero de temperatura cuando se miden muestras pequeñas, lo cual asegura una percepción más fiable de la evolución de la temperatura.

Gracias a estas características se han desarrollado métodos de detección aplicables a multiplicidad de procesos, tal como lo muestran Gil-Rodríguez, Rodríguez-Sinobas, Benítez-Buelga y Sánchez-Calvo (2013), quienes aplican el método de medición distribuida de temperatura con fibra óptica o DFOT (Distributed Fiber Optic Temperature Measurement, por sus siglas en inglés), que permite medir la temperatura en pequeños intervalos, del orden de centímetros, en distancias del orden de kilómetros.

En este sentido, en los últimos años se han desarrollado nuevas técnicas de medición de temperatura con fibra óptica, como el realizado por Volkov et al. (2012) que presenta una nueva variante de este tipo de sensor, basado en interferometría tándem de baja-coherencia; donde el elemento de medida es una placa plano-paralela de sílice de 500 µm de espesor. Este tipo de elementos de medida logran resoluciones de 0.03°C en el rango lineal y de 0.1°C en los límites, y una reproductibilidad mejor a 0.2°C.

3.9 Sensores de temperatura inteligentes

Según Huddleston (2007) y Swanson (2012), un sensor inteligente es aquel que combina la función de detección y algunas de las funciones de procesamiento de señal y comunicaciones. Debido

a que para realizar estas funciones adicionales se suele adicionar un microprocesador o un microcontrolador, cualquier combinación de un sensor y un microprocesador se puede denominar sensor inteligente. Estos elementos no tienen que estar integrados en un elemento monolítico, pero en conjunto forman un solo sistema que dispone de varios elementos miniaturizados.

Debido a sus características especiales, un sensor inteligente es un sistema inevitablemente más caro que un sensor convencional, pero posee ventajas claras como el fácil mantenimiento y flexibilidad, que lo hacen notablemente más efectivo y que superan claramente la relación costo-beneficio, en comparación a los convencionales. El nivel de complejidad de un sensor inteligente puede ser muy variado, ya que además de la detección o transducción puede incluir acondicionamiento de señal, corrección de cero, ganancia, linealidad, compensación ambiental de temperatura y humedad, escalado y conversión de unidades, comunicación bidireccional digital, autodiagnóstico, autocalibración, decisión o activación sobre el sistema en el que se conecta.

Para cumplir con estos objetivos, el sistema posee, entre otros, variedad de elementos como el sensor primario, un algoritmo de control, memoria, procesador de señales y capacidad de comunicación digital. Los sensores inteligentes cumplen un papel muy importante dentro de los sistemas de medida y control a nivel industrial, pues reducen la carga sobre los controladores lógicos programables (PLC), computadores u otros controladores, además de aumentar la fiabilidad del sistema debido a las características del sensor. Por lo tanto, se puede destacar tres características que la mayoría de diseñadores considera que son obligatorias para un sensor inteligente o *smart sensor*:

- Un elemento sensor, que mide uno o más parámetros físicos, usualmente un sensor tradicional.
- Un elemento computacional, que analiza las medidas hechas por el elemento sensor.
- Una interface de comunicaciones, que permite al dispositivo intercambiar información con otros componentes en sistemas mayores.

Son estos dos últimos elementos los que realmente distinguen a los sensores inteligentes de los sensores comunes, debido a que proveen al sensor la habilidad de convertir los datos directamente en información, para ser usada de manera local o enviarla a otros dispositivos o sistemas.

3.10 Medición de temperatura mediante microcontroladores

En cuanto se refiere a medición de temperatura, existen diversos trabajos que abordan el tema presentando desarrollos importantes en el campo de la instrumentación industrial, donde se hace uso de diferentes clases de sensores, cuya selección depende básicamente del campo de aplicación.

También se introduce el concepto de sensor inteligente que involucra una conversión de la señal analógica que proporciona el sensor a un formato digital, para que posteriormente sea almacenada y manipulada por un procesador digital, que dota al sensor primario de capacidades como la transmisión de datos, autocalibración, filtrado y detección de errores, entre otros.

En cuanto a medición de temperatura con termocupla, los autores Dheenadhayalan, Sakthivel, Arul, Madhusoodanan K. y Mohanakrishnan P. (2010), presentan una comparación de confiabilidad de un sistema de monitoreo de temperatura computarizado con dos y tres termocuplas por sub-ensamblaje para un reactor reproductor -un tipo de reactor nuclear-. Este reactor emplea termocuplas tipo K especialmente recubiertas en vainas, como medida de protección al dispositivo, con el fin de obtener señales de protección para el reactor de varios incidentes como bloqueo parcial del refrigerante, reducción de la velocidad de la bomba principal, transitorios de potencia y cortes de energía, lo cual facilita validaciones del diseño del reactor.

La medición de temperatura con termocuplas es aplicable a diversas áreas, siendo una de ellas el monitoreo de equipos que son susceptibles a calentamiento extremo, como es el caso expuesto por Bin, Xinchao, Shaomin y Jianxu (2011), quienes presentan una investigación sobre aplicación de nodos de medida de temperatura mediante redes

inalámbricas de sensores o WSN (Wireless Sensor Network) basado en el sistema operativo TinyOS² y el chip ZigBee³ para aparellajes eléctricos, es decir, dispositivos usados para controlar la conmutación de líneas de alto voltaje, conocidos como Switchgear Assemblies.

La medición de temperatura con termocupla puede aplicarse de varias maneras, un ejemplo de ello es el trabajo desarrollado por Wobschall y Cherian (2011), quienes desarrollan un sistema sensor con termocupla multicanal miniaturizado. En este proyecto se presenta un módulo de adquisición de datos para 64 termocuplas organizadas en grupos de 8, dispone de 16 canales, posee acondicionamiento de señal con bajo ruido cerca al área de medición y transmite los datos medidos a través de una conexión Ethernet de alta velocidad a un computador central para su correspondiente análisis. Se destaca en este trabajo el uso del estándar IEEE 1451 para sensores inteligentes y el estándar IEEE 1588 para el sello de tiempo -secuencia de caracteres que denotan la hora y fecha de la medición-.

En cuanto a nuevas tecnologías de medición de temperatura con termocuplas, se puede destacar el desarrollo realizado por Schönberg et al. (2013), quienes presentan un sensor de temperatura embebido de superficie de una herramienta para monitoreo del proceso de moldeo por inyección en tiempo real. En dicho trabajo se presentan las mediciones de temperatura en un proceso de producción real, usando una termocupla tipo K, que fue fabricada directamente en la superficie de la herramienta usando un DWTS (Direct Write Thermal Spray).

Las termocuplas poseen la ventaja de ser dispositivos sencillos en su construcción, económicos y permiten medir altas temperaturas, por lo cual han sido elegidos para diversos diseños como elemento de medida de sensores inteligentes.

Un ejemplo de esto es el presentado por Sarma y Boruah (2010), quienes presentan el diseño y desarrollo de un termómetro industrial inteligente basado en una termocupla de alta precisión con linealización y función de registro de datos. Este diseño usa una termocupla tipo K y su señal se

linealiza mediante un polinomio de noveno orden, basado en la información proporcionada por el NIST (National Institute of Standards and Technology), esto con la ayuda de un conversor análogo a digital de 12-bits y un microcontrolador de 8-bits.

Otro campo de acción para la medición de temperatura se encuentra en el sector agrícola, como lo expresan Mahan, Conaty, Neilsen, Payton y Cox (2010), quienes desarrollan un estudio sobre el rendimiento de trabajo en entornos agrícolas de un sistema de control de temperatura inalámbrico basado en un sensor de infrarrojos de bajo costo, ya que la instrumentación a nivel comercial que hace uso de este tipo de tecnología es costosa en relación al sistema que se propone desarrollar.

En cuanto a la medición con sensores inteligentes, existen en la actualidad gran variedad de diseños. Entre ellos se destaca el realizado por Sarma y Boruah (2010), quienes realizan un diseño de un sistema inteligente y de alta precisión para monitoreo y control de temperatura industrial, usando una termocupla tipo K y un sensor de temperatura compatible con SPI (Serial Port Interface). Los errores de linealidad del comportamiento de la termocupla se corrigen mediante el uso de un algoritmo de ajuste polinómicos por mínimos cuadrados. También se emplean elementos digitales para lograr la compensación de unión fría de la termocupla.

El sistema cuenta con un microcontrolador que le da la capacidad de comunicarse con un software de computador, que le permite almacenamiento y procesamiento de los datos de temperatura enviados desde el sensor. El autor concluye que la exactitud obtenida se incrementa dependiendo del rango de temperatura que se esté midiendo, y la inclusión de un conversor análogo a digital y un microcontrolador reducen el tiempo y costo del desarrollo del sistema y potencian sus capacidades.

El estudio concluye que el sistema desarrollado en comparación a otros ampliamente utilizados, reside en que la operación inalámbrica es muy adecuada para aplicaciones en investigación y producción, además, el costo reducido, para un determinado presupuesto, permite el despliegue de un gran número de dispositivos que gozan de la resolución y confiabilidad para usos comunes en monitoreo continuo de temperaturas en plantas.

² Información técnica del fabricante disponible en: <http://www.tinyos.net/>

³ Información técnica del fabricante disponible en: <https://www.zigbee.org/>

El diseño presenta un Sistema de Monitoreo de Temperatura del Núcleo Basado en Computador o CTMS (Computer Based Core Temperature Monitoring System), que consiste en un subsistema basado en electrónica cableada y un subsistema basado en un computador en tiempo real. El sistema se emplea para generar una señal SCRAM (apagado de emergencia del reactor), ya que algunos parámetros de esta señal requieren el procesamiento de cientos de señales provenientes de termocuplas. El sistema CTMS también posee redundancia con el fin de lograr una alta confiabilidad del hardware para los sensores, posee módulos de aislamiento de señal IM (Isolation Module) y de acondicionamiento de señal SCM (Signal Conditioning Module), que adaptan la señal proveniente de la termocupla hacia el sistema de procesamiento digital.

La medición de temperatura con sensores inteligentes se puede aplicar en diversos campos, uno de ellos es el que presentan Wang F., Wang W., Cao y Zhao (2010), quienes proponen un sistema de monitoreo de temperatura para el calentamiento de una red, basado en comunicación con fibra óptica. Este proyecto usa un sensor de temperatura inteligente DS18B20 (Dallas Semiconductor & Maxim, 2009), que provee medidas de temperatura en grados Celsius de 9 y 12 bit, opera en el rango de -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$ con una exactitud de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ sobre el rango de -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$, y toma la alimentación de la línea de comunicación con el microcontrolador o MCU al que se encuentre interconectado, para el envío de datos de temperatura y alarmas programables.

Este tipo de circuitos, poseen un código serial de 64 bits, el cual permite que múltiples dispositivos se puedan conectar al mismo bus, y de esta forma realizar diversas medidas en un determinado ambiente o entorno.

Dichos nodos sensores de temperatura inalámbricos basados en el chip ZigBee y el sistema operativo de código abierto TinyOS, son una solución que proponen los autores para el monitoreo de temperatura, ya que poseen una baja disipación de energía, tamaño reducido, desempeño estable y una larga vida útil. Estos son aplicables a medición de temperatura en línea y monitoreo de equipos de conmutación de alto y bajo voltaje, debido a que el comportamiento anómalo de la temperatura, en

este tipo de equipos, puede ser usada para predecir o identificar fallas potenciales, que de ocurrir afectarían gravemente todo el sistema.

El trabajo de Cheon, Member, Lee J. y Lee I. (2009) sugiere otra aplicación para la medición de temperatura, a través de la creación de un sistema inteligente para detección de incendios. El sensor propuesto mide la densidad del humo basado en el método de dispersión de luz y, posee un sensor de temperatura integrado al sensor de humo, que no solo sirve para medir el calor de un incendio sino también compensar la dependencia de la temperatura del sensor de humo.

El sistema prototipo incluye un detector de temperatura que da mediciones confiables ante el suceso de un incendio, ya que el sensor de humo tiende a generar falsas alarmas, a pesar de tener una respuesta rápida en comparación al sensor de temperatura. Cabe resaltar que en este tipo de circuitos, donde por lo general se usa un sensor de temperatura tipo termistor, la sensibilidad del sistema llega a depender también de la temperatura ambiente, no solo por la influencia que puede recibir el termistor de la temperatura ambiente, sino también por los elementos semiconductores como diodos y fotodiodos.

Otra aplicación para los sensores de temperatura, sensores inteligentes, se presenta en la industria automotriz, como la que se muestra en el trabajo de Szabó, Gontean y Lie (2012), quienes presentan un sistema embebido de monitoreo de temperatura con microcontrolador usado en la industria automovilística, los autores presentan un sistema basado en el chip MC9S12XDP512 (Freescale Semiconductor, 2009) con el fin de crear un sistema capaz de medir temperatura a través de un sensor LM35 (Texas Instrument Incorporated, 2013a) conectado al módulo de conversión análogo a digital del microcontrolador.

En la medición de temperatura con sensores inteligentes existen diversos trabajos, uno de ellos es el presentado por Chen P., Chen T., Wang y Chen C. (2009), quienes presentan un sensor de temperatura en el dominio del tiempo de baja potencia con programación digital de set-point, el cual se basa en el principio de que todo circuito integrado es afectado por extremos de calor y frío, lo cual

expone los componentes internos a condiciones que potencialmente pueden llegar a dañarlo, como por ejemplo, el caso en que se sobrepasan los límites de temperatura de operación.

Este tipo de desarrollo es importante en sistemas como las computadoras personales y dispositivos electrónicos portables, ya que los actuales microprocesadores de alto desempeño le dan la capacidad al vendedor para ofrecer sistemas de desempeños extraordinarios. Sin embargo, la ganancia en desempeño se ve acompañada de un incremento en el consumo de potencia, lo cual resulta en la acumulación de calor dañino en el chasis del computador. Para lograr el monitoreo de temperatura del chip en circuitos VLSI (Very Large Scale Integration), los autores proponen termostato CMOS de baja potencia en el dominio del tiempo basado en retardo de línea.

El diseño propuesto es contrario al basado en el dominio de voltaje de los procesadores actuales, este tipo de circuitos ofrecen un beneficio desde el punto de vista del desempeño, debido a la baja escala del proceso de fabricación. El circuito reemplaza el divisor y comparador de voltaje con el divisor y comparador de línea de retardo de tiempo, con un mínimo consumo de potencia, ya que la medición de temperatura se basa en un retardo de tiempo de la línea que es proporcional a la temperatura y no posee transistores bipolares.

En cuanto a transmisores de temperatura inteligentes, se puede referenciar el diseño propuesto por Hang, Song, Yang y Fan (2009), quienes desarrollan un transmisor de temperatura digital basado en el microconvertidor ADuC824 (Analog Devices Inc, 2002), una termocupla tipo K, una pantalla LCD (Liquid Crystal Display) alfanumérica, una interfaz serial basada en el protocolo RS232 y un sensor de temperatura DS18S20 para compensación de la unión fría.

Asimismo, los autores Shufen y Junli (2009), presentan la implementación de un medidor de temperatura inteligente, que consiste principalmente de un microcontrolador Intel8098 y una termocupla como componente de medición. Este diseño permite la medición de altas temperaturas en los rangos de 0°C a 800°C y 800°C a 1.600°C, esto para elevar la precisión y reducir el error. Este tipo de diseños poseen ventajas, entre las que se destaca: la alta

precisión, bajo costo e implementación de interfaces hombre-máquina.

Los autores Yang, Sun, Ji, Li y Chen (2009) hacen uso del dispositivo DS18B20 (Dallas Semiconductor & Maxim, 2009) para diseñar un monitor de temperatura y humedad basado en sensor inteligente. El trabajo presenta un detector de temperatura y humedad en tiempo real, que posee una resolución de $\pm 0.1^\circ\text{C}$, el hecho de que esté formado por un sensor inteligente le da ventajas como la reducción de la cantidad de componentes necesarios para desarrollar el diseño y el bajo costo en el diseño y desarrollo.

El trabajo de Wen-tian y Jin-ping (2010), muestra el diseño de un sistema de control inteligente de temperatura, basado en el microcontrolador AT89S51 (Atmel Corporation, 2008) y el sensor de temperatura inteligente DS18B20, que usa el protocolo 1-Wire. Este desarrollo se caracteriza por detectar la temperatura y el tiempo en el que se realiza la medida, almacenamiento e impresión de datos. También posee funcionalidades extra, como por ejemplo, sistemas de alarma, almacenamiento de datos en memoria externa, tablero de control y pantalla LCD alfanumérica; comunes en este tipo de sensores. El uso de un microcontrolador en el sistema de medición de temperatura provee ventajas como la interface humana-computador amigable, hardware simple, bajo costo, precisión en la medición de temperatura y versatilidad.

Los autores Sun, Li y Jiang (2011) muestran el diseño y realización de un transmisor de temperatura inteligente, que utiliza como elementos de medida termocuplas y RTD, cuyas señales se convierten de análogo a digital mediante el circuito AD7714 del fabricante Analog Devices, con el fin de asegurar la estabilidad y exactitud del muestreo de la señal.

Este tipo de circuitos se pueden utilizar como sistema de respaldo para transmisores de temperatura de tipo múltiple, debido a que sus parámetros son ajustables y proveen gran estabilidad, el diseño provee la adecuada adquisición de pequeñas señales, provenientes de sensores de temperatura análogos.

Un sensor de temperatura inteligente puede estar dotado de una interfaz de comunicaciones, que le permita enviar los datos sobre las mediciones

que realiza a un sistema remoto o registro, que posteriormente permite realizar su observación y análisis, en este sentido, los autores Hong y Jianxiu (2011), nos muestran el diseño de un receptor inalámbrico de señal de temperatura, que indica la temperatura enviada desde el sistema sensor que se encuentra en un sistema de pulido químico-mecánico.

Los sensores inteligentes son aplicables a diversidad de campos, como lo presentado en el trabajo de Gomes, Ferreira y Ruano (2011), quienes realizan la implementación de un sensor inteligente para medición y predicción de radiación solar y temperatura atmosférica. El objetivo de este estudio fue desarrollar un sensor para adquisición de temperatura, datos de radiación solar y estimar los índices de nubosidad, y usar los valores medidos para predecir la temperatura y la radiación solar en un futuro cercano. En este caso, el sensor de temperatura elegido para el diseño del sistema fue el LM35DZ del fabricante National Semiconductor®, cuya señal se manipula a través de la plataforma hardware-abierto Arduino®.

La interfaz de comunicaciones de un sensor de temperatura inteligente permite que el dispositivo de medición posea la capacidad de interactuar con sistemas de mayor complejidad, que trabajan con elevados volúmenes de información, como es el caso presentado por los autores Chen, Tsai, Kao, Lin H. y Lin C. (2011), quienes realizan un sistema de monitoreo de sensores inteligentes de temperatura, aplicando como caso de estudio un hospital regional en Taiwán.

Este sistema combina las redes de sensores inalámbricos y la tecnología de sistemas de información con el fin de detectar cambios anormales en la temperatura, para enviar de forma inmediata la alerta de emergencia correspondiente, con la finalidad de prevenir resultados anormales provenientes de errores humanos y retardos de tiempo. Este tipo de sistemas también poseen procedimientos de procesamiento de señal e interfaces gráficas de usuario, todo con base a las señales enviadas desde los sensores de temperatura ubicados en cada nodo de la red.

La medición de temperatura mediante sensores inteligentes puede combinarse con sistemas de procesamiento de alto desempeño como bien lo muestra Wang (2012), quien presenta el diseño de

un sistema inteligente de monitoreo de temperatura basado en un DSP (Digital Signal Processor).

Dicho sistema emplea el sensor DS18B20 (Dallas Semiconductor & Maxim, 2009) combinado con un procesador TMS320F2812 (Texas Instrument Incorporated, 2012), que se encarga de gestionar los datos de 8 bits provenientes del sensor de temperatura y le proporciona escalabilidad, simplicidad de configuración, operación, confiabilidad y practicidad al sistema.

El sistema de monitoreo de temperatura puede detectar la temperatura de más de un lugar a la vez y al mismo tiempo controlar el termostato correspondiente, de acuerdo a los valores ajustados de temperatura. El sistema mide la temperatura a través de 8 líneas, y la incorporación del procesador DSP provee al sistema de una estructura simple, una alta exactitud, resistencia a la interferencia y características de escalabilidad.

Otro ejemplo de medición de temperatura mediante sensores inteligentes es el presentado por Kommu y Kanchi (2013), quienes emplean un procesador ARM avanzado de 32-bits LPC2148 (NXP SEMICONDUCTOR, 2011), y un sensor de temperatura LM35 (Texas Instrument Incorporated, 2013a) para medir la temperatura en procesos químicos a nivel industrial. La presencia de este procesador, le da la capacidad de comunicarse a través de un enlace de fibra óptica con un computador remoto.

Sardini y Serpelloni (2012) muestran un circuito inalámbrico de medida para un sensor de temperatura pasivo, que se aplica a la medición de altas temperaturas y no permite el uso de métodos tradicionales de medición, ya que en dicho ambiente el funcionamiento de la electrónica se ve comprometido. Además, si el ambiente donde se debe efectuar la medida es de tipo hermético, la técnica cableada de medida tradicional no puede utilizarse.

Este tipo de sensores de temperatura se componen de un sensor pasivo ubicado en el ambiente abrasivo, y una electrónica dedicada de transmisión que se encuentra fuera, en una zona segura. Este tipo de sistemas son una alternativa a los sensores de temperatura infrarrojos.

Los autores Córdoba y Angel (2010), presentan el diseño y construcción de un transmisor de

temperatura basado en interfaz digital directa, basado en que la interfaz existente entre sensores y microcontroladores en transmisores de temperatura, normalmente requieren de circuitería analógica convencional, y muchas veces de un diseño complejo que incrementa el costo y tamaño, a fin de aportar el acondicionamiento respectivo a las variables de medición. Por la necesidad de simplificar y optimizar esta interfaz el trabajo citado propone el diseño y construcción de un transmisor de temperatura basado en interfaz digital directa con salida analógica para control de proceso y visualización de datos.

Los datos generados de forma aleatoria desde sensores (Pt100 y termistor) de temperatura seleccionables son procesados por una Interfaz Digital Directa y enviados al microprocesador sin necesidad de usar amplificadores, ni filtros, ni convertidores A/D. De esta forma, el circuito se reduce significativamente tanto en diseño como en costo.

Para realizar mediciones de temperatura, en la actualidad se encuentran diversas tecnologías disponibles, como es el caso de Kang et al. (2013), quienes presentan un sensor de temperatura basado en la tecnología SAW-RFID (Surface Acoustic Wave – Radio Frequency Identification), que posee varias ventajas sobre los sensores estándar a disposición en el mercado. El sensor está diseñado para aplicaciones industriales, ya que tiene un rango de medida corto pero de alta exactitud, en sí, lo que por lo general se busca en un sensor.

Dicho sistema tiene un esquema de codificación para el sensor que usa la posición de un pulso, que se combina con la información de fase, y luego la relación entre la longitud de un espacio de tiempo y la decodificación del error se deduce para asegurar la identificación exacta del sensor, aunque la temperatura ambiente fluctúe. Para resolver el problema de la fase relacionado con las medidas de temperatura y reducir el costo de obtener las curvas características de temperatura en el proceso de calibración, los autores proponen usar un procedimiento analítico para calcular la variación de las diferencias del retardo de fase con respecto a la temperatura. Dicho esquema alcanza una exactitud de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ en el rango de temperatura de 0-40°C.

Los sensores de temperatura inalámbricos son una combinación de un sensor convencional o digital, y un sistema que le permite enviar los datos sobre las mediciones que realiza de manera inalámbrica hacia una estación o sistema receptor, que por lo general, es capaz de almacenarlos, procesarlos, guardarlos y tomar acciones de control, entre otras, con la información suministrada. La medición de la variable temperatura no puede ser ajena a este tipo de sistemas, un ejemplo válido, es el desarrollado por Jiménez, F. y Jiménez, A. (2012), quienes desarrollan una investigación sobre el monitoreo de variables de campo en tiempo real para aplicaciones en agricultura de precisión.

Los autores presentan un sistema capaz de medir las variables de humedad del suelo, temperatura y posicionamiento (GPS), adquirirlas remotamente en un computador para posteriormente graficar las variaciones de estos parámetros y, visualizar en pantalla el movimiento del operario que está haciendo el recorrido en campo. El sistema se compone de un sensor de temperatura LM35 (Texas Instrument Incorporated, 2013a), que entrega una salida lineal de 10mV/°C a través de un amplificador operacional al módulo de conversión analógica a digital de un DSPIC30F4013 (Microchip Technology Inc., 2010), que se encarga de acondicionar la información de las variables en campo para transmitir las, y además, recibir órdenes desde una estación base.

Sardini y Serpelloni (2011) desarrollan un sensor inalámbrico auto-energizado para medición de temperatura y velocidad del aire con capacidad de recolección de energía. Los autores de este trabajo, proponen que las medidas de velocidad y temperatura del aire son parámetros importantes en diversas aplicaciones.

Un sensor auto-energizado mediante un sistema de generación electromecánico que obtiene energía del movimiento de una hélice dentro de un ducto, transmite periódicamente la medida de las variables de temperatura y velocidad del aire. Para la medición de temperatura el sistema usa un sensor comercial de baja potencia LM94022 (Texas Instrument Incorporated, 2013b), este es un sensor integrado con tecnología CMOS de salida analógica que opera con un voltaje de 1.5V, posee

una ganancia ajustable gracias a la cual se puede obtener una compensación entre sensibilidad y consumo de potencia.

La medición de temperatura a través de sistemas digitales también se aplica a la medición con dispositivos basados en fibra óptica, como se puede constatar en el trabajo de Krisch, Fernandes, Gossner, Lau y Tournillon (2012) quienes muestran un sensor de fibra óptica de baja potencia para altas temperaturas -sobre los 750°C- combinado con electrónica analógica y DSP, que se utilizan para procesamiento de la señal, de manera que se pueda desempeñar bajo condiciones de ambientes industriales como: alto rango de temperatura, dinámica de alta presión, resistencia a la corrosión química, rango de medida amplio, alta sensibilidad, inmunidad a la vibración y baja potencia de operación.

Los autores Liu et al. (2013) y Sonnevile et al. (2014), también desarrollan métodos de medición de temperatura basados en fibra óptica, utilizando para ello métodos e instrumentos de última tecnología como interferómetros tipo Mach-Zehnder (MZI) y efectos de dispersión Brillouin, que permiten relacionar las variaciones de una onda de luz con cambios de temperatura.

4. Discusión

Luego de desarrollar una revisión sobre la medición de temperatura a través de sensores inteligentes se puede establecer que la temperatura es una de las variables de mayor incidencia dentro de diferentes procesos a nivel industrial, comercial e investigativo, debido a que su comportamiento incide de manera significativa en el desarrollo de diferentes procesos, y en otros casos, sus variaciones determinan el comportamiento y desarrollo de un sistema en particular.

Es por ello, que se hace necesario cuantificar su comportamiento de la manera más precisa, posible, y en esta búsqueda, se han desarrollado múltiples sistemas que permiten realizar una medición de la temperatura presente en un proceso de manera confiable.

En este sentido, la revisión realizada en el presente trabajo muestra que existen diversos tipos de sensores que se han desarrollado y empleado

para realizar esta medición tan importante, pero la elección de uno u otro diseño depende primordialmente de dos factores muy importantes: el rango de temperatura a medir y el ambiente en donde se va a desarrollar la medición.

El rango de temperatura es un factor determinante en el momento de elegir el tipo de sensor, por ejemplo, entre los 0°C hasta unos 125°C, la mayoría de sensores disponibles en el mercado son aptos para realizar la medición, y la elección pasa a depender del tipo de atmosfera en la que se va a desarrollar: aire libre, ambiente oxidante, recintos cerrados, expuesto a condiciones medio ambientales extremas, etc.

A medida que el rango de temperatura sube, como en procesos químicos o de fundición de metales, la elección del elemento de medida se limita a unos pocos diseños, entre los que destacan a los termopares o termocuplas, los sensores infrarrojos, las cámaras termográficas y los dispositivos diseñados específicamente para aplicaciones especiales, como la mostrada por Sardini y Serpelloni (2012).

Entre los sensores de temperatura más ampliamente difundidos se destacan los termopares, termistores y RTD. Sin embargo, en la actualidad los sensores de fibra óptica, aunque más especializados, están creciendo en popularidad para las medidas de temperatura.

Los termopares se han convertido en los sensores de temperatura más populares, ya que son efectivos en aplicaciones que requieren un gran rango de temperatura, y han llegado a ser bastante económicos (\$1 a \$50 USD); por otro lado, tienen un tiempo de respuesta que se puede dar hasta en fracciones de segundo. No obstante, debido a las propiedades de los materiales de los que se fabrican y otros factores, logra una exactitud de menos de 1°C en la medición, puede llegar a ser difícil debido a que se necesitan etapas que garanticen la amplificación de la señal, el filtrado y la compensación de la unión fría.

Por otra parte, los RTD son casi tan populares como las termocuplas y son capaces de mantener una lectura de temperatura estable por años; pero a diferencia de los anteriores, éstos tienen

un rango de temperatura menor (-200 to 500 °C), requieren alimentación de corriente y tienen un tiempo de respuesta más lento (2.5 a 10s). Por ello, los RTD han llegado a usarse principalmente para realizar medidas de temperaturas exactas ($\pm 1.9\%$) y sobretodo en aplicaciones donde el tiempo no es un factor crítico. Otra opción para realizar la medición son los termistores.

Estos tienen un rango de temperatura menor (-90 a 130°C) a los dos mencionados anteriormente, pero en comparación, gozan de una mejor exactitud ($\pm 0.05^\circ\text{C}$). Su principal debilidad está en que son más frágiles que los termopares o los RTD, e involucran alimentación de voltaje.

Otra alternativa para realizar la medición de temperatura es emplear la tecnología basada en fibra óptica. Los sensores de temperatura de fibra óptica han demostrado ser efectivos para entornos peligrosos o donde puede existir interferencia electromagnética regular, debido a que son no conductivos, pasivos eléctricamente e inmunes al ruido inducido por interferencia electromagnética (EMI), y son capaces de transmitir datos a largas distancias con baja atenuación o pérdida de la integridad de la señal.

Todos los dispositivos vistos anteriormente, ha sido potenciados en capacidades debido al desarrollo de la medición con sensores inteligentes, aspecto que se ha convertido en una alternativa por la que muchos diseñadores suelen optar para sus desarrollos, debido a que la presencia de un microcontrolador o microprocesador le da la capacidad al elemento de medida de almacenar, manipular y transmitir gran cantidad de datos hacia un ordenador o base de datos, que permite su posterior análisis y recuperación.

La combinación de un sistema digital con los elementos de medida permite obtener sensores de variadas características como identificación, calibración, comprobación, entrega de señal digital, linealización, calibración y compatibilidad con otros dispositivos, a través de puertos de comunicaciones. El desarrollo de este tipo de dispositivos ha permitido aumentar la eficiencia, calidad y velocidad de los procesos industriales, la investigación y el desarrollo científico.

Los futuros desarrollos de la investigación sobre sensores inteligentes tienden a concentrarse en el procesamiento digital de la señal mediante los DSP (procesador digitales de señal), los dsPIC (controlador de interfaz de periféricos con procesamiento digital de señales) y los microcontroladores de 32 bits, que involucren la compensación de temperatura, la normalización, la linealización y la compensación de los hilos.

Otro polo de desarrollo se concentra sin duda en el procesamiento digital, con acciones que permiten la direccionalidad del sensor, la comunicación remota y el almacenamiento de datos. Finalmente, se espera desarrollos tendientes a mejoras sobre la fabricación y reducción de los costos.

5. Conclusiones

En cuanto a medición de temperatura mediante sensores inteligentes basados en microcontrolador, se encuentran en la literatura diversidad de referencias que muestran claramente una tendencia a desarrollar sistemas que son capaces de medir esta variable de la manera más exacta posible, debido a que su variación llega a afectar el desempeño de los sistemas físicos, mecánicos, electrónicos, químicos, etc., y analizar su influencia en ellos, depende de la obtención efectiva de los datos para su posterior almacenamiento y procesamiento.

Los sistemas actualmente desarrollados con el fin de realizar mediciones de temperatura confiables, tienden a orientar los avances alrededor de sensores inteligentes, que le brindan al elemento de medida capacidades de conversión análoga a digital, almacenamiento de datos, detección y corrección automática de errores, auto-calibración, procesamiento digital de la señal y disponibilidad de canales de comunicación con medios externos. Características que hoy en día se encuentran disponibles al diseñador gracias a la aparición de los microcontroladores y microprocesadores de bajo costo; circuitos digitales con capacidades cada vez de mayor complejidad, que permiten mejorar los prototipos vía software, sin necesidad de hacer grandes cambios en el hardware, como implementar nuevas funcionalidades o incrementar la eficiencia del dispositivo.

A futuro, se espera que la instrumentación desarrollada para la medición de temperatura haga uso de los avances en electrónica digital, con el fin de obtener sistemas que proporcionen funcionalidades específicas a los sensores, de manera que estos se adapten específicamente al ambiente o aplicación para el que son diseñados, que se incluyan mejoras en la interfaz de comunicaciones y el proceso de fabricación, obteniendo sensores inteligentes específicos, no solo dentro de determinados rangos de temperatura sino también para condiciones de trabajo específicas: dentro de procesos de fabricación a niveles industriales, embebidas en las herramientas mismas para medir temperatura al mismo tiempo que trabajan, para soportar ambientes con condiciones extremas de temperatura, presión, tensión, corrosión, etc., que permitan al diseñador obtener aplicaciones cada vez más especializadas.

Finalmente, tras la revisión bibliográfica, salta a la vista una línea susceptible de investigación y desarrollo de sistemas de instrumentación, que es aquella que está basada en microcontroladores dsPIC, que poseen un procesador digital de señales y un conversor análogo a digital de gran resolución, entre otras funcionalidades, las cuales permiten manipular digitalmente señales analógicas del mundo real, como lo es en este caso, la medición de temperatura. Esto le permite trabajar sobre las señales de temperatura en tiempo real, ya que dispone de potentes funciones de procesamiento matemático como la transformada rápida de Fourier y filtros digitales FIR e IIR, que pueden ser aplicables a los sistemas de medición de temperatura.

Referencias

- Analog Devices. (2013). AD590. 2-Terminal IC Temperature Transducer. U.S.A., orwood, MA. Retrieved from http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD590.pdf
- Analog Devices Inc. (2002). ADuC824. Microconverter Dual Channel 16/24-bit ADCs with embedded flash MCU.
- Atmel Corporation. (2008). AT89S518-bit MICROCONTROLLER.
- Bin, C., Xinchao, J., Shaomin, Y. & Jianxu, Y. (2011). Applications Research on Temperature WSN Nodes in Switchgear Assemblies Based on TinyOS and ZigBee. *IEEE*, 535-538.
- Bolton, W. (2013). *Mecatronica: sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Un enfoque multidisciplinario* (5ta. ed.). Mexico: Alfaomega.
- Boris, B., Hocenski, Z. & Cvitas, L. (2006). Optimal Approximation Parameters of Temperature Sensor Transfer Characteristic for Implementation in Low Cost Microcontroller Systems. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2784-2787. doi:10.1109/ISIE.2006.296055
- Chen, P., Chen, T., Wang, Y. & Chen, C. (2009). A Time-Domain Sub-Micro Watt Temperature Sensor With Digital Set-Point Programming. *IEEE Sensors Journal*, 9(12), 1639-1646. doi:10.1109/JSEN.2009.2029035
- Chen, P., Tsai, S., Kao, S., Lin, H. & Lin, C. (2011). Intelligent wireless sensor temperature monitoring system — A case study of regional hospital in Taiwan. *2011 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 477-482. doi:10.1109/ICMLC.2011.6016778
- Cheon, J., Member, S., Lee, J. & Lee, I. (2009). A Single-Chip CMOS Smoke and Temperature Sensor for an Intelligent Fire Detector. *IEEE Sensors Journal*, 9(8), 914-921.
- Córdoba, A. y Angel, C. (2010). Diseño y Construcción de un Transmisor de Temperatura Basado en Interfaz Digital Directa. *8 LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology 2010. "Innovation and Development for the Americas"*, 1-9.
- Creus, A. (2009). *Instrumentos industriales. Su ajuste y calibración*. Alfaomega.
- _____. (2011). *Instrumentacion industrial*. Alfaomega.
- Dallas Semiconductor & Maxim. (2009). DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. Retrieved from http://neutrino.phys.ksu.edu/~gahs/doublechooz/DC_SlowMRS/DS/DS18B20.pdf
- Dheenadhayalan, R., Sakthivel, M., Arul, A., Madhusoodanan, K., & Mohanakrishnan, P. (2010). Reliability comparison of computer based core temperature monitoring system with two and three thermocouples per sub-assembly for Fast Breeder Reactors. *2010 2nd International Conference on Reliability, Safety and Hazard - Risk-Based Technologies and Physics-of-Failure Methods (ICRESH)*, 455-461. doi:10.1109/ICRESH.2010.5779593
- Ding, Y., Dai, X. & Zhang, T. (2010). Low-Cost Fiber-Optic Temperature Measurement System for High-Voltage Electrical Power Equipment. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(4), 923-933. doi:10.1109/TIM.2009.2030930

- Fisher, D. & Kebede, H. (2010). A low-cost microcontroller-based system to monitor crop temperature and water status. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(1), 168-173. doi:10.1016/j.compag.2010.07.006
- Freescale Semiconductor. (2009). MC9S12XDP512 Microcontroller Data Sheet. Retrieved from http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data_sheet/MC9S12XDP512RMV2.pdf
- Gil-Rodríguez, M., Rodríguez-Sinobas, L., Benítez-Buelga, J. & Sánchez-Calvo, R. (2013). Application of active heat pulse method with fiber optic temperature sensing for estimation of wetting bulbs and water distribution in drip emitters. *Agricultural Water Management*, 120, 72-78. doi:10.1016/j.agwat.2012.10.012
- Gomes, J. Ferreira, P. & Ruano, A. (2011). Implementation of an intelligent sensor for measurement and prediction of solar radiation and atmospheric temperature. *2011 IEEE 7th International Symposium on Intelligent Signal Processing*, 1-6. doi:10.1109/WISP.2011.6051713
- Gómez, J., Reyes, R. & Guzman, D. (2008). *Temas especiales de instrumentación y control*. Cuba: Editorial Felix Varela.
- Hang, H., Song, J., Yang, F. & Fan, X. (2009). Design of Smart Temperature Transmitter. *ICROS-SICE International Joint Conference*, 8, 1575-1579.
- Hong, G. & Jianxiu, S. (2011). Design Of The Temperature Signal Wireless Receiver And Display System On Polishing Interface In Chemical Mechanical Polishing. *Procedia Engineering*, 24, 417-421. doi:10.1016/j.proeng.2011.11.2668
- Huddleston, C. (2007). *Intelligent sensor design using the microchip dsPIC*. (Newnes, Ed.) (p. 303). Burlington, USA: Elsevier. Retrieved from http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=YYdZJrU09gIC&oi=fnd&pg=PP2&dq=Intelligent+sensor+design+using+the+microchip+dsPIC&ots=_PzKP1685V&sig=EJCUOPOBg_VILAA0pE22QltTNXw
- Hung, P., McLoone, S., Irwin, G. & Kee, R. (2008). Sliding window two-thermocouple sensor characterization for variable flow environments. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 30(5), 349-370. doi:10.1177/0142331208095379
- Jiménez, F. & Jiménez, A. (2012). Field Variables Monitoring in real time (GPS, soil moisture, temperature) with Precision Farming Applications. *EATIS'12 Conference Proceedings*, 89-93.
- Kang, A., Zhang, C., Ji, X., Han, T., Li, R. & Li, X. (2013). SAW-RFID enabled temperature sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 201, 105-113. doi:10.1016/j.sna.2013.06.016
- Keränen, K., Mäkinen, J., Korhonen, P., Juntunen, E., Heikkinen, V., & Mäkelä, J. (2010). Infrared temperature sensor system for mobile devices. *Sensors and Actuators A: Physical*, 158(1), 161-167. doi:10.1016/j.sna.2009.12.023
- Kochan, O., Kochan, R., Bojko, O. & Chyrka, M. (2007). *Temperature Measurement System Based on Thermocouple with Controlled Temperature Field*. IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications.
- Kommu, A. & Kanchi, R. (2013). ARM based temperature measurement and processing to remote computer using fiber optic cable. *International Conference on Communication and Signal Processing*, 423-427. doi:10.1109/icccsp.2013.6577088
- Krisch, H., Fernandes, N., Gossner, K., Lau, M. & Tournillon, S. (2012). High-Temperature Fiber-Optic Sensor for Low-Power Measurement of Wide Dynamic Strain Using Interferometric Techniques and Analog/DSP Methods. *IEEE Sensors Journal*, 12(1), 33-38. doi:10.1109/JSEN.2011.2112643
- Kyuma, K., Tai, S. & Nunoshita, M. (1982). Fiber-Optic Instrument for Temperature Measurement. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 18(4), 676 - 679.
- Liu, J., Ma, L. & Yang, J. (2011). Methods and Techniques of Temperature Measurement. *IEEE*, 5332-5334.
- Liu, Y., Peng, W., Liang, Y., Zhang, X., Zhou, X. & Pan, L. (2013). Fiber-optic Mach-Zehnder interferometric sensor for high-sensitivity high temperature measurement. *Optics Communications*, 300, 194-198. doi:10.1016/j.optcom.2013.02.054
- Machin, G. (2012). Step change improvements in high-temperature thermocouple thermometry. *UKACC International Conference on Control 2012*, (September), 3-5.
- Mahan, J., Conaty, W., Neilsen, J., Payton, P., & Cox, S. (2010). Field performance in agricultural settings of a wireless temperature monitoring system based on a low-cost infrared sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71(2), 176-181. doi:10.1016/j.compag.2010.01.005
- Microchip Technology Inc. (2010). dsPIC30F4014/4013 Data Sheet. High-Performance, 16-bit Digital Signal Controllers. Retrieved from <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70138G.pdf>
- Neaca, M. & Neaca, A. (2012). High temperatures measurement in industrial equipment. *International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, 1-6. doi:10.1109/ICATE.2012.6403446

- NXP SEMICONDUCTOR. (2011). LPC2141/42/44/46/48 Single-chip 16-bit/32-bit microcontrollers.
- Preston-Thomas, H. (1990). *Temperature Scale of 1990 The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)*, 107, 186–194.
- _____. (1993). *ITS-90 Thermocouple Direct and Inverse Polynomials*, 196–199.
- Reyes, F., Cid, J. & Vargas, E. (2013). *Mecatronica: control y automatizacion*. Alfaomega.
- Sardini, E. & Serpelloni, M. (2011). Self-Powered Wireless Sensor for Air Temperature and Velocity Measurements With Energy Harvesting Capability. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(5), 1838–1844. doi:10.1109/TIM.2010.2089090
- _____. (2012). Temperature Sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61(9), 2354–2361.
- Sarma, U. & Boruah, P. (2010). Design and development of a high precision thermocouple based smart industrial thermometer with on line linearisation and data logging feature. *Measurement*, 43(10), 1589–1594. doi:10.1016/j.measurement.2010.09.003
- Sarma, U., Chakraborty, D. & Boruah, P. (2009). Sensors & Transducers Design of a Smart and High Precision Industrial Temperature Measurement and Monitoring System Using K-type Thermocouple and SPI-compatible Temperature Sensor. *Sensors & Transducers Journal*, 102(3), 1–9.
- Schönberg, T., Ruusuvoori, K., Christensen, B., Boivie, K., Berild, J., Ronkainen, H. & Gellein, L. (2013). Surface Embedded Temperature Sensor On Tool Part For Real Time Injection Moulding Process Monitoring. *IEEE*, 116–119. doi:10.1109/Transducers.2013.6626715
- Shufen, L. & Junli, L. (2009). Research implementation of intelligent temperature thermometer. *IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 3, 1263–1265. doi:10.1109/IPEMC.2009.5157579
- Sonneville, C., Degioanni, S., Martinet, C., De Ligny, D., Martinez, V., Jurdyc, A., Vouagner, D. (2014). Pressure-independent Brillouin Fiber Optic Sensors for temperature measurements. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 8–11. doi:10.1016/j.jnoncrsol.2014.01.029
- Sun, H., Li, Y. & Jiang, F. (2011). Design and realization of the intelligent temperature transmitter. *2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC)*, 388–391. doi:10.1109/MEC.2011.6025482
- Swanson, D. (2012). *Signal Processing for Intelligent Sensor Systems with MATLAB* (2da. ed.). New York, USA: CRC Press. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:signal+procesing+for+intelligent+sensor+systems+with+matlab#0>
- Szabó, R., Gontean, A. & Lie, I. (2012). Embedded temperature monitoring system with a Microcontroller Used in the Automotive Industry. *20th Telecommunications Forum TELFOR*, 1012–1015.
- Texas Instrument Incorporated. (2012). TMS320F/C2810/11/12 DATA MANUAL.
- _____. (2013a). LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. United States of America, Dallas, Texas. Retrieved from <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
- _____. (2013b). LM94022. 1.5V, SC70, Multigain Analog Temperature Sensor With Class Ab Output.
- Villalobos, O., Rico, G., Ortiz, R. & Eli, F. (2006). *Medicion y control de procesos industriales*. Mexico: Instituto Politécnico Nacional.
- Volkov, P., Goryunov, A., Luk'yanov, A., Tertyshnik, A., Baidakova, N. & Luk'yanov, I. (2012). Fiber-optic temperature sensor based on low-coherence interferometry without scanning. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 124(15), 1982–1985. doi:10.1016/j.ijleo.2012.06.043
- Wang, J. (2012). Design Intelligent Temperature Monitoring System Based on DSP. *4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, 234–237. doi:10.1109/IHMSC.2012.152
- Wang, F., Wang, W., Cao, R. & Zhao, X. (2010). Temperature Monitor System of Heating Network Based on Optical Fiber Communication. *IEEE*, 4–7.
- Wen-tian, H., & Jin-ping, L. (2010). Research and Design of Intelligent Temperature Control System. *Second International Workshop on Education Technology and Computer Science*, 538–541. doi:10.1109/ETCS.2010.17
- Wobschall, D. & Cherian, A. (2011). Miniaturized multi-channel thermocouple sensor system. *IEEE Sensors Applications Symposium*, 188–192. doi:10.1109/SAS.2011.5739804
- Yang, J., Sun, R., Ji, N., Li, L. & Chen, Z. (2009). The Portable Temperature and Humidity Monitor Based on Intelligent Sensor. *First International Conference on Information Science and Engineering*, 5245–5247. doi:10.1109/ICISE.2009.1241