

Consideraciones de la Temperatura Superficial

“El concepto de la temperatura se deriva de la idea de medir si un cuerpo está relativamente más frío o caliente al compararlo con otro cuerpo, esto media vez no este ocurriendo un cambio de estado.”

A los ingenieros les enseñan usualmente los métodos de transferencia de calor básicos, muchas veces asumiendo que la temperatura superficial es la que guía la transferencia de calor como una variable independiente. En la realidad, la temperatura superficial es el resultado de varios métodos de transferencia y es una variable dependiente. Consecuentemente, los termógrafos tienen dificultades para convencer a los ingenieros de lo que implican los resultados de la medición de temperatura superficial al tomar una imagen térmica en un instante definido en el tiempo. Dicha temperatura es dependiente a la variación debido a factores como la conducción, capacitancia térmica, convección y radiación. El siguiente artículo provee una visión general de la temperatura superficial y la relación con la temperatura interna y los factores externos.

¿Qué es exactamente la Temperatura?

La temperatura es una de las variables más frecuentemente medidas en el mundo actual, aunque es una de las menos entendidas al ser comparada con otras variables como también frecuentemente medidas como: la distancia, el tiempo o la masa. Muchos piensan que la temperatura es la medida de la energía calórica, si lo anterior fuera cierto daría como resultado que una libra de hierro a 100°F tiene la misma energía que 100 libras de hierro a 100°F, y a su vez que una libra de espuma de poliestireno a 100°F tendría la misma energía calórica que todo lo anterior, lo cual no es cierto. Es más, si observamos la definición de temperatura en un diccionario veremos que es muy abstracta. A continuación se muestra un ejemplo:

“La temperatura, en la física, es la propiedad de un sistema que determina si un cuerpo está en equilibrio térmico (vea Termodinámica). El concepto de la temperatura se deriva de la idea de medir si un cuerpo está relativamente más frío o caliente al compararlo con otro cuerpo, esto media vez no este ocurriendo un cambio de estado”.

Los libros de física serán muy precisos para definir la temperatura a niveles microscópicos, “como por ejemplo la temperatura relacionada con la energía cinética de las moléculas”. Sin embargo, esta definición no es muy útil a los termógrafos para utilizarla como concepto o en la práctica. El equilibrio térmico tiene bastante que ver con la temperatura y es a su vez la diferencia de temperatura la que afecta de manera directa la transferencia de calor. Esto implica, que cuando no existe una diferencia de temperatura entre dos cuerpos no hay una transferencia de calor neta. Para comprobar que dos cuerpos tienen diferentes temperaturas no se necesita que estén cerca o en contacto, simplemente necesitamos un tercer objeto que este en equilibrio con ellos, en este caso un termómetro.

Fundamentalmente existen dos tipos de mediciones de temperatura que se pueden realizar, por inmersión y de superficie. La inmersión implica que el dispositivo de medición se sumerge en el objeto a ser medido, lo que implica que existirá una transferencia de

Antes de hablar más profundamente de la temperatura superficial, debemos pensar que la energía que guía o genera la transferencia de calor se encuentra en la parte interna de los objetos y se transfiere hacia la superficie.

calor entre el objeto y el termómetro. Un ejemplo de inmersión es tomar la temperatura a un pavo que ha sido cocinado, en este caso la carne del pavo y el termómetro llegan a un equilibrio debido a la conducción entre ambos cuerpos. Otro ejemplo de inmersión sería la medición de la temperatura ambiental del aire, donde se puede indicar que el termómetro está inmerso en el aire y alcanza un equilibrio por convección con el aire del ambiente.

La idea fundamental de cualquier instrumento de medición es que éste no debe influenciar el parámetro que está midiendo. Debido a que la medición de temperatura en realidad está en equilibrio entre el medidor y el cuerpo medido, esencialmente es pequeña la transferencia de temperatura entre ambos por lo que no existe una influencia cuando se utiliza el dispositivo correcto. Si por ejemplo, se toma una taza de agua hirviendo a 100°C y se coloca un termómetro grande (usado para medir la temperatura de la carne) dentro de la taza, la temperatura medida no será exacta debido a que el termómetro ha influenciado la temperatura del agua en la taza. En general, para realizar mediciones precisas de temperatura el área de contacto debe ser pequeña y la capacitancia térmica del termómetro debe ser mucho menor a la del objeto medido.

Antes de hablar más profundamente de la temperatura superficial, debemos pensar que la energía que guía o genera la transferencia de calor se encuentra en la parte interna de los objetos y se transfiere hacia la superficie. Para simplificar la discusión hablaremos de objetos térmicos que generan energía calorífica interna, la cual será mayor a la que la energía que los rodea, por lo que pierden energía con su entorno. Existen fundamentalmente tres tipos de generadores térmicos internos: generadores constantes de temperatura, generadores constantes de potencia y fuentes finitas de energía. Los principios de transferencia de todos los anteriores pueden ser complicado de entender en función del tiempo.

Generador constante de Potencia

Este es el que genera una energía interna a un ritmo constante, es decir una potencia constante independientemente de las condiciones que lo rodean. Por ejemplo un problema de contacto o conexión eléctrica es generalmente considerado como un generador constante de potencia, pues mientras la corriente fluya a través de dicha falla y su resistencia permanezca constante la potencia será constante. El flujo de calor transferido a la superficie exterior por conducción será constante, con este tipo de generadores la temperatura superficial se verá grandemente afectada por las condiciones externas y ambientales.

Generador constante de Temperatura

Estos tratarán de mantener una temperatura interna constante, independientemente del entorno que los rodea, variando la cantidad de potencia. Las temperaturas superficiales responderán al entorno externo que lo rodea, pero no tan dramáticamente como en el caso de un generador constante de potencia. Un horno industrial con pérdidas de calor actuará como un generador constante de temperatura, ya que el termostato interno tratará de mantener una temperatura interna constante. Muchos procesos y equipos mecánicos con controladores de temperatura actúan como generadores constantes de temperatura. El calor que se transfiere al exterior de los objetos por conducción es variable y será determinado por la conducción térmica del material, también la capacitancia térmica del material determinará la respuesta en el tiempo.

Mediciones de temperatura superficiales repetibles son únicamente posibles si se entiende la termodinámica y la transferencia de calor desde y hacia la superficie al momento de realizar la medición.

Fuentes de energía finitas

Estas son aquellas que han estado “cargadas” a una temperatura específica con una cantidad finita de energía. Cuando la temperatura interna es mayor a la temperatura que la rodea, la cantidad de energía transferida variará a medida que se alcanza el equilibrio térmico. En este caso la capacitancia térmica del material juega un papel importante, el ritmo de transferencia de calor en este caso es guiado por el ambiente que lo rodea. Ejemplos de este tipo de fuentes son los motores que han sido apagados recientemente y están enfriándose, también las inspecciones en techos con aislamientos mojados. En este último caso el Sol “carga” con energía la capacitancia térmica del aislamiento térmico (insulación) húmedo durante el día, la cual contiene una cantidad finita de energía. Luego del atardecer los termógrafos buscarán por áreas más calientes causadas por que entre mayor sea la capacitancia térmica la superficie se enfrían más lentamente. La temperatura superficial de una fuente finita de energía será altamente sensitiva a la convección y radiación del ambiente, aun más que las fuentes constantes de potencia. Lo anterior se debe a que su temperatura interna se va reduciendo ya que únicamente cuenta con una cantidad finita de energía calorífica. Todo lo anterior da como resultado que siempre el ritmo de transferencia y la temperatura superficial disminuyan.

Si por ejemplo hablamos del cuerpo humano, éste trata de ser un generador constante de temperatura, trata de mantener una temperatura interna constante y varía la cantidad de energía para lograrlo. Con este tipo de generador la temperatura superficial es muy poco afectada por las condiciones ambientales que lo rodean en comparación a un generador constante de potencia. (Esto hasta que la hipotermia sucede, donde el cuerpo deja de calentar las extremidades para proteger órganos internos).

¿Qué es la Temperatura Superficial?

La temperatura superficial es mucho más compleja que la temperatura interna del objeto o la temperatura del entorno (ambiente) que lo rodea. Mediciones de temperatura superficiales repetibles son únicamente posibles si se entiende la termodinámica y la transferencia de calor desde y hacia la superficie al momento de realizar la medición.

Para empezar se debe conocer qué tipo de generador es el que se está inspeccionando, luego se debe entender el ambiente que rodea la superficie. Tanto el calor interno (generador o fuente) y el ambiente que lo rodean los que guían la transferencia de calor a través de la superficie, lo que variará la temperatura superficial.

La superficie usualmente interactúa con un fluido adyacente (que en la mayoría de los casos es el aire), pero también interactúa con su entorno irradiándolo. Por último, la superficie interactúa con el medio que lo rodea por medio de la conducción. De acuerdo a la ley de la conservación de la energía, en una superficie (donde ningún otro trabajo se está realizando) debe existir un balance de energía. Lo anterior se puede definir simplemente diciendo que la suma de la energía que se conduce (Q_c), más la energía que se transfiere por convección (Q_{cv}), más la energía que se irradia (Q_r) debe ser igual a cero. Donde las energías transferidas pueden ser positivas o negativas.

$$Q_c + Q_{cv} + Q_r = 0$$

Al analizar los modos de transferencia de calor, podemos observar que la transferencia por radiación ocurre a la velocidad de la luz, la transferencia por conducción sucede

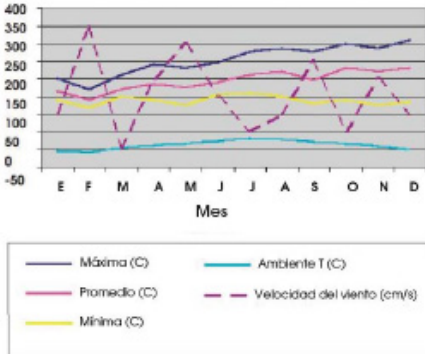


Figura 1

a menor velocidad que la de la luz y la transferencia por conducción ocurre aun más despacio que los dos anteriores. Note que es muy interesante que en esta ecuación no aparece la temperatura. En el caso de la radiación, la energía irradiada es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura superficial y la emisividad. En una falla eléctrica la energía que alcanza la superficie debido a la conducción desde el interior de la misma (operando a una corriente fija), puede variar dependiendo de las condiciones de viento. Por ejemplo la temperatura de una falla eléctrica con un aumento real de temperatura de 100°F al ser medida cuando el viento alcanza 25 km/h puede ver reducido el aumento de su temperatura en aproximadamente 2/3, por lo cual la medición actual sería únicamente de 33°F.

La anterior guía no es exacta y no se aplica para algunos materiales, por ejemplo si tienen baja emisividad o si los objetos que están localizados a distancias lejanas. Si la potencia generada por la falla no cambia entonces la conducción no cambiará.

Si hablamos de generadores constantes de temperatura, el efecto convectivo no es tan dramático por dos razones. Primero la transferencia de calor por radiación predomina sobre la transferencia por convección en hornos industriales. Segundo mientras aumenta la transferencia de calor por convección, el balance se alcanza inmediatamente al tener menos convección, causando la temperatura de la superficie caiga. No caerá tan dramáticamente pues la radiación de la energía depende de la cuarta potencia de la temperatura.

La Figura 1 muestra la estadística de la temperatura medida en un horno una vez al mes en el transcurso de un año (Temperatura máxima, mínima y promedio). Para entender las fluctuaciones de las temperaturas de la superficie se ha graficado también la velocidad del viento en la misma gráfica. El eje vertical (Y) tiene una escala que representa la temperatura en grados Celsius por medio de una línea sólida, la velocidad del viento (en centímetros por segundo) se representa con una línea punteada. Note la correlación directa entre las inspecciones que tienen una alta velocidad de viento y una baja temperatura superficial.

Se debe resaltar que únicamente una cámara termográfica es capaz de reunir toda esta cantidad de datos para observar muy claramente la relación de la temperatura superficial del viento.

A ingenieros y a científicos se les enseña de diferente manera los modos de transferencia de calor y la independencia entre ellos, haciendo énfasis en que se cumplan las leyes de conservación de energía. Pero muy comúnmente prestan poca atención a la apreciación de la temperatura superficial la cual es una respuesta al balance del flujo de la energía. Les enseñan que la energía irradiada depende la cuarta potencia de la temperatura superficial por el valor de la emisividad; que la transferencia por convección en los fluidos es proporcional a la diferencia de temperatura por el área por el coeficiente de convección; y que la transferencia por conducción incrementa proporcionalmente a la diferencia de la temperatura en sólidos por la conductividad por el área, dividido el grosor. Pero muy pocas veces se habla del balance que debe existir entre la superficie del objeto y la energía que se pierde o transfiere al ambiente.

Un caso que podemos mencionar es el uso de los fundamentos de la ASHRAE (Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado, por

Porque muchos ingenieros que conocen los valores de la ASHRAE lo utilizan en las aplicaciones prácticas sin entenderlos completamente y al momento de realizar los cálculos los resultados pueden parecer no razonables.

sus siglas en Inglés) en países como Estados Unidos, para obtener los valores típicos del coeficiente de transferencia de calor de la resistencia del aire del interior y el exterior, pues muchos ingenieros usan este valor (utilizado en la pérdida de calor en edificios) y lo aplican para encontrar la pérdida de calor en el refractario de un horno industrial. Lo anterior es totalmente inapropiado pues los valores de la ASHRAE no sólo toman en cuenta el coeficiente de transferencia de calor por convección, también incluyen la radiación. En los edificios la pérdida de calor es predominantemente por convección y la radiación tiene un papel minoritario, pero en los hornos industriales refractarios la pérdida de calor es predominantemente por radiación.

Para ilustrar lo anterior podemos hablar de “la capa de resistencia de aire” que se forma en superficie de adentro y afuera de las paredes verticales que están transfiriendo su energía con el entorno. Muchos termógrafos se basan en los valores brindados por la ASHRAE. Este valor es de $0.68 \text{ hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}/\text{btu}$ para una pared interna y de $0.17 \text{ hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}/\text{btu}$ para las paredes externas (para una velocidad de viento máxima de 24 km/h). Para empezar se debe entender que este valor no es únicamente el de la convección de “la capa de resistencia de aire”, también es el valor de la conducción superficial y la resistencia de las paredes al aire. Además este valor está especificado para una emisividad de la superficie de 0.90, con una temperatura interior de 70°F y con una diferencia de 10°F con la otra superficie o el aire ambiental. Si la emisividad cambiara a 0.05 la ASHRAE indica que el valor de $0.68 \text{ hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}/\text{btu}$ cambiaría a $0.59 \text{ hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}/\text{btu}$. ¿Por qué es esto importante para un termógrafo? Porque muchos ingenieros que conocen los valores de la ASHRAE lo utilizan en las aplicaciones prácticas sin entenderlos completamente y al momento de realizar los cálculos los resultados pueden parecer no razonables.

Temperatura Superficial y Gradientes

Al analizar temperaturas superficiales es útil realizar dos tipos de análisis: primero se debe estudiar el flujo de calor que está ocurriendo a través del objeto desde la fuente generadora y segundo se debe observar el impacto de la superficie externa al cambiar el balance con el entorno.

La figura 2A muestra como las temperaturas esperadas conducidas por una pared con un aislamiento térmico (insulación) R-12 comparadas con las columnas o paralelas de madera que se clasifican como insulación R-4. La temperatura superficial interior es de 66°F y 60°F para el aislamiento térmico y la columna de madera respectivamente, esto indica que existirá una diferencia detectable de 6°F entre ambas superficies.

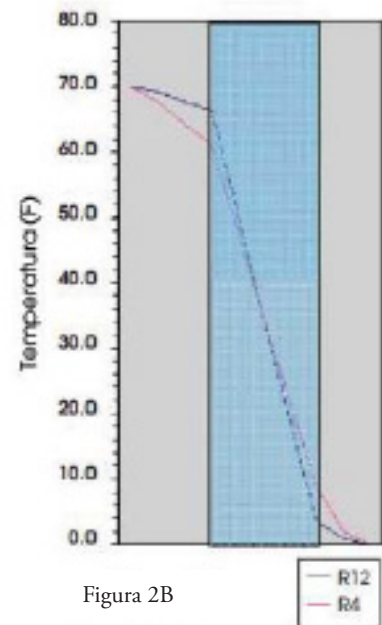
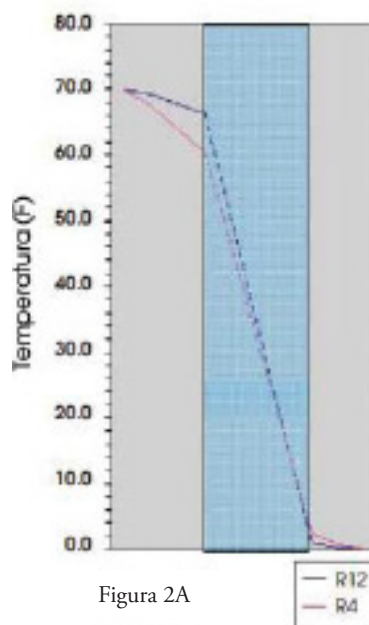
También es muy importante resaltar que existe una diferencia de 4°F y 10°F entre el aire ambiental interno y dichas superficies. Todo esto es causado tanto por la sumatoria total de la transferencia de calor por radiación, la convección entre el aire interno y las superficies. La figura 2A indica que existe alta convección en el exterior (25 km/h) y que las temperaturas externas son de 0.9°F y 2.5°F para la pared y la columna de madera respectivamente. Aunque son detectables con cámaras infrarrojas de alta resolución, se necesita un operador habilidoso para resaltar y optimizar la imagen.

La figura 2B muestra la misma pared en condiciones de muy baja velocidad del viento. La temperatura exterior de la superficie de la pared es casi la misma a 66°F y 61°F para

Problemas muy grandes pueden surgir cuando se miden temperaturas superficiales con termómetros de contacto.

el aislamiento térmico y los parales de madera respectivamente. La transferencia de calor por conducción no ha variado a través de la pared, pero si ha variado significativamente la transferencia por convección, por lo que la transferencia de calor por radiación se ha incrementado para mantener el balance. Ya que la emisividad sigue igual, la única manera de lograr lo anterior es si la superficie aumentara su temperatura y si prestamos atención podemos observar que las temperaturas exteriores en efecto incrementaron a 3.6°F y 8.9°F para el aislamiento térmico y los parales de madera respectivamente. En conclusión, lo importante para un termógrafo es que pueda percatarse de la diferencia que existe entre el aislamiento térmico y de la columna de madera, donde en condiciones con mucho viento es de 5.3°F y en condiciones de poco viento es de 1.6°F.

Problemas muy grandes pueden surgir cuando se miden temperaturas superficiales con termómetros de contacto. Se debe tener un buen contacto con la superficie, el sensor debe tener una muy baja capacitancia térmica y una alta conductividad. El sensor y el cableado no deben estar influenciados por la convección alrededor del área de medición. El sensor no debe cambiar la emisividad de la superficie y su cableado no debe crear una barrera a la radiación. En algunos casos, el sensor debe tener la misma absorción que la superficie. Los medidores de radiación tienen también dificultades al medir temperaturas, por ejemplo es muy importante que se conozca la emisividad del material. La gran ventaja de la medición de temperatura por radiación es que no se necesita hacer contacto con la superficie, por lo cual tiene una influencia despreciable en el balance térmico del objeto medido. Al final tanto los medidores de temperatura por contacto y sin contacto tienen sus respectivas ventajas y desventajas y esto nos lleva algunas veces a confundirnos y no estar de acuerdo en que el medidor nos puede dar una temperatura superficial más exacta. Por ejemplo para medir las temperaturas internas de hornos, se coloca una termocopla soldada a un tubo y se reporta su temperatura al cuarto de control para monitorear el proceso. Una cámara termográfica raramente reportará el mismo valor que la termocopla y es importante establecer porque existe



Más que nada, la repetitividad de los resultados es muy importante para la credibilidad de un termógrafo.

esta discrepancia. Existen muchas razones, por ejemplo la termodinámica del ambiente, muchas personas tienden a creer que la medición de temperatura por contacto es más exacta pues está permanente todo el tiempo en el lugar y es bastante repetible, lo anterior no es algo malo pero se debe aceptar el hecho que las mediciones pueden ser consistentes y repetibles pero también algunas veces pueden ser inexactas o incorrectas. Por otro lado al realizar mediciones sin contacto, por radiometría factores como la absorción atmosférica, emisividad y la temperatura de reflexión del fondo nos recuerdan que los termógrafos tienen que conocer profundamente los valores de estas variables para realizar mediciones precisas.

¿Qué quiere decir todo lo anterior?

Los termógrafos miden la temperatura de una superficie en un instante en el tiempo (unos cuantos milisegundos). Al reportar la temperatura, alguien puede preguntarse acerca de la exactitud de la medición pues puede que no sea la misma que la obtenida con otra medición, o puede ser diferente a lo que se esperaba. Entonces debemos realizar las siguientes preguntas:

1. *¿Esperaba que la medición con ambos tipos de medidores fuera la misma?*
2. *¿Cuánto varía la temperatura superficial y la temperatura de la fuente o generador?*
3. *¿Varía la temperatura de la superficie y la del ambiente que la rodea?*
4. *¿Se está comparando la medición de temperatura de superficie con la de temperatura por inmersión?*

Más que nada, la repetitividad de los resultados es muy importante para la credibilidad de un termógrafo. Entender la dinámica de las temperaturas de las superficies y educar a otros que esta temperatura es dependiente de muchos factores debe ser la meta de todos los termógrafos que realizan esfuerzos para medir temperaturas.

Referencias

- ASHRAE, Handbook of Fundamentals, Chapter 22, 1977. DeWitt, D.P. & Nutter, Gene D. (Editors) Theory & Practice of Radiation Thermometry. New York: Wiley Interscience, 1988.
- Incropera, F.P., & DeWitt, D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4th ed., John Wiley & Sons, 1996. Mansfield, Michael, and O'Sullivan, Colm. Understanding Physics New York: WileyInterscience, 1998.
- Microsoft® Encarta® 98 Encyclopedia. 1993–1997
- Microsoft Corporation. [CD-ROM]
- McIntosh, G.B. Recent Advances in the Quantification of Industrial Heat Loss Using Thermography. Proceedings of Thermosense IV, R.A. Grot, G.T. Wood (Chairs), SPIE 1981.