

ESTUDIO DE FACTORES QUE INCIDEN EN LOS SENSORES DE TERMÓMETROS DE RADIACIÓN

Ing. Margarita Kaplun Mucharrafille¹, Dr. Ing. Alberto Rossa-Sierra²,
M. Gaspar Antonio Giannuzzi Ponce³, Dr. Ing. Omar Humberto Cruz Silva⁴

Resumen—Se ha analizado la conveniencia de estudiar el comportamiento de los sensores de los termómetros infrarrojos y de las cámaras termográficas, con el objetivo de determinar si los resultados obtenidos de sus mediciones, se ven afectadas, entre otros factores por las diferentes marcas comerciales, los modelos físicos de los instrumentos, el tipo de instrumento de medición e inclusive los modelos matemáticos de sus sensores, tratando de identificar cuál es la interacción de sus funciones ajustables, como lo es la emisividad. Así como establecer una significancia en los resultados al realizar mediciones y calibraciones con diferentes valores de emisividad, para diferentes puntos de calibración.

Palabras clave—Termómetros de radiación, Cámaras termográficas, Sensores infrarrojos, Emisividad, Temperatura de radiancia, Calibración termometría de radiación.

Introducción

Hoy en día, la aplicación de los termómetros de radiación y de las cámaras termográficas es muy extensa. Gracias a su posibilidad de realizar mediciones a distancia y de obtener perfiles de temperatura de las superficies medidas, son utilizados en diversos campos como: industrial, automotriz, aeronáutico, agrícola, forestal, agua e hidrocarburos, ensayos no destructivos, mantenimientos predictivos y preventivos, entre otros sectores y servicios.

La importancia de que estos instrumentos midan de manera eficiente, radica en el hecho de que las lecturas obtenidas de ellos, pudieran ser útiles para la toma de decisiones. Encontrar una homologación entre la forma de medición de los sensores de los instrumentos, la de los laboratorios de calibración y la del usuario final, permitiría construir una cadena de mediciones adecuadas, para la toma de dichas decisiones.

Tanto por observación dentro del laboratorio de Kapter®, como por la de algunos colegas con experiencia en termometría de radiación, clientes e inclusive algunos fabricantes y considerando que la problemática de medir a emisividades diferentes a 1 se presenta a diario, nos afrontamos con el hecho y se consideró conveniente realizar la presente investigación, para estudiar el efecto de la emisividad y la temperatura en los resultados de las mediciones hechas con termómetros de radiación y cámaras termográficas, conociendo a partir de su significancia la factibilidad de medir a emisividades distintas a 1.

Diversos documentos en temas de termometría de radiación, tanto internacional como nacionalmente, indican que la medición de la temperatura de radiancia, se debe realizar con la emisividad ajustada a 1. Sin embargo, dicho valor se trata de aproximar en los cuerpos grises, los cuales son fuentes de radiación, que en su mayoría, son utilizados por laboratorios primarios y secundarios y no son del todo accesibles para los diversos campos de aplicación.

La presente investigación plantea la problemática desde el punto de vista de medición de los termómetros de radiación y cámaras termográficas, ya que los cuerpos reales o radiadores selectivos, presentan superficies de radiación menores a 1 y al ser medidos, se observa un cambio significativo en los resultados al variar la emisividad, tomando ésta valores lejanos a 1.

¹ Ing. Margarita Kaplun Mucharrafille, es estudiante de Posgrado en CIATEQ / Brikap, S.A. de C.V., Jalisco, México. mkaplun@kapter.mx (autor correspondiente)

² El Dr. Ing. Alberto Rossa-Sierra, es Profesor de la Universidad Panamericana y del Posgrado de CIATEQ, Jalisco, México. lurosa@up.edu.mx

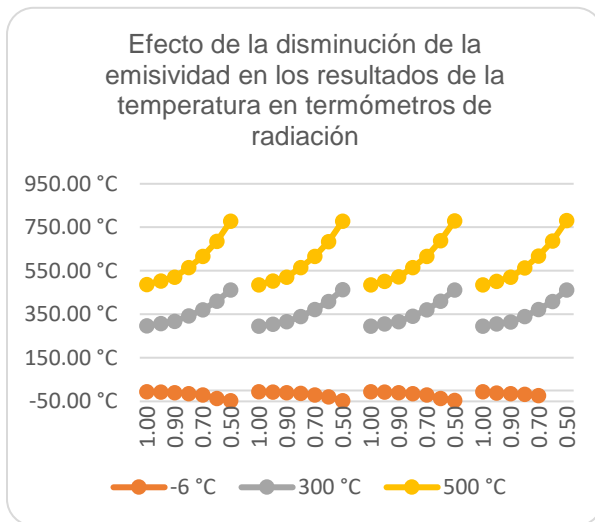
³ M. Gaspar Antonio Giannuzzi Ponce³, Dr. Ing. Omar Humberto Cruz Silva, es profesor en el ITESO y del Posgrado de CIATEQ, Jalisco, México. ggiannuz@iteso.mx

⁴ El Dr. Ing. Omar Humberto Cruz Silva CIATEQ, es investigador y profesor de CIATEQ, Jalisco, México. omar.cruz@ciateq.mx

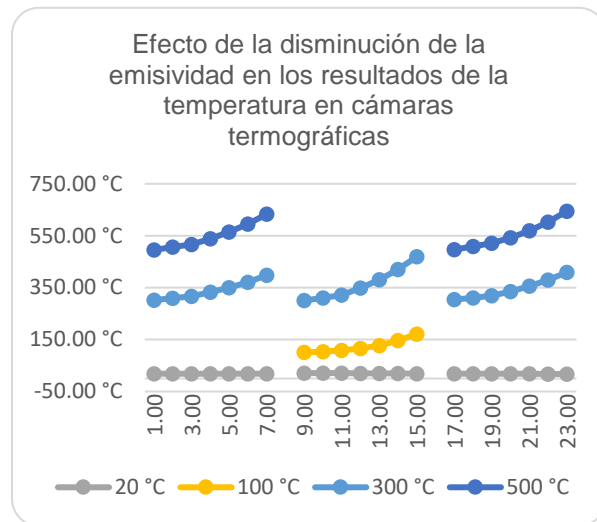
Descripción del método

Con la finalidad de estudiar el comportamiento de los sensores de los termómetros infrarrojos y de las cámaras termográficas y con el objetivo de determinar si los resultados obtenidos de sus mediciones, se ven afectadas, entre otros factores por las diferentes marcas comerciales, los modelos físicos de los instrumentos, el tipo de instrumento de medición e inclusive los modelos matemáticos de sus sensores, la forma de ajuste interno de funciones ajustables como la emisividad, se consideró adecuado realizar mediciones para conocer su comportamiento.

Las primeras mediciones consistieron en medir en siete valores diferentes de emisividad: 1, 0.95, 0.90, 0.80, 0.70, 0.60 y 0.50, a tres puntos de temperatura, con seis réplicas, con dos tipos de instrumentos de medición: cuatro termómetros de radiación y tres cámaras termográficas. Los resultados se pueden ver en la gráfica 1 y 2:



Gráfica 1. Efecto de la disminución de la emisividad en los resultados de la temperatura en 4 termómetros de Radiación.



Gráfica 2. Efecto de la disminución de la emisividad en los resultados de la temperatura en 3 cámaras termográficas.

Deduciendo de la parte experimental, que existe una relación entre la emisividad y la temperatura que podría afectar a los resultados de la medición. Sin embargo, este patrón se presenta independientemente de las marcas, modelos, tipos de instrumentos e inclusive del modelo matemático de sus sensores.

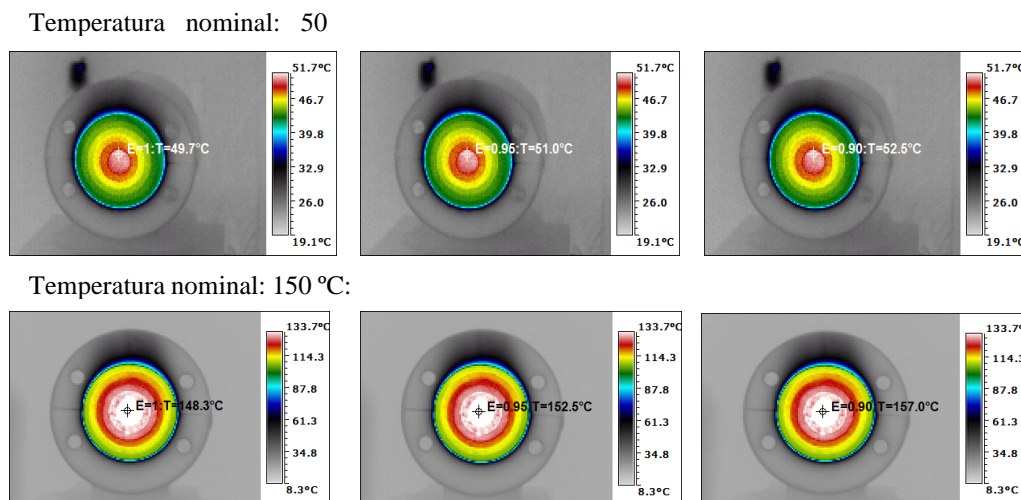


Figura 1. Termogramas de cuerpos grises con cavidad de cuerpo negro y gradiente térmico, a temperaturas nominales de 50 °C y 150 °C, que muestran que al establecer emisividades menores a 1, la temperatura se incrementa.

Estos efectos térmicos, también se pueden observar en los siguientes termogramas de la Figura 1, en donde se muestra un perfil térmico de un cuerpo gris con cavidad de cuerpo negro, que cuenta con un dispositivo circular a la cavidad central, compuesto de anillos circulares concéntricos capaces de generar gradientes térmicos. Su emisividad funcional es de 0.99 y en su centro se observan las máximas temperaturas. El ajuste de emisividad se realizó mediante el software Thermocom IR Analyser:

Dados los resultados preliminares y para mostrar el efecto de los dos factores que aparentemente afectan en mayor medida los resultados que son: Emisividad y Temperatura, ya que el patrón se muestra tanto en termómetros de radiación como en las cámaras termográficas, se opta por establecer una significancia en los resultados al realizar mediciones y calibraciones con diferentes valores de emisividad, para diferentes puntos de calibración.

Metodología del diseño de experimentos

Para demostrar dicha significancia, se decidió hacerlo mediante un diseño de experimentos multifactorial. Se seleccionaron siete instrumentos de medición, de los cuales, cuatro son termómetros de radiación y tres cámaras termográficas, ambos tipos de instrumentos miden la temperatura de radiancia emitida por la superficie de un objeto, algunos de ellos son nuevos y otros usados, representan una combinación entre tipos de instrumentos, modelos, marcas, especificaciones técnicas y modelos matemáticos de sus sensores térmicos, todos ellos con posibilidad para realizar ajustes en el valor de la emisividad.

Se sabe que la medición y la calibración en termometría de radiación conlleva a considerar más de una variable, por lo que en este estudio sólo se consideran dos variables: emisividad y puntos de calibración, como variables significativas para los resultados.

Se seleccionaron cuatro niveles para la emisividad: 1,00; 0,95; 0,80; 0,70 y tres niveles para los puntos de calibración: -6 °C, 300 °C y 500 °C (para cuatro termómetros de radiación y dos cámaras termográficas) y 20 °C, 100 °C y 300 °C (para una de las cámaras termográficas) y se llevó a cabo un análisis de varianza multifactorial de una variable dependiente (temperatura) y dos variables dependientes (emisividad y puntos de calibración), con seis réplicas. Teniendo con ello 72 números de casos completos para analizar.

Ejemplo:

De los resultados de la metodología empleada para uno de los termómetros de radiación, marca: Fluke, modelo 568, No. Identificación: LTR-08.

Planteamiento de las hipótesis

$H_0: \alpha_i = 0$: No existe un efecto significativo de la emisividad en los resultados obtenidos.

$H_1: \alpha_i \neq 0$: Sí existe un efecto significativo de la emisividad en los resultados obtenidos.

$H_0: \beta_j = 0$: No existe un efecto significativo de los puntos de calibración en los resultados obtenidos.

$H_1: \beta_j \neq 0$: Sí existe un efecto significativo de los puntos de calibración en los resultados obtenidos.

$H_0: (\alpha\beta)_{ij} = 0$: No existe efecto significativo de la interacción entre la emisividad y los puntos de calibración en los resultados obtenidos.

$H_1: (\alpha\beta)_{ij} \neq 0$: Sí existe efecto significativo de la interacción entre la emisividad y los puntos de calibración en los resultados obtenidos.

Establecimiento de la regla de decisión

Se rechaza H_0 , en cualquiera de los casos, si al analizar los datos, se obtiene un $Valor-P \leq 0.05$.

Decisión sobre los resultados obtenidos en el diseño de experimentos, contenidos en el Cuadro 1.

Análisis de Varianza para Temperatura 1 - Suma de Cuadrados Tipo III					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Emisividad 1	44542.4	3	14847.5	1248852.55	0.0000
B:Puntos Calibración	3.76352E6	2	1.88176E6	158278806.39	0.0000
INTERACCIONES					
AB	40338.5	6	6723.08	565492.40	0.0000
RESIDUOS	0.713333	60	0.0118889		
TOTAL (CORREGIDO)	3.8484E6	71			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Cuadro 1. ANOVA que descompone la variabilidad de Temperatura en contribuciones debidas a varios factores.

Conclusiones del diseño de experimentos ANOVA mostrado en el Cuadro 1.

Puesto que 2 valores-P son menores que 0.05, se concluye que estos factores: Emisividad y puntos de calibración, tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Temperatura con un 95.0% de nivel de confianza.

Se aceptan las siguientes hipótesis para todos los termómetros de radiación y cámaras termográficas estudiadas, dado que $Valor-P = 0.000$.

$H_1: \alpha_i \neq 0$: Sí existe un efecto significativo de la emisividad en los resultados obtenidos.

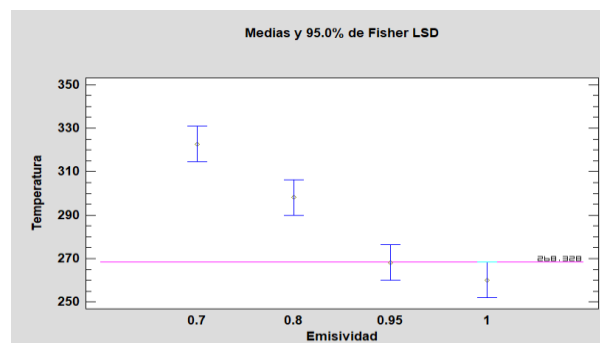
$H_1: \beta_j \neq 0$: Sí existe un efecto significativo de los puntos de calibración en los resultados obtenidos.

$H_1: (\alpha\beta)_{ij} \neq 0$: Sí existe efecto significativo de la interacción entre la emisividad y los puntos de calibración en los resultados obtenidos.

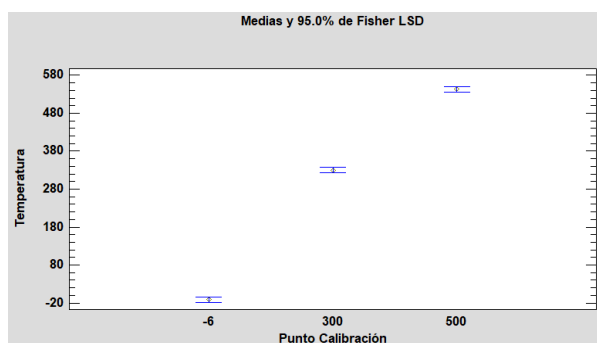
Comparaciones múltiples por medio de gráficos de medias

Observando las gráficas de medias 3 y 4, hay diferencias entre las medias para valores de emisividad de 0.7 y 0.8, lo cual indica que habría un cambio significativo en los resultados de las mediciones, al medir la temperatura en dichas emisividades. Para el caso de valores de emisividad de 0.95 y 1, ocurre lo contrario, no hay diferencia entre las medias, debido a que los datos graficados se traslapan y por lo tanto no existe cambio significativo en los resultados al medir la temperatura en estas emisividades.

Cabe mencionar que respecto a los diferentes puntos de calibración, hay diferencias entre las medias para los tres puntos de temperatura seleccionados: (-6, 300 y 500) °C, lo cual indica que habría un cambio significativo en los resultados si la temperatura llegara a variar tan significativamente; sin embargo, los niveles de variación dentro del mismo punto de calibración son pequeñas, por lo tanto, no afecta los resultados si se mantienen temperaturas estables al momento de medir.



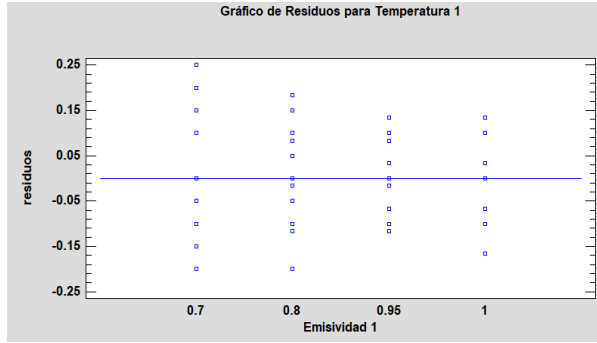
Gráfica 3. Gráfica de medias y 95% de Fischer LSD, de Temperatura y Emisividad. Termómetro de radiación, Marca: Fluke, Mod. 568, No. ID: LTR-08.



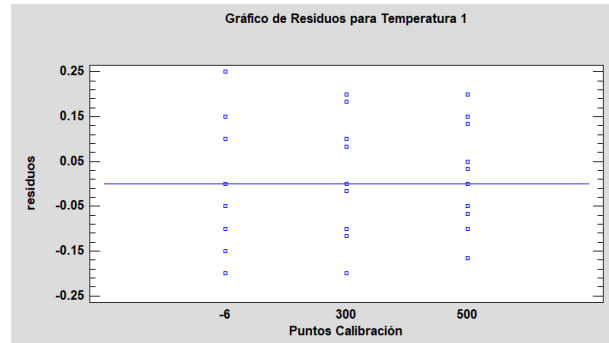
Gráfica 4. Gráfica de medias y 95% de Fischer LSD, de Temperatura y Puntos de calibración Termómetro de radiación, Marca: Fluke, Mod. 568, No. ID: LTR-08.

La validación del modelo del experimento diseñado, se evalúa mediante el cumplimiento de lo siguientes supuestos:

- Aunque no es un supuesto propiamente dicho, un gráfico de residuos contra factores: Emisividad y puntos de calibración, permite observar si existen datos anómalos o no, ya que un dato anómalo cambiaría todos los resultados del análisis y no tendrían suficiente validez para su análisis. Si existiera un dato anómalo, no se pudiera eliminar salvo que viniese de un error en la medición, caso contrario sería motivo de una nueva investigación. Para este termómetro, no se observan datos anómalos. Estos efectos se pueden observar en la Gráfica 5 y 6.

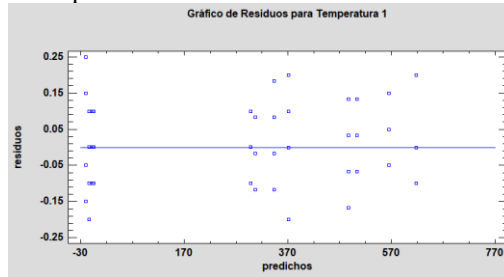


Gráfica 5. Gráfica de Residuos y factor emisividad.
Termómetro de radiación, Marca: Fluke, Mod. 568, No. ID:
LTR-08.



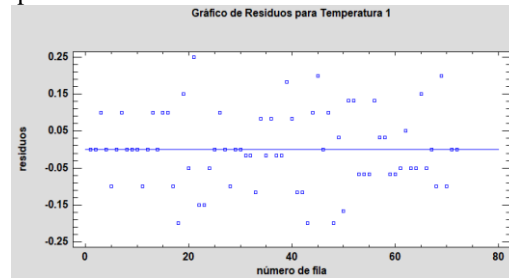
Gráfica 6. Gráfica de Residuos y factor punto de calibración
Termómetro de radiación, Marca: Fluke, Mod. 568, No. ID:
LTR-08.

- b) Cumplimiento del supuesto de residuos contra predichos: (Igualdad de varianzas). Debido a que el gráfico 7 muestra que los datos no forman un cono creciente de izquierda a derecha, se concluye que existe homogeneidad de varianzas y con ello se cumple el supuesto.



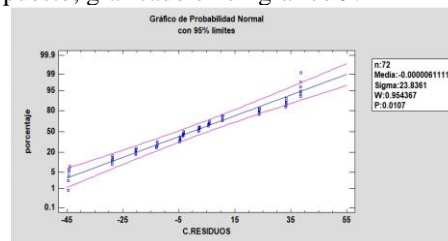
Gráfica 7. Gráfica de Residuos y predichos. Termómetro de radiación, Marca: Fluke, Mod. 568, No. ID: LTR-08.

- c) Cumplimiento del supuesto de residuos contra secuencia de datos: Los datos en el gráfico 8 no presentan un patrón de comportamiento en orden de aparición, lo cual confirma su aleatoriedad y con ello el supuesto de independencia de errores, cumpliendo así el supuesto.



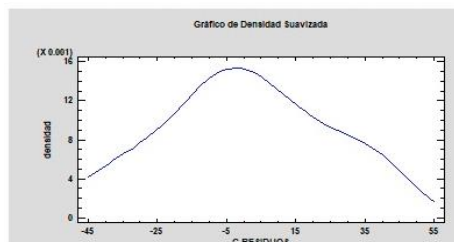
Gráfica 8. Gráfica de Residuos v número de fila. Termómetro de radiación, Marca: Fluke, Mod. 568, No. ID: LTR-08.

- d) Cumplimiento del supuesto de normalidad, a partir de los residuales. Un criterio para evaluar este supuesto, es considerando el estadístico de Shapiro-Wilk, en donde se obtiene un dato probabilístico “W” y éste se compara con el Valor-P. Cuando éste estadístico es mayor que Valor-P, se concluye que los datos cumplen con los principios de normalidad para el ensayo propuesto, graficado en el gráfico 9.



Gráfica 9. Gráfica de Probabilidad Normal con 95% de confianza. Termómetro de radiación, Marca: Fluke, Mod. 568, No. ID:
LTR-08.

El gráfico 10 de probabilidad normal, muestra, que si bien es cierto, los datos no muestran un comportamiento completamente normal, se observa un comportamiento aproximadamente normal para el ensayo propuesto y para demostrar dicha aproximación a la normal se recurre al gráfico 10 de densidad suavizada, ya que ésta nos permite “ajustar” el comportamiento de los datos y con ello concluir que con la normalidad presentada es suficiente para justificar los resultados del ensayo.



Gráfica 10. Gráfica de Densidad Suavizada de Residuos. Termómetro de radiación, Marca: Fluke, Mod. 568, No. ID: LTR-08

Comentarios finales

Resumen de resultados

En este trabajo investigativo se estudió el comportamiento de los sensores de los termómetros infrarrojos y de las cámaras termográficas, con el objetivo de determinar si los resultados obtenidos de sus mediciones, se ven afectadas por factores diferenciales que pudiesen existir entre ellos.

Los resultados de la investigación incluyen el análisis estadístico mediante un diseño de experimentos de análisis de varianzas – ANOVA, pruebas experimentales con cuatro termómetros de radiación y tres cámaras termográficas, medidos en fuentes de radiación con cavidad de cuerpo negro y análisis termográfico de cada medición mediante software termográfico especializado.

Conclusiones

Con los resultados obtenidos del diseño de experimentos, se finaliza el análisis estadístico para la validación del modelo propuesto, concluyendo que el diseño de experimentos es adecuado para la validación de la presente investigación, ya que los supuestos del análisis de varianzas - ANOVA se cumplen: supuesto a) no se observan datos anómalos, supuesto b) existe igualdad de varianzas, supuesto c) existe aleatoriedad en los datos y por lo tanto Independencia de errores y supuesto d) existe un comportamiento aproximadamente normal.

Existe una relación entre la emisividad y la temperatura a medir, que podría afectar los resultados de las mediciones. Este patrón se presenta independientemente de la marca, modelo, tipo de instrumento e inclusive del modelo matemático de sus sensores y demás diferencias que pudieran existir entre estos.

La significancia entre la emisividad y la temperatura se presenta tanto en termómetros de radiación como en cámaras termográficas, independientemente de sus diferencias de medición. Los factores: Emisividad y puntos de calibración, tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la temperatura con un 95.0% de nivel de confianza y estadísticamente hablando, no existe efecto significativo de la interacción entre la emisividad y los puntos de calibración en los resultados obtenidos.

Para valores de emisividad entre 0.95 y 1 no hay diferencia entre las medias, por lo tanto no existe cambio significativo en los resultados al medir la temperatura en estas emisividades. Para evitar cambios significativos en los resultados de las mediciones, es importante mantener temperaturas estables al momento de la medición y calibración y así, eliminar la posible interacción entre los factores.

Independientemente del equipo con el que se mida la temperatura de radiancia, la temperatura leída va a cambiar con el valor de emisividad asignado. Pese a que se desconoce el modelo matemático de los sensores estudiados, se observó, que en promedio, los aumentos de temperatura son similares en cada uno de los equipos, debido al cambio de emisividad. A menor emisividad, mayor temperatura.

Adicional a los factores aquí estudiados, se deben evaluar los factores externos que afectan a las mediciones como son: radiación solar, luz visible, distancia, arreglo experimental.

Los resultados aquí observados son de importancia y de principal relevancia para aquellas aplicaciones que requieran mediciones y calibraciones de temperatura de radiancia o el uso de los instrumentos aquí investigados.

Recomendaciones

Los investigadores interesados en continuar nuestra investigación podrían concentrarse en el factor de la normalidad aproximada y e intentar mitigarla mediante otros estudios estadísticos o mediante mas pruebas experimentales que involucren termómetros de radiación y cámaras termográficas de marcas y modelos variados. Podríamos sugerir mostrar resultados de calibraciones, mas que de mediciones, para mostrar el impacto de la incertidumbre de los resultados.

Se sugiere reducir las diferencias entre los diferentes valores de emisividad, para poder lograr mayor alcance en las mediciones de los laboratorios de medición y calibración con fuentes de radiación con emisividad efectiva menor a 1.

Investigar sobre los modelos matemáticos de los sensores térmicos disponibles en el mercado, para establecer si estos son del tipo Planckiano y alguna aproximación a dicho modelo, para establecer correlaciones entre éstos y sus temperaturas medidas.

Referencias

STATGRAPHICS Centurion 18, Versión 18.1.12 (64-bits); Statgraphics Technologies, Inc.1982-2018.Ed. Evaluación.

Montgomery, D.C. (1991). Diseño y Análisis de Experimentos. Segunda edición. México, D.F.: Editorial Limusa, Grupo Noriega Editores. 2003.

Gutiérrez Pulido, H y de la Vara Salazar, R. Análisis y diseño de experimentos. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana. 2004.

Vicente, M.L.; Girón, P.; Nieto, C. y Pérez, T. Diseño de experimentos. Soluciones con SAS y SPSS. Madrid: Pearson Educación, S.A.

Apuntes posgrado CIATEQ, A.C. Diseño de Experimentos. Clave: OBMA-3. M. Gaspar Antonio Giannuzzi Ponce³ 2019.