

# VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN APLICADO A UN ESTUDIO DE TERMOGRAFÍA SENSORIAL PARA LA DETECCIÓN DE DESÓRDENES DE TRAUMAS ACUMULADOS

## VALIDATION OF A MEASURING SYSTEM APPLIED TO A STUDY OF SENSORIAL THERMOGRAPHY FOR THE DETECTION OF CUMULATIVES TRAUMAS DISORDERS

Javier Ordorica Villalvazo<sup>1</sup>, Claudia Camargo Wilson<sup>1</sup>, Enrique J. de la Vega Bustillos<sup>2</sup>, Oscar R. López Bonilla<sup>1</sup>, Jesús E. Olguín Tiznado<sup>1</sup>, Juan Andres López Barreras<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería Ensenada. Universidad Autónoma de Baja California, México. C.P. 22870. ccamargo@uabc.edu.mx, jeol79@uabc.edu.mx, olopez@uabc.edu.mx

<sup>2</sup>División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Hermosillo. Sonora, México. C.P. 83170. e\_delavega\_mx@yahoo.com

<sup>3</sup>Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería Tijuana Universidad Autónoma de Baja California, México. C.P. 22390. jalopez@uabc.edu.mx

### RESUMEN

En el presente trabajo se muestra la aplicación del estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad (R y R), realizado para evaluar el Sistema de Medición (SM) utilizado en un estudio de termografía sensorial en seres humanos, para la detección de Desórdenes de Traumas Acumulados (DTA's). La termografía es una técnica no invasiva en los seres humanos y que no los dañará en ningún momento. La termografía sensorial, a diferencia de la infrarroja, basa su funcionamiento en monitoreo por sensores para capturar temperaturas y buscar anomalías que pudieran dar indicio en el desarrollo de enfermedades. Por tal motivo la confiabilidad al obtener temperaturas es vital. Para ello se seleccionó al estudio R y R como herramienta para la validación del sistema de medición.

Este estudio hace un análisis comparativo en la validación del sistema de medición que ayudará a predecir DTA's; utilizando en el primer experimento a dos operadores que manejan el instrumento de medición y toman las lecturas a diez personas, las cuales son consideradas como las diez partes diferentes a que hace referencia la literatura en los estudios R y R clásicos, en las cuáles se mide en dos ocasiones diferentes su temperatura cutánea en el área de la muñeca en mano derecha por cada operador. Y después, en un segundo experimento, se utilizan tres operadores y diez personas, midiéndose en tres ocasiones diferentes su temperatura en la misma región que el primer experimento. Los resultados obtenidos en esta aplicación por los dos experimentos mostraron -en general-, que el sistema de medición es excelente según los parámetros establecidos por la Automobile Industries Action Group (AIAG), lo que permite seguir adelante con las otras fases de la investigación principal.

**Palabras clave:** Desórdenes de Trauma Acumulado, repetibilidad, reproducibilidad, sistema de medición, termografía.

## ABSTRACT

This paper shows the implementation of the study of Repeatability and Reproducibility (R & R) conducted to evaluate the Measurement System (MS) used in a study of sensorial thermography in humans, to detect Cumulative Trauma Disorders (CTD's). Thermography is a noninvasive technique on humans and not harm at all times. Thermography unlike sensory bases its operation on infrared sensors to capture monitoring temperatures and look for abnormalities that could give evidence in the development of disease. For this reason reliability is vital to obtain temperatures for this study was selected R & R as a tool for the validation of the measurement system.

This study makes a comparative analysis in the validation of the measurement system to help to predict CTD's, used in the first experiment two operators who handle the meter and take readings at ten persons, which are considered as ten different parts referred to literature in the conventional R & R studies, in which is measured at two different times their skin temperature in the area of the right wrist by each operator. And then, in a second experiment using three operators and ten persons, measured on three different occasions the temperature in the same region as the first experiment. The results obtained in this application by the two experiments showed, in general, the measurement system is excellent according to parameters established by the Automobile Industries Action Group (AIAG), which allows proceeding with the other phases of primary research.

**Keywords:** Cumulative Trauma Disorders, Repeatability, Reproducibility, Measurement System, Thermography.

## INTRODUCCIÓN

La termografía en general ha sido utilizada en múltiples estudios, tanto del área médica como del área industrial. La termografía es una técnica no invasiva en los seres humanos, es decir, no los dañará en ningún momento. Provee de un mecanismo que registra la distribución de la temperatura con una cámara termal que recibe y procesa la radiación infrarroja emitida por la superficie del cuerpo. La termografía sensorial, a diferencia de la infrarroja, basa su funcionamiento en monitoreo por sensores para capturar temperaturas (Gulyaev, *et al.*, 1995), (Harding, 1998), (Vainer, 2005) y (Ferreira *et al.*, 2008) y buscar anomalías que pudieran dar indicio del desarrollo de enfermedades, teniendo como referencia que la temperatura de la piel en condiciones normales de una persona es de 32°C (Madding, 1979).

Algunos estudios recientes han utilizado la termografía como una alternativa significativa en los avances de investigaciones importantes. Tal es el caso de un estudio realizado acerca de las alteraciones en los patrones termográficos después de realizado un ejercicio, y para evaluar el perfil de posibles cambios termográficos en ejercicio en personas adultas. Es bien conocido que el envejecimiento está relacionado con la pérdida de masa muscular y con una reducción en el metabolismo, lo cual limita la producción de calor y los ajustes termo regulatorios (Ferreira *et al.*, 2008). Otro estudio, utilizando la termografía, se realizó para analizar las temperaturas de la mano antes y después de desempeñar una tarea de escritura por un corto tiempo como un indicador de detección de desórdenes en extremidades superiores (Gold *et al.*, 2009).

Los estudios mencionados anteriormente hacen alusión a las aplicaciones de la termografía infrarroja. En cuanto a las aplicaciones de la termografía sensorial, hasta el momento no se han encontrado estudios de su aplicación, por lo cual es de suma importancia la validación de las temperaturas obtenidas con el fin de obtener avances importantes en esta investigación

referente a la detección de un posible DTA en el área de la muñeca. Esta tecnología tiene su base histórica de nacimiento en el desarrollo de termógrafos digitales submarinos, utilizados para medir la temperatura bajo el agua en ambientes naturales, y con posibles aplicaciones en áreas como la oceanografía, ecología marina, industria, entre otras (López, 1992). Cuando hablamos de Desórdenes de Traumas Acumulados, nos referimos al desarrollo de una lesión que se da gradualmente en un período de tiempo debido a la realización de un movimiento repetitivo, causando daño en coyunturas o tejidos sobre una parte del cuerpo (Putz-Anderson, 1988), (Salvendy *et al.*, 2006).

Buscando la validación de los datos que se obtendrá en esta investigación y con la finalidad de obtener avances, se seleccionó al estudio R y R como herramienta para la validación del sistema de medición, ya que estos estudios han sido ampliamente utilizados en el desarrollo de proyectos seis sigma para la validación de instrumentos de medición.

El Análisis del Sistema de Medición (ASM) se ha usado intensamente en cualquier iniciativa de mejoramiento de la calidad de los sistemas de manufactura. Actualmente es necesario contar con sistemas de medición capaces de llevar un buen sistema de Control Estadístico de Proceso (CEP); de igual forma, en la instrumentación de proyectos de Seis-Sigma (SS) y optimización de procesos de producción. El ASM se conoce como estudios de R y R, y se explican ampliamente en Automobile Industries Action Group (AIAG) (2002), Montgomery y Runger (1993), Gorman y Bower (2002). Es por ello que en este trabajo se presenta un ASM aplicado a seres humanos mediante termografía sensorial, contemplando como instrumento de medición el termógrafo sensorial y las partes o piezas, a las personas que se les medirá la temperatura en la región de la muñeca, para conocer si el Sistema de Medición (SM) es el adecuado.

El ASM tiene el propósito de cuantificar y separar la variación introducida por el SM y del proceso. Adicionalmente se puede evaluar la variación debida al SM en dos componentes conocidos como Repetibilidad y Reproducibilidad (R y R), razón por lo cual se conocen también como Estudios R y R. Repetibilidad es la variación observada cuando el mismo operador mide la misma parte varias veces, también conocida como variación debida al o los instrumentos de medición. Reproducibilidad es la variación observada cuando varios operadores miden la misma pieza con el mismo instrumento de medición.

Otros autores mencionan que R y R es tradicionalmente la herramienta para hacer frente a la consistencia del operador, que es la evaluación de instrumentos de medida para determinar su capacidad de dar una respuesta precisa. Definen a la repetibilidad como la variación del instrumento considerando una parte y un operador. La reproducibilidad es la variación entre operadores midiendo una parte (Breyfogle, 2003).

Raffaldi (2005) indican que los estudios de R y R proporcionan información del rendimiento del sistema de medición mediante el uso de coeficientes de variación en la medición y tolerancia obtenida de varias partes y el operador que realiza las mediciones. Ellos muestran que la variación de las mediciones puede ser reducida con un estudio de R y R y mejorarse, indican que es más fácil diferenciar entre las partes que están dentro o fuera de especificación, lo que les permite aceptar o rechazar con mayor confianza.

El propósito de este trabajo es validar, mediante la aplicación de un estudio de R y R, que los termógrafos sensoriales (instrumento de medición) arrojan resultados confiables para la realización de futuros estudios de investigación aplicados en el análisis de la temperatura de la piel en seres humanos.

La hipótesis a validar en base a este propósito sería la siguiente: Es posible validar los

termógrafos sensoriales a través de la aplicación de un análisis de R y R para la realización de futuros estudios aplicados en seres humanos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se efectuó utilizando un termógrafo digital (sensorial) con una tolerancia de  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ; para la programación de los termógrafos se utilizó un programa con plataforma en Windows® llamado prototipo 1. Este programa la hora, minuto y segundo de las mediciones que fueron ejecutadas. Además, para el análisis estadístico de los datos, se utilizó Minitab®15. Estos software fueron manejados en un ordenador PC Pentium IV, procesador 2.8 GHz con 2 Gb de RAM.

Para este estudio se seleccionó a diez personas como sujetos controlados, aparentemente en condiciones físicas normales. Los sujetos controlados fueron mantenidos en un laboratorio en condición de reposo, con los brazos extendidos y descansándolos sobre sus rodillas. Para cada individuo se aleatorizó el orden de la toma de sus muestras por los dos operadores (experimento 1) y tres operadores (experimento 2), además, aleatorizando el orden de participación de cada sujeto. Después de realizada la aleatorización se procedió a la toma de todas y cada una de las réplicas de cada sujeto por parte de los operadores. El procedimiento consistía en colocar el sensor, para obtener las mediciones en el área de la muñeca donde podría generarse un Desorden de Trauma Acumulado (Túnel del carpo), por espacio de 1 minuto. Esto con el fin de que el sensor estabilizara la captura de las diferentes temperaturas del individuo en ese momento determinado; entonces, pasado el minuto, y a los diez segundos, el sensor capturaba la temperatura que tomábamos como réplica en el estudio. Dado que los estudios de R y R se han visto aplicados en otros tipos de experimentos como lo son las pruebas destructivas (Sánchez, *et al.*, 2008), y no en seres humanos, la finalidad de determinar tiempos cortos de medición entre cada una de las réplicas y dado que las temperaturas son generadas por seres humanos y no por máquinas o herramientas, fue con el objetivo de prevenir un factor que pudiera incrementar al componente de R y R en el análisis. Lo anterior aconteció con cada uno de los sujetos controlados uno a uno, sin que ellos supieran el orden de la aleatorización; además, cabe mencionar que ninguno de los operadores, al momento de medir, podía conocer en algún instante las mediciones recabadas entre ellos, ya que cada una de las temperaturas es grabada en una memoria interna del instrumento de medición (termógrafo) programado en periodos determinados por el operador.

Los experimentos para los estudios R y R fueron realizados de acuerdo a la recomendación de AIAG (2002) y analizados con Minitab®15, mismo que proporciona el análisis de medias y rangos, componentes de varianza y estudio de variación con el Número de Categorías Distintas (NCD), además gráficas de barras para los componentes de varianza, gráficas de control de medias y desviación estándar muestrales por operador, gráficas de medias por grupo (operador) y operador. Las ecuaciones para calcular dichos indicadores se muestran a continuación:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{personas}^2 + \sigma_{operador}^2 + \sigma_{instrumento}^2 \quad (1)$$

Donde:

$\sigma_{total}^2$  = Representa la variabilidad total del SM

$\sigma_{personas}^2$  = Representa la variabilidad atribuible a las personas

$\sigma_{operador}^2$  = Representa la variabilidad debida a operadores

$\sigma_{instrumento}^2$  = Representa la variabilidad del instrumento de medición

Donde el cálculo de la variabilidad del instrumento de medición se da bajo la siguiente ecuación:

$$\sigma_{instrumento}^2 = \sigma_{repetibilidad}^2 \quad (2)$$

$$\sigma_{operador}^2 = \sigma_{reproducibilidad}^2 \quad (3)$$

Donde:

$\sigma_{repetibilidad}^2$  = Representa la varianza de la repetibilidad

$\sigma_{reproducibilidad}^2$  = Representa la varianza de la reproducibilidad

Por lo tanto, el cálculo de la variación del SM será:

$$\sigma_{R\&R}^2 = \sigma_{repetibilidad}^2 + \sigma_{reproducibilidad}^2 \quad (4)$$

Calcular para cada operador el rango ( $R$ ), éste se obtiene de la diferencia entre el dato mayor ( $X_{ijk_{max}}$ ) y el dato menor ( $X_{ijk_{min}}$ ) de las mediciones que hizo sobre cada pieza/persona entre las "r" replicas (dos para el experimento uno y tres para el experimento dos) de los experimentos de cada operador como se muestra en la ecuación (5):

$$R = X_{ijk_{max}} - X_{ijk_{min}} \quad (5)$$

Donde  $i=1,2,\dots,10$  representa el número de personas a medir;  $j=1$  y  $2$  para el experimento uno y  $j=1,2$  y  $3$  para el experimento dos, la cual representa el número de réplicas por experimento por cada réplica;  $k=A$  y  $B$  para el experimento uno y  $k=A, B$  y  $C$  para el experimento dos, representa a cada operador. Este rango es una información directa sobre la repetibilidad, ya que son mediciones sobre la misma pieza (persona) hechas por el mismo operador.

Enseguida calcular el promedio de los rangos  $\bar{R}$  de cada operador con la ecuación (6):

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k R_{ij}}{nk} \quad (6)$$

Este método se basa en "r" réplicas, con k evaluadores en "n" partes. Donde,  $n=1,2,\dots,10$ ;  $k=A$  y  $B$  para el experimento uno y  $k=A, B$  y  $C$  para el experimento dos.

Después, calcular los promedios de sus rangos  $\bar{\bar{R}}$  para cada operador (A y B: ecuación 7) experimento 1  $\bar{\bar{R}}_1$  y (A, B y C: ecuación 8) para el experimento dos  $\bar{\bar{R}}_2$ .

$$\bar{\bar{R}}_1 = \frac{\bar{R}_A + \bar{R}_B}{2} \quad (7)$$

$$\bar{\bar{R}}_2 = \frac{\bar{R}_A + \bar{R}_B + \bar{R}_C}{3} \quad (8)$$

Además, Calcular la media y el rango de las medias de todas las mediciones realizadas por operador (A y B) para el experimento 1 (véase ecuación 9  $\bar{X}_1$  y 10  $\bar{X}_{dif1}$  respectivamente). Calcular la media y el rango de las medias de todas las mediciones realizadas por operador (A, B y C) para el experimento 2 (véase ecuación 11  $\bar{X}_2$  y 12  $\bar{X}_{dif2}$  respectivamente):

$$\bar{X}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{20} X_i}{20} \quad (9)$$

$$\bar{X}_{dif1} = \max(\bar{X}_A, \bar{X}_B) - \min(\bar{X}_A, \bar{X}_B) \quad (10)$$

$$\bar{X}_2 = \frac{\sum_{i=1}^{30} X_i}{30} \quad (11)$$

$$\bar{X}_{dif2} = \max(\bar{X}_A, \bar{X}_B, \bar{X}_C) - \min(\bar{X}_A, \bar{X}_B, \bar{X}_C) \quad (12)$$

Calcular el Límite de Control Superior (LCS) de la carta de rangos mediante la ecuación 13, donde  $D_4$  es una constante que depende del número de réplicas (dos para el experimento uno y tres para el experimento dos):

$$LCS = \bar{\bar{R}}_{(1,2)} \cdot D_4 \quad (13)$$

Calcular la Variación del Equipo (VE) y la variación de la repetibilidad ( $\hat{\sigma}_{repetibilidad}$ ) mediante las ecuaciones 14 y 15, donde  $k_1$  es una constante que depende del número de réplicas:

$$VE = 5.15 \cdot \hat{\sigma}_{repetibilidad} = k_1 \cdot \bar{\bar{R}}_{(1,2)} \quad (14)$$

$$\hat{\sigma}_{repetibilidad} = \frac{VE}{5.15} \quad (15)$$

Determinar la Variación del Operador (VO) y la variación de la reproducibilidad ( $\hat{\sigma}_{reproducibilidad}$ ) mediante las ecuaciones 16 y 17, donde  $k_2$  es una constante que depende del número de operadores, "n" es el número de personas que se midieron y "t" es el número de réplicas:

$$VO = \sqrt{((\bar{\bar{X}}_{dif(1,2)}) \cdot k_2)^2 - \frac{(VE)^2}{nt}} \quad (16)$$

$$\hat{\sigma}_{reproducibilidad} = \frac{VO}{5.15} \quad (17)$$

La variación combinada ( $\hat{\sigma}_{R\&R}$ ) o Error de Medición (EM) se calcula como:

$$EM = 5.15 \cdot \hat{\sigma}_{R\&R} = \sqrt{VE^2 + VO^2} \quad (18)$$

$$\hat{\sigma}_{R\&R} = \frac{EM}{5.15} \quad (19)$$

Algunas formas adicionales de expresar las relaciones de un Gage R y R según la AIAG (2002) son: La Variación Total del Proceso (VT) del estudio es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la Variación de Repetibilidad y Reproducibilidad (GR&R) y la Variación Parte (VP) como se puede apreciar en la ecuación 20:

$$VT = \sqrt{(GR \& R)^2 + (VP)^2} \quad (20)$$

Si la variación del proceso es conocida y basada en 6 sigmas, la cuantificación del proceso de variación puede ser usada en lugar de la Variación Total del Estudio (VT) que es calculada del estudio de R y R. De esta situación los valores del párrafo anterior para VT y VP serían reemplazados según la ecuación 18 y 19:

$$VT = \frac{VP}{6} \quad (21)$$

$$VP = \sqrt{(VT)^2 + (GR \& R)^2} \quad (22)$$

La repetibilidad es en ocasiones llamada Variación debido al Equipo (VE). El porcentaje de la Variación del Equipo es según se muestra en la ecuación 23:

$$\%VE = 100 \cdot \left( \frac{VE}{VT} \right) \quad (23)$$

Similarmente en la ecuación 24 se muestra el porcentaje de Variación debido al Operador (VO) en la ecuación 22 el % del estudio R y R (GR & R), y la Variación de Parte en la ecuación 26:

$$\%VO = 100 \cdot \left( \frac{VO}{VT} \right) \quad (24)$$

$$\%GR \& R = 100 \cdot \left( \frac{GR \& R}{VT} \right) \quad (25)$$

$$\%VP = 100 \cdot \left( \frac{VP}{VT} \right) \quad (26)$$

Con el fin de obtener el Número Distinto de Categorías (NDC) que puede detectar el sistema de medición según la ecuación 27 es:

$$NDC = 1.41 \cdot \left( \frac{VP}{GR \& R} \right) \quad (27)$$

## RESULTADOS

Existen tres métodos para el desarrollo de un estudio de repetibilidad y reproducibilidad por variables, los cuales se mencionan a continuación: el de rangos, el de medias y rangos y el de análisis de varianza o ANOVA, los cuáles cuantifican de manera muy diferente la variabilidad de un sistema de medición. Los estudios de R y R se desarrollan con la finalidad de obtener una certidumbre en las mediciones con el instrumento, el operador y el método de medición en búsqueda del aseguramiento de la calidad en nuestras operaciones. Los resultados fueron llevados a cabo realizando un estudio R y R de medias y rangos utilizando el software Minitab®15.

Los resultados del experimento uno se muestran en la figura 1, donde podemos apreciar que el total de la variación del sistema de medición se encuentra expresada por la interacción persona-persona (parte-parte), lo cual es importante resaltar, ya que podemos identificar que el sistema de medición es capaz de distinguir tales diferencias entre las temperaturas de las personas medidas. Ahora, el porcentaje de la variación total se encuentra expresada en las diferencias de las personas mencionadas anteriormente y la variabilidad del componente de repetibilidad. Con esto tenemos que sólo una pequeña parte del componente de R y R conforma el total de la variación expresada por el sistema de medición, con casi un 5% de contribución del 100%. En cuanto a la reproducibilidad, podemos determinar que para este caso no existe evidencia estadísticamente significativa que apoye el hecho de que exista diferencia en el uso del instrumento (termógrafo) por parte de un operador A y otro B, dado que se cuenta con las mismas condiciones de capacitación en el uso adecuado del instrumento de medición. En este caso, si las condiciones no hubieran sido adecuadas en cuanto al uso del instrumento y la capacitación de los operadores, esto hubiera ocasionado una inflación del componente de R y R.

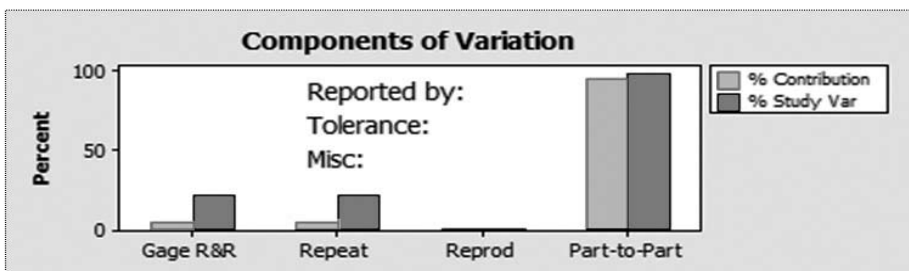
Gage R&R Study - XBar/R Method			
%Contribution			
Source	VarComp	(of VarComp)	
Total Gage R&R	0.07651	4.69	
Repeatability	0.07651	4.69	
Reproducibility	0.00000	0.00	
Part-To-Part	1.55465	95.31	
Total Variation	1.63115	100.00	
Study Var %Study Var			
Source	StdDev (SD)	(6 * SD)	(%SV)
Total Gage R&R	0.27660	1.65957	21.66
Repeatability	0.27660	1.65957	21.66
Reproducibility	0.00000	0.00000	0.00
Part-To-Part	1.24686	7.48113	97.63
Total Variation	1.27717	7.66300	100.00
Number of Distinct Categories = 6			

Figura 1. Resultados estudio R y R del experimento uno por el método de medias y rangos.



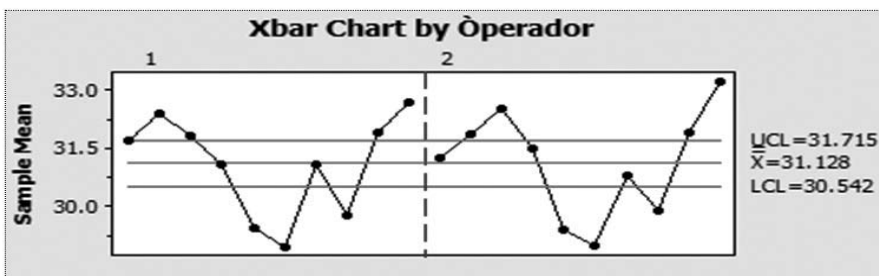
Por otra parte, es de importancia destacar que el porcentaje final de la contribución del componente de R y R a la variación del sistema de medición se encontró en niveles aceptables; en este caso, con un 21.66% del total de la variación explicada por el sistema. Esta misma variación del componente de R y R expresada en su totalidad por la repetibilidad, la variación debido al instrumento de medición. Aunado a lo anterior se tiene que el número de categorías presentado es superior al requerido en la literatura (Breyfogle, 2003), por lo cual se puede decir que el sistema de medición es efectivo. Es decir, que el sistema será capaz de trabajar bajo diferentes condiciones de temperatura, pudiendo detectar cada una de ellas. Como cuando en un sistema se tienen piezas malas, regulares, buenas y excelentes. Además, con lo anterior se amplía el espectro donde podremos encontrar la variación. También las condiciones de operación y de diseño del instrumento de medición tienen mucho que ver. Deben establecerse para el estudio de R y R las condiciones de operación del instrumento y sus tolerancias. Si un instrumento de medición sólo es probado en algunas condiciones de su diseño, éste no podrá ser totalmente confiable, ya que puede ser que bajo ciertas condiciones de operación sea excelente, pero bajo otras (que están en especificación) tenga un desempeño muy pobre. Además, cabe resaltar que si un instrumento de medición se corre fuera de especificación buscando ampliar el espectro, podría darse el caso que también el componente de R y R se expanda junto con él.

Los gráficos de barra mostrados en la figura 2 reiteran de manera clara lo presentado anteriormente en la figura 1, donde se puede apreciar que existe una amplia variación en la interacción persona-persona, y que el componente de repetibilidad compone el 100% del componente R y R. Los gráficos asociados al R y R que presenta Minitab®15 muestran información adicional para las posibles oportunidades de mejora.



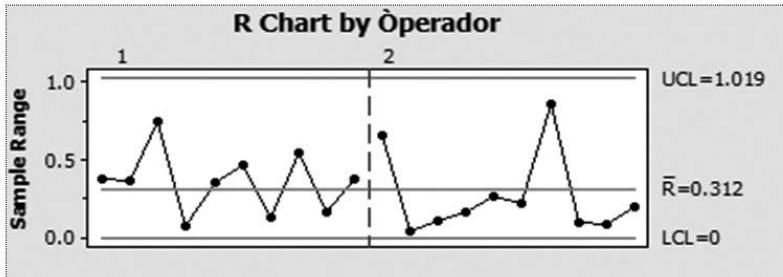
**Figura 2.** Gráfico de barras acerca de los componentes de variación

En la gráfica de medias mostrada en la figura 3 podemos apreciar que el sistema de medición es adecuado, ya que la mayoría de los promedios de las partes caen fuera de los límites. Es decir, el sistema es adecuado con el fin de identificar variaciones entre las temperaturas de las personas (partes). Si los promedios de las partes se encontraran dentro de los límites, entonces estaríamos diciendo que el sistema es inadecuado y que es incapaz de detectar variaciones entre las temperaturas de las personas (partes).



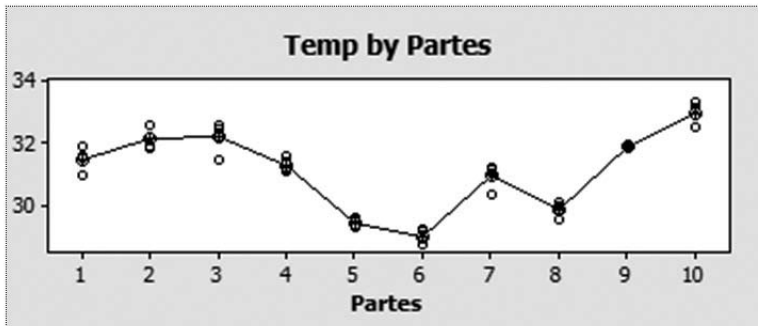
**Figura 3.** Gráfico de control de medias para identificar variaciones entre personas

El gráfico de rangos (Figura 4) se basa en el desempeño de los operadores. Si alguno de los operadores cae fuera de los límites significaría que él/ella difiere del método de medición de los demás operadores. Si todos los operadores involucrados caen fuera de los límites, entonces significaría que el sistema de medición es sensible a la técnica de los operadores para medir, y que necesita mejorarse con el fin de obtener datos útiles. En este caso en particular existe evidencia significativa para afirmar que no hay diferencia entre el método de medición del operador A y el operador B, como se muestra en la figura 4.

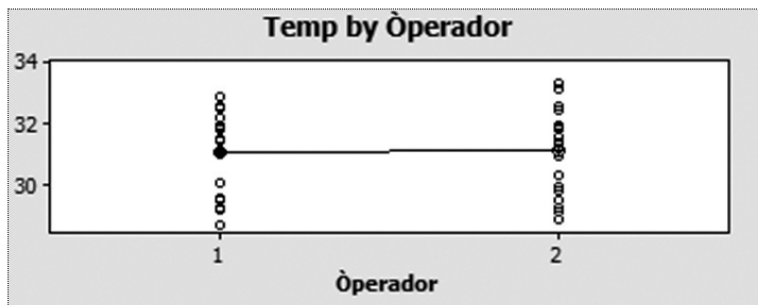


**Figura 4.** Gráfico de rangos para identificar variaciones entre operadores

De manera paralela, los gráficos parte-parte (persona-persona), operador e interacción parte-operador no contienen información adicional que no haya sido explicada por los gráficos anteriores, y cada uno de ellos se muestra en la figura 5, 6 y 7.



**Figura 5.** Gráfico de temperaturas entre personas.



**Figura 6.** Gráfico de variación de operadores.

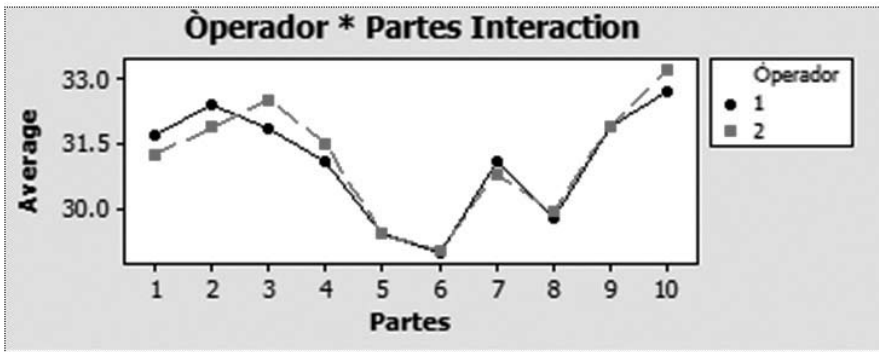


Figura 7. Gráfico de interacción operador-persona (operador - parte)

Siguiendo con la metodología planteada, los resultados del experimento 2 muestran lo siguiente: en la figura 8 podemos apreciar cómo la variabilidad total del sistema se encuentra ocupada por el componente parte-parte, ocupando un 98.96%. De manera que podemos mencionar que el sistema es capaz de distinguir entre las temperaturas de las personas de manera significativa. Por otro lado, podemos decir que la repetibilidad, que en el experimento uno consumía el total del componente R y R, con el 21.66% se redujo a un 9.39%, pero aumentando en reproducibilidad un poco de 0% a un 3.97%, lo cual nos hace validar que las mismas condiciones de capacitación de los operadores al operar el instrumento de medición se mantienen. Es, entonces, que no existe evidencia estadísticamente significativa que apoye el hecho de que exista diferencia en el uso del instrumento (termógrafo) entre los operadores A, B y C para este experimento.

Para este estudio en particular obtuvimos un 10.19% para el criterio de aceptación o rechazo del sistema de medición que se ha utilizado. Haciendo un comparativo podemos declarar que de un 21.66% a un 10.19% se redujo el componente en más de un 100%, produciendo con el aumento de operadores y número de réplicas según la literatura, una eficiencia importante en los resultados. Un 10.19% conlleva deducir que estamos trabajando en un sistema de medición aceptable para la aplicación diseñada. Cabe mencionar que la literatura establece que un porcentaje abajo del 10% significaría estar trabajando en un sistema de condiciones excelentes, por lo cual se presume que si ciertas condiciones como la temperatura ambiente del cuarto y la vestimenta de las personas (partes) fuera controlada, se podría reducir aún más el porcentaje obtenido en esta prueba del 10.19% para el componente R y R.

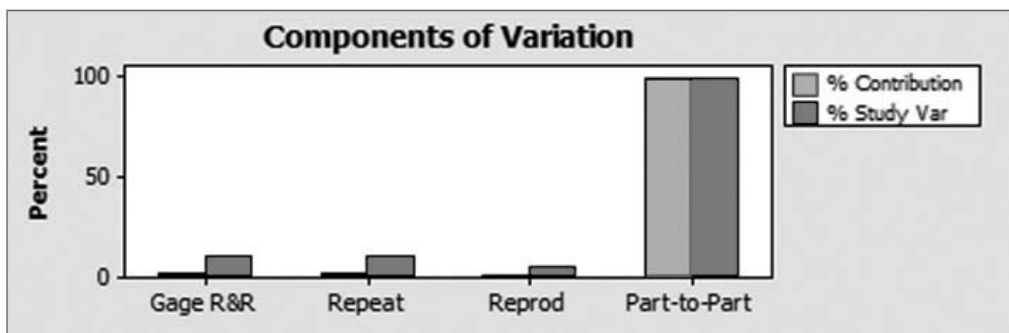
Gage R&R Study - XBar/R Method				
%Contribution				
Source	VarComp	(of VarComp)		
Total Gage R&R	0.01216	1.04		
Repeatability	0.01031	0.88		
Reproducibility	0.00184	0.16		
Part-To-Part	1.15837	98.96		
Total Variation	1.17053	100.00		
Study Var %Study Var				
Source	StdDev (SD)	(6 * SD)	(%SV)	
Total Gage R&R	0.11026	0.66156	10.19	
Repeatability	0.10156	0.60933	9.39	
Reproducibility	0.04294	0.25764	3.97	
Part-To-Part	1.07628	6.45765	99.48	
Total Variation	1.08191	6.49145	100.00	
Number of Distinct Categories = 13				

Figura 8. Resultados estudio R y R del experimento dos, por el método de medias y rangos

Con respecto al número de categorías, en el estudio anterior se obtuvieron 6, lo cual significaba una suficiente evidencia para considerar al sistema de medición como válido, pero con reservas. Para este caso, el número de categorías se incremento considerablemente, volviendo a reiterar que se siguieron las condiciones que establece como óptimas la literatura revisada. En resumen, las 13 categorías obtenidas en este estudio significan que el sistema será capaz de trabajar bajo diferentes condiciones de temperatura, pudiendo detectar cada una de ellas; es decir, si las temperaturas de una persona son más cálidas o calientes que otras más frías, el instrumento es capaz de adaptarse a las condiciones de contacto e identificar temperaturas en otros niveles.

Deben establecerse para el estudio de R y R las condiciones de operación del instrumento y sus tolerancias. Si un instrumento de medición sólo es probado en algunas condiciones de su diseño, éste no podrá ser totalmente confiable, ya que puede ser que bajo ciertas condiciones de operación sea excelente, pero bajo otras (que están en especificación) tenga un desempeño muy pobre. Además, cabe resaltarse que si un instrumento de medición se corre fuera de especificación, buscando ampliar el espectro, podría darse el caso que también el componente de R y R; es decir, que se expanda junto con él.

La figura 9 proporciona información gráfica respecto a los resultados mostrados en la figura 8, donde claramente se puede apreciar que la variación total del estudio se encuentra explicada por la variabilidad parte-parte, es decir, por la variación que causan las temperaturas entre las personas, lo que para efectos de validación al aplicar esta herramienta es bueno, dado que el espectro de variación es amplio y el instrumento de medición trabaja entre diferentes tipos de temperaturas presentadas por las personas. Además, se puede mencionar que del componente de R y R total, la repetibilidad ocupa gran mayoría del componente, mientras que la reproducibilidad solo una pequeña parte. Un 9.39% y un 3.97% para la repetibilidad y la reproducibilidad, respectivamente, nos hacen ubicarnos, como ya se mencionó, a un sistema de medición muy cercano a los límites de la excelencia acorde a la literatura, lo cual abre áreas de oportunidad de mejora en factores que pudieran controlarse para disminuir aún más el porcentaje del componente R y R.



**Figura 9.** Gráfico de los componentes de variación

La figura 10 se basa en el desempeño de los operadores. Si alguno de los operadores cae fuera de los límites, significaría que él/ella difiere del método de medición de los demás operadores. Si todos los operadores involucrados caen fuera de los límites, entonces significaría que el sistema de medición es sensible a la técnica de los operadores para medir y que necesita mejorarse con el fin de obtener datos útiles.

En este caso particular de la experimentación realizada con 3 operadores, podemos apreciar que dos puntos de los 4 que están fuera del límite superior se encuentran alejados del límite.

Por lo tanto, los dos restantes se encuentran muy cercanos a estar dentro del intervalo de control, por lo cual podemos afirmar que existe evidencia significativa que respalda que los 3 operadores cuentan, según los datos, con la misma capacitación para el uso del instrumento de medición; es decir, los métodos de medición entre los operadores A, B y C no difieren de manera que pudiera afectar en gran medida al sistema de medición.

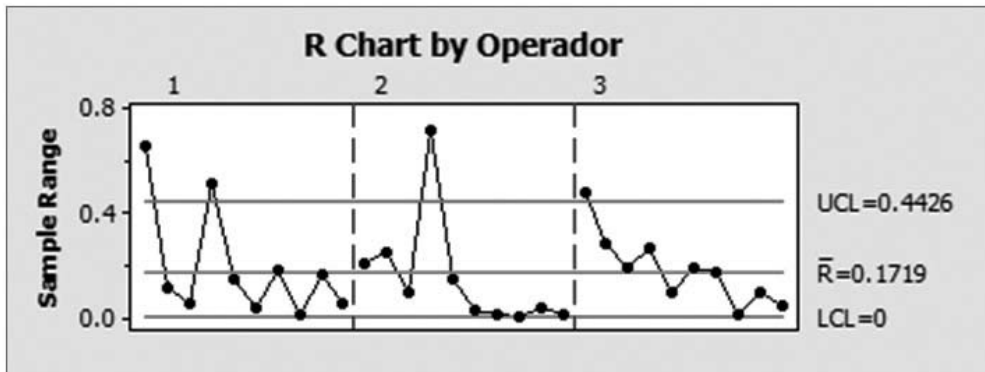


Figura 10. Gráfico de variaciones entre los operadores

La figura 11 muestra con claridad que el instrumento de medición es capaz de identificar las diferencias entre las temperaturas de las partes, dado que todos los promedios se encuentran fuera de los límites de control establecidos por Minitab®15 acorde a los datos de la experimentación, recordando que llamamos partes en este experimento a las personas involucradas, de las que fueron requeridas las temperaturas para el estudio de R y R. Cabe destacar que cuando los promedios se encuentran en la mayoría dentro de los límites, se establece que el instrumento de medición es inadecuado e incapaz de detectar variaciones entre las partes medidas.

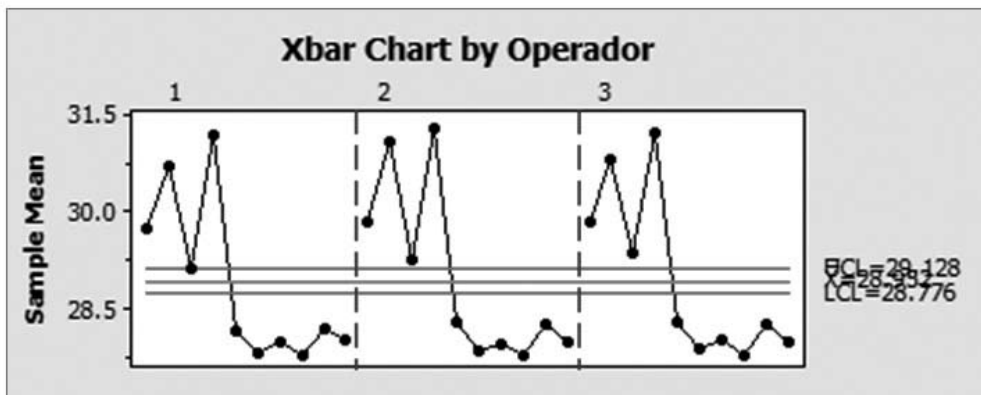


Figura 11. Gráfico de variaciones de temperaturas entre personas

Los gráficos de las figuras 12, 13 y 14 muestran información adicional que respalda los resultados presentados en la figura 8, 9, 10 y 11. Sin embargo, éstas no presentan nueva evidencia que sea necesaria para sacar las conclusiones de la experimentación respecto a la validación del sistema de medición.

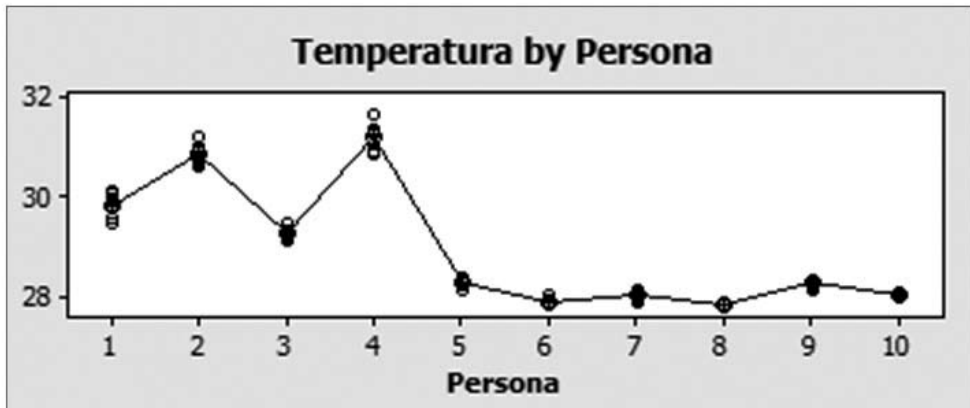


Figura 12. Gráfico de temperaturas por persona

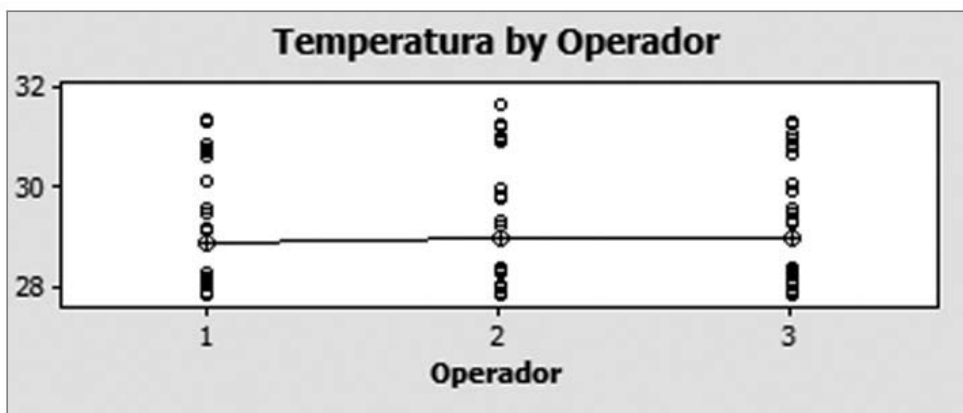


Figura 13. Gráfico de temperaturas por operador

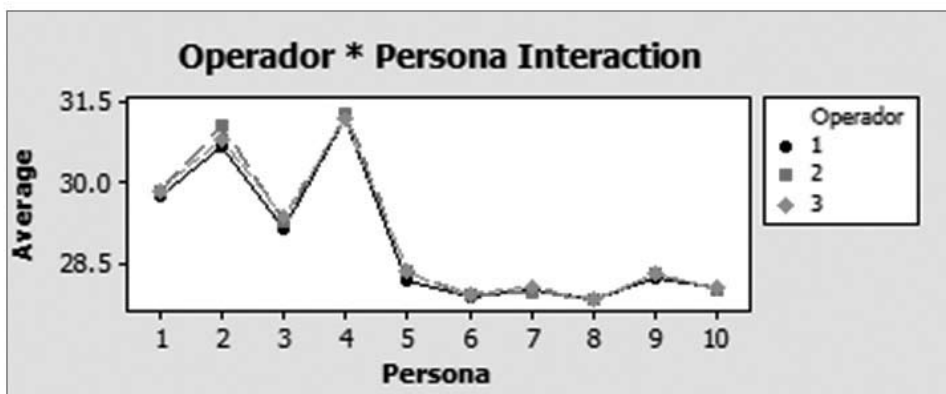


Figura 14. Gráfico de interacción operador-persona  
Fuente: propia

## CONCLUSIONES

Los resultados arrojados en esta experimentación para la validación del sistema de medición concluyen que, a través de un estudio R y R de medias y rangos, es posible validar el sistema de medición utilizado en la obtención de temperaturas de sujetos controlados en el proceso de experimentación, para la detección de desórdenes de trauma acumulados con la ayuda de un termógrafo sensorial como instrumento de medición.

Se concluye que, de acuerdo a los experimentos llevados adelante de 2 operadores con 2 réplicas (experimento 1) a 3 operadores con 3 réplicas (experimento 2), se obtuvo evidencia significativa de un 21.66% a un 10.19%, respectivamente, que hacen confiar en nuestro sistema de medición para los fines que fue diseñado el instrumento de medición y la capacitación en dicho instrumento a los operadores al obtener las lecturas de temperaturas. Un 10.19% nos hace concluir que nuestro sistema de medición es un sistema que puede considerarse excelente. Creemos que controlando otra serie de factores como la temperatura ambiente y la vestimenta de las personas (partes), pudiera reducirse más el componente R y R, viendo lo anterior como oportunidades de mejora al sistema de medición. Por otra parte, se concluye que la mayoría de la variabilidad en el sistema de medición es explicada por la variación entre las partes, lo cual es idóneo, con un 99.48%. Asimismo podemos inferir que, al tener 13 categorías como resultado en el experimento 2 habla esto de que el instrumento de medición es específico y minucioso a la hora de identificar diferencias entre las temperaturas.

También, en el experimento 2, pudimos detectar que la repetibilidad (9.39%) en este caso es mayor que la reproducibilidad (3.97%); en adición a lo anterior, podríamos sugerir mantenimiento al instrumento de medición como una alternativa de mejora; pero, debido a que el instrumento de medición contaba con el mantenimiento adecuado, podemos concluir que el hecho de tener esta situación es debido a que existe una excesiva variabilidad entre las partes, lo cual, al estar trabajando bajo estas condiciones de operación, siguiendo el protocolo y tomando en cuenta que trabajamos con temperaturas cutáneas de personas vivas, es inevitable tal variabilidad.

Por lo tanto, podemos agregar a las conclusiones anteriores que con un 10.19% nuestro sistema de medición es adecuado y satisfactorio para la aplicación diseñada, y dada la cercanía a un nivel de excelencia del sistema de medición.

Se recomienda, en estudios futuros, experimentos que busquen mejorar las condiciones ambientales del cuarto donde fue llevado a cabo el estudio R y R. Un cuarto de control de temperatura ambiental sería lo más adecuado, y proponer un cierto tipo de vestimenta para los sujetos controlados (personas ó partes) en el estudio. Se tiene la hipótesis de que con estas mejoras propuesta se podría reducir un poco más el porcentaje de aceptación de un 10.19% a un nivel más bajo. También se recomienda hacer un análisis comparativo con el método ANOVA con respecto al analizado en este artículo, para proponer cuál de estos métodos es mejor o brinda mejores resultados para esta investigación.

## REFERENCIAS

- AIAG, Automotive Industry Action Group. (2002).** *Measurement Systems Analysis*. 3rd Edition.
- Breyfogle, III W. Forrest. (2003).** *Implementing Six Sigma; Smarter solutions using statistical methods*, Second edition, pp. 306-322, ISBN 0-471-26572-1.
- Ferreira José J.A., Mendonça Lorena C.S., Nunez Luiz A. O. Andrade Filho Antonio C.C., Rebelatto José R., Salvini Tania F. (2008).** Exercise Associated Thermographic Changes in Young and Elderly Subjects, *Annuals of Biomedical Engineering*, 36, 1420-1427.
- Gold Judith, Cherniack Martin, Hanlon Alexandra, T. Dennerlein, Dropkin Jonathan. (2009).** *Skin temperature in dorsal hand of office workers and severity of upper extremity musculoskeletal disorders*, *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 82:1281-1292.
- Gorman, D., Bower, K. M. (2002).** Measurement System Analysis and Destructive Testing. *Six Sigma Forum Magazine*, 1(4), 16-19.
- Gulyaev, Y. V., Markov, A. G., Koreneva, L. G., Zakharov, V. (1995).** Dynamical infrared thermography in humans., *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.* 14:766–770.
- Harding, J. R. (1998).** Investigating deep venous thrombosis with infrared imaging *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.* 17, 43-46.
- López B, RO. (1992).** Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Termógrafo digital submarino, *Instrumentación y Desarrollo*, 3 (2)
- Madding, RP. (1979).** Thermographic Instruments and Systems, University of Wisconsin, Dept. of Engineering & Applied Science.
- Montgomery, D.C., Runger, G.C. (1993).** Gauge Capability and Designed Experiments: Part I: Basic Methods, *Quality Engineering*, 6 (1), 115-135.
- Putz - Anderson, V. (1988).** Cumulative Trauma Disorders, Ed. Taylor and Francis.
- Raffaldi, J. W. K. (2005).** *Quality An Introduction to Gage R&R*, pp. 24-26.
- Salvendy, G., Sommerich, M. C., Marras H, V.S., Karwowski, W. (2006).** Work related upper extremity musculoskeletal disorders. In. *Handbook of human factors and ergonomics*, chapter 31, (3<sup>a</sup>. Edition Ed.) Ed. John Wiley & Sons, Inc.
- Sánchez L, J., De la Riva R, J., Hajar R, H. (2008).** El efecto de la selección de la muestra en la evaluación del sistema de medición con pruebas destructivas, 1er. Congreso de Investigación Ciudad. Juárez, Chihuahua, Mexico.
- Vainer, B.G. (2005).** FPA-based infrared thermography as applied to the study of cutaneous perspiration and stimulated vascular response in humans. *Phys. Med. Biol.* 50:R63–R94.