

ANÁLISIS TERMOGRÁFICO EN EXTREMIDADES SUPERIORES DE VARONES DURANTE UNA TAREA REPETITIVA A DOS RITMOS DE TRABAJO: ESTUDIO EXPERIMENTAL

MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ-ONTIVEROS

<https://orcid.org/0000-0001-9377-9639>

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco,
Departamento de Sistemas, Ciudad de México, México

ENRIQUE ÁVILA-SOLER*

<https://orcid.org/0000-0001-8980-0925>

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco,
Departamento de Sistemas, Ciudad de México, México

MARTHA HANEL GONZALEZ

<https://orcid.org/0009-0000-7969-4583>

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco,
Departamento de Sistemas, Ciudad de México, México

JESÚS LOYO-QUIJADA

<https://orcid.org/0000-0002-2713-723X>

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco,
Departamento de Sistemas, Ciudad de México, México

Recibido: 21 de febrero del 2024 / Aceptado: 18 de marzo del 2024

Publicado: 12 de junio del 2024

doi: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2024.n046.6977>

RESUMEN. El estudio analizó el comportamiento musculoesquelético de cinco operadores mientras realizaban una tarea repetitiva en una estación experimental, con el fin de prevenir accidentes y enfermedades laborales a corto, mediano y largo plazo. Se

Este estudio no fue financiado por ninguna entidad.

* Autor corresponsal.

Correos electrónicos en orden de aparición: mlopez@azc.uam.mx; eas@azc.uam.mx; mhanel@azc.uam.mx; lqj@azc.uam.mx

Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

utilizó termografía infrarroja para monitorear las temperaturas y se enfocó en áreas específicas del brazo de los cinco trabajadores. A ritmo normal, se observó mayor actividad muscular en codo, antebrazo y hombro, y con menor impacto en mano y brazo. Al aumentar el ritmo, se intensificó la actividad en mano, hombro y codo, mientras que antebrazo y brazo mostraron menor actividad. Los resultados indican que la termografía es útil para identificar niveles de actividad muscular, lo que ayudaría a prevenir lesiones. Además, se observó que los operadores aumentaron su producción de ensamblaje de piezas de la siguiente manera: 1(+64), 2(+26), 3(+62), 4(+3) y 5(+52).

PALABRAS CLAVE: termografía médica / brazos / heridas y lesiones / seguridad industrial / tareas repetitivas

THERMOGRAPHIC ANALYSIS OF UPPER LIMBS OF MALES DURING A REPETITIVE TASK AT TWO WORK RHYTHMS: EXPERIMENTAL STUDY

ABSTRACT. The study analyzed the musculoskeletal behavior of five operators while performing a repetitive task at an experimental station to prevent workplace accidents and illnesses in the short, medium, and long term. It used infrared thermography to monitor temperatures, focusing on specific areas of the arm of the five workers. Workers showed greater muscle activity in the elbow, forearm, and shoulder at an average pace, with less impact on the hand and upper arm. When the pace increased, activity intensified in the hand, shoulder, and elbow, while it decreased in the forearm and upper arm. The results indicate that thermography helps identify levels of muscle activity, which could help prevent injuries. The study also showed that the operators increased their assembly production as follows: 1(+64), 2(+26), 3(+62), 4(+3), and 5(+52).

KEYWORDS: medical thermography / arm / wounds and injuries / industrial safety / repetitive Tasks

1. INTRODUCCIÓN

Las tareas repetitivas se definen como la realización continua de ciclos de trabajo similares. Además, se considera un trabajo repetitivo cuando su ciclo es menor a treinta segundos o cuando el trabajo fundamental del ciclo constituye más del 50 % de su tiempo total, independientemente de su duración (Kilbom, 1994a). Asimismo, los factores como la frecuencia y repetición de movimientos, uso de la fuerza, posturas y movimientos, así como la distribución de periodos de descanso, son factores de riesgo que caracterizan a este tipo de movimiento (Colombini, 1998).

Este tipo de tareas son desarrolladas por operarios en las líneas de ensamble y su alta repetitividad suele conducir a lesiones muscoesqueléticas en la muñeca, codo, hombro o espalda, por lo que es importante su vigilancia (Colombini, 1998; Manville et al., 2016). Estos trastornos son de los problemas globales de salud más importantes y costosos que afectan a la población trabajadora (López et al., 2014). Por ejemplo, en México, las lesiones muscoesqueléticas son de las primeras causas de morbilidad de acuerdo con estadísticas del Instituto Mexicano del Seguro Social (Das et al., 2020).

La evaluación y el estudio de las tareas repetitivas en las estaciones de trabajo son de suma importancia para prevenir o disminuir las lesiones muscoesqueléticas de los trabajadores. Por tal motivo, la prevención de estas lesiones es una alternativa para la reducción de costos por ausencias laborales, así como para la disminución de impactos sociales y económicos en la vida de los trabajadores y de las compañías (Selfe et al., 2006).

Para la evaluación de los impactos de las tareas repetitivas en los trabajadores se han desarrollado y aplicado técnicas y metodologías generales que incluyen factores ergonómicos para disminuir la probabilidad de las lesiones. Estas técnicas actúan de manera preventiva en las estaciones de trabajo, lo que mejora el desempeño de los trabajadores y la funcionalidad sus estaciones de trabajo (Ring & Ammer, 2012; Soares et al., 2020). Por otro lado, existe un conjunto de métodos comunes que evalúan la carga muscoesquelética y los riesgos de desarrollar lesiones muscoesqueléticas, los cuales determinan valores de entrada de la carga externa e interna en las distintas partes del cuerpo (Sousa et al., 2017).

Para la evaluación de tareas repetitivas en las extremidades superiores, los métodos *occupational repetitive actions* (OCRA), *strain index* (SI) y *upper limb risk assessment* (ULRA) utilizan parámetros como la duración del ciclo de trabajo, las fases del ciclo y la fuerza relativa aplicada en cada fase del ciclo (Sousa et al., 2017). Para la evaluación de tareas repetitivas en extremidades superiores, se han desarrollado protocolos de experimentación que analizan los efectos de factores de repetitividad como el ritmo de trabajo, la dificultad de los ciclos y el trabajo desarrollado en cada ciclo con el objetivo de

reducir las lesiones muscoesqueléticas (Faust et al., 2014). Otros protocolos se centran en el ciclo y la frecuencia como factores que permiten evaluar el trabajo aplicado en cada ciclo y la fuerza que aplican las extremidades superiores del cuerpo (Ng, 2009).

Por otro lado, la termografía infrarroja es una técnica no invasiva que captura imágenes térmicas para mostrar los patrones de temperatura en la piel. Se ha convertido en una herramienta vital en la medicina desde la década de 1960 que se ha utilizado para diagnosticar una variedad de condiciones médicas, como el cáncer de mama, problemas vasculares relacionados con la diabetes y trastornos musculares. Asimismo, la termografía ha podido aplicarse en el ámbito deportivo, lo que ha permitido el estudio de la termorregulación durante y después del ejercicio, y en el ámbito laboral, donde se emplea para evaluar cambios de temperatura en trabajadores que padecen lesiones o que están expuestos a esfuerzos repetitivos (Al-Nakhli et al., 2012; Bartuzi et al., 2012; Camargo et al., 2012; Dul et al., 2012; Ferreira et al., 2008; Flores-Olivares et al., 2015; Gold et al., 2004; Hollnagel, 2014; Lasanen et al., 2018; Magas et al., 2019; Merla, et al. 2010; Navidi, 2006; Ríos et al., 2011; Roman-Liu, 2014; Santos et al., 2016; Symons et al., 2015; Vardasca et al., 2012; You & Kwon, 2005; Zaproudina et al., 2006).

Los estudios han demostrado que la termografía infrarroja es capaz de identificar trastornos musculoesqueléticos y anormalidades termorreguladoras biológicas que afectan la temperatura de la piel (Camargo et al., 2012; Symons et al., 2015). También se ha utilizado para detectar fatiga, dolor muscular, estrés y esfuerzo muscular en el entorno laboral (Dul et al., 2012; Hollnagel, 2014; Roman-Liu, 2014). Además, se ha aplicado en la valoración de esfuerzos constantes, como en el seguimiento de la temperatura en la espalda baja de un baterista para modificar su estación de trabajo, o en la evaluación de posibles lesiones musculoesqueléticas en trabajadores de la industria textil (Ferreira et al., 2008; Flores-Olivares et al., 2015; Navidi, 2006). Sin embargo, es importante destacar que la mayoría de los estudios se han centrado en movimientos repetitivos de extremidades superiores, especialmente en manos y muñecas, y bajo un solo ritmo de trabajo (Camargo et al., 2012; Gold et al., 2004; Navidi, 2006; You & Kwon, 2005).

Entonces, frente a todo lo anterior, la contribución del presente trabajo se centra en reconocer los cambios de temperaturas en las distintas zonas de las extremidades superiores en operarios varones al desarrollar el ensamble de piezas o tareas repetitivas con dos ritmos de trabajo, durante una hora. Esto nos permite plantear las siguientes preguntas: ¿Cuál es el comportamiento de las temperaturas en los operarios al realizar tareas repetitivas a dos ritmos de trabajo? ¿Las partes involucradas trabajan de la misma manera cuando el ritmo acelera?

En el análisis, cada operario realizó la tarea a un ritmo de trabajo normal y, posteriormente, a ritmo acelerado. Esto permitió mostrar con diferenciales la temperatura de las zonas de mayor trabajo y cuáles serían susceptibles de sufrir lesiones

musculoesqueléticas, así como el impacto del cambio de ritmo en la tarea, lo cual no es posible de evaluar a simple vista. En ese sentido, el problema en el estudio proviene de la variabilidad en las temperaturas y su efecto en las partes del brazo de los operarios cuando se enfrentan a ritmos de trabajo normal y acelerado en tareas repetitivas de ensamblaje. Esta situación se justifica por la necesidad de recabar datos para proponer elementos cruciales en la toma de decisiones a corto, mediano y largo plazo en relación con las condiciones laborales.

La investigación evidencia beneficios de confiabilidad y posibles oportunidades de aplicaciones en otros sectores industriales. Por ello, la importancia de la investigación se debe a que la termografía es una herramienta de alta precisión que propone un análisis innovador que genera diferentes usos, como el diagnosticar temperaturas relacionadas con sintomatologías de enfermedades e instrumento de medida en la industria.

Las implicaciones de índole industrial y gerencial en el estudio se orientan a la búsqueda de los costos totales de una organización, dado que a partir de la parte técnica se generan propuestas que previenen y predicen accidentes a causa de la fatiga y enfermedades profesionales a partir de las condiciones de trabajo, como el ritmo de trabajo, estación de trabajo, tiempo, entorno y la experiencia. En suma, los resultados del presente trabajo pueden ser de interés para determinar un método de prevención temprana de lesiones musculoesqueléticas a partir de descansos y cambios de intensidades de ritmos.

2. METODOLOGÍA

Los operarios en el estudio fueron participantes voluntarios no expertos, aleatoriamente invitados, quienes son miembros de la comunidad académica de la Universidad Autónoma Metropolitana. Participaron en la prueba cinco hombres: tres jóvenes (de 21 a 24 años) y dos adultos (de 42 a 47 años). En todos los casos hubo consentimiento informado. Previo al estudio se entrevistó a cada uno de ellos para conocer si padecían alguna lesión musculoesquelética y ninguno reportó lesiones ni problemas musculoesqueléticos. Los cinco individuos reportaron dominancia de la mano derecha.

En una reunión previa, los participantes fueron citados individualmente para mostrarles la estación de trabajo, explicarles la secuencia de la tarea, la cual fue practicada durante cinco minutos. Durante estas reuniones no se registró ningún tiempo. Antes de realizar las pruebas, los participantes se mantuvieron en reposo durante veinte minutos, tiempo estimado para estabilizar la temperatura corporal (Kilbom, 1994a). Durante las pruebas, los operarios portaron camisetas de algodón y realizaron la actividad en una estación de trabajo diseñada para que estuvieran sentados. Todo esto aseguró condiciones estandarizadas para los participantes, lo que garantizó la equidad

en el proceso de evaluación. En las entrevistas y reuniones con los participantes no se encontraron razones para considerarlos inapropiados para la prueba.

El estudio se validó con herramientas cualitativas y cuantitativas. Las primeras se utilizaron por medio del análisis conductual termográfico; las segundas, con las técnicas estadísticas de medidas de tendencia central, que son números que definen el valor alrededor, en el cual se concentran los datos y se componen de tres partes. (1) La media aritmética, que representa la suma de los números en la muestra, dividido entre la cantidad total de números que hay, también llamada promedio. (2) La varianza es la suma de los cuadrados de las distancias entre la media; y cada elemento de la población se divide entre el número total de observaciones en población. (3) La desviación estándar es una cantidad que mide el grado de dispersión en una muestra (Govindu & Babski-Reeves, 2012). Finalmente, (4) la mediana es aquella que no se ve tan afectada por valores extremos o distribuciones no normales. Además, ofrece una estimación más confiable de la tendencia central en muestras reducidas, lo que asegura resultados más sólidos y confiables en el análisis estadístico.

Además, dada la pequeña muestra y las posibles limitaciones relacionadas, se complementó el análisis estadístico con enfoques adicionales tanto cualitativos como cuantitativos. Por ejemplo, se empleó el análisis conductual termográfico mencionado, lo que proporcionó una comprensión más completa de los datos y ayudó a compensar las limitaciones asociadas al tamaño de la muestra en nuestro análisis estadístico.

Las unidades manejadas en este estudio fueron deltas, debido a que permiten representar las variaciones, incrementos y decrementos en las partes del brazo de manera clara y precisa. El uso de tal unidad de medida simplifica la identificación y comprensión de los cambios observados y mejora la interpretación de los resultados.

La ejecución de la tarea se realizó en una estación de trabajo como se muestra en la Figura 1. La estación estuvo configurada por una mesa de trabajo de 110 x 65,5 cm² con un descanso para los pies, dos entrepaños frontales con cinco contenedores de plástico de 17 x 12 cm², una silla de trabajo giratoria, con capacidad para ajustar la altura del asiento e inclinación del respaldo, lo que permitió brindar una mayor comodidad a los participantes. Las pruebas se desarrollaron a una temperatura de 17 °C con una humedad de 34 % HR. El área donde se instaló la estación de trabajo estaba aislada de corrientes de aire y de cambios bruscos de temperatura.

Figura 1

Estación de trabajo experimental

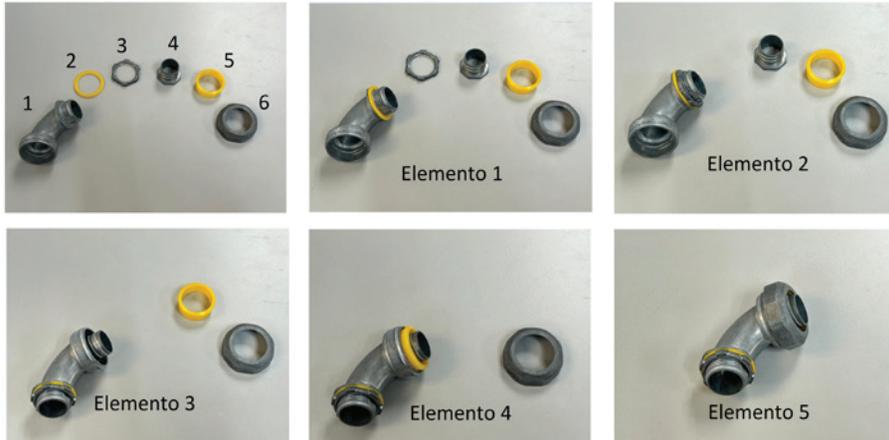


El registro de temperatura empleó una cámara termográfica FLIR de la serie E40 con certificado de calibración de origen. El rango de temperatura fue de 20 °C a 650 °C, la sensibilidad térmica fue menor a 0,07 °C a 25 °C, la resolución (IR) fue de 160 x 120, la frecuencia de imagen fue de 60 Hz, el rango espectral fue de 7,5 a 13 μm y se utilizó un cronómetro. El *software* utilizado para el análisis de datos fue el FLIR Quick Report Version 1,2. Un termómetro digital con sensor de temperatura, tuvo como rango de temperatura externa de -50 °C a 90 °C y humedad de 10 % a 99 % no condensada.

El conector eléctrico (Ce) hermético utilizado en el protocolo de experimentación es de la marca comercial Volteck, el cual es curvo de 90° y de 3/4 de pulgada de diámetro, fabricado en material zamak, con certificado de calidad UL 514B. El peso aproximado ensamblado es de 100 gr y está compuesto por seis partes: (1) codo con rosca externa triangular en ambos extremos, (2) arandela de plástico, (3) tuerca metálica delgada, (4) capucha metálica, (5) capucha plástica y (6) tuerca metálica gruesa (véase la Figura 2). Asimismo, la secuencia del armado del conector comprende cinco elementos, los cuales se exponen en los siguientes tipos de ensambles: (1) arandela de plástico, (2) tuerca metálica delgada, (3) capucha metálica, (4) capucha de plástico y (5) tuerca metálica gruesa (véase la Figura 2).

Figura 2

Ensamble del conector eléctrico



El protocolo de experimentación se realizó en el Centro Integral de Formación e Investigación de Ingeniería Industrial (CIFII) de la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Las condiciones ambientales del estudio fueron en una temperatura ambiente de 23,2 °C, con una humedad de 49 % y con iluminación artificial

Los operadores realizaron el ensamble del Ce durante una hora a un ritmo normal y acelerado en momentos distintos. En cada una de estas pruebas, se tomaron las imágenes termográficas antes de iniciar la tarea repetitiva, desde el minuto 0 e iniciada la tarea en los minutos 15, 30, 45 y 60 para la parte frontal y trasera de ambos brazos. En este sentido, para los brazos, se midieron temperaturas en las cuatro zonas siguientes: (1) derecha frontal, (2) derecha trasera, (3) izquierda frontal e (4) izquierda trasera (véanse las figuras 3 y 4).

Figura 3

Temperatura brazo derecho frontal

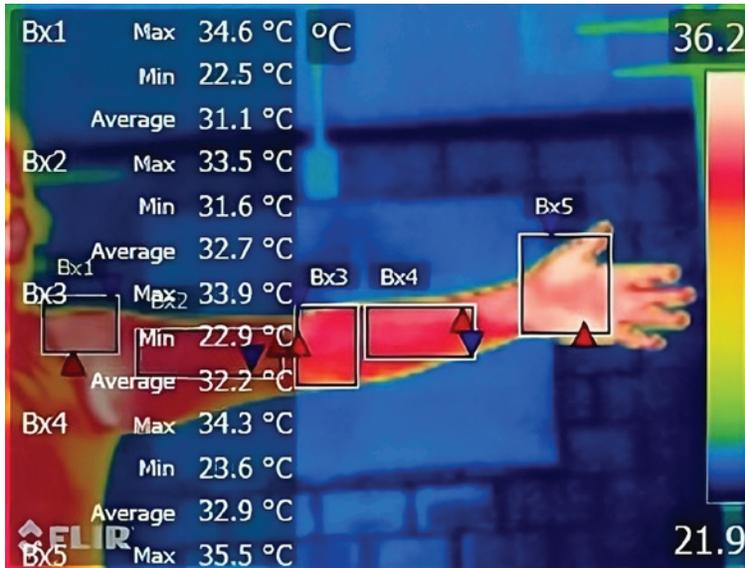
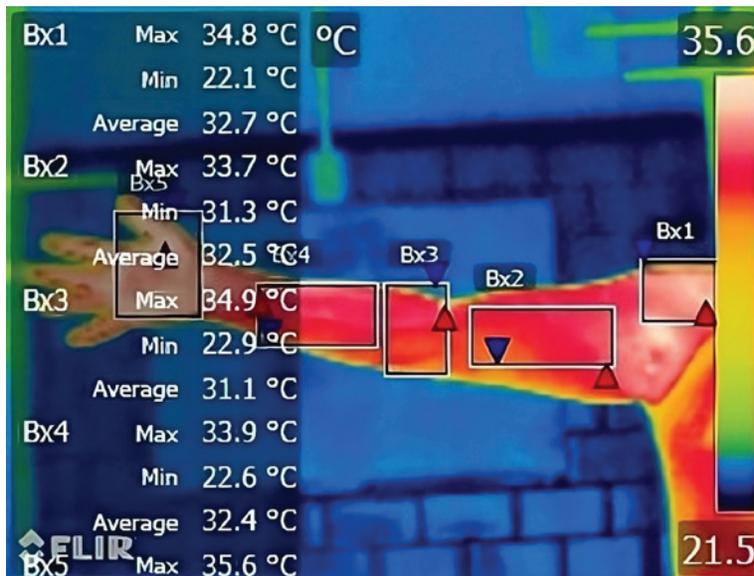


Figura 4

Temperatura brazo derecho trasera



En estas cinco zonas se monitorearon las temperaturas de las siguientes partes: hombro, brazo, codo, antebrazo y mano. Posteriormente, se calcularon las deltas de la temperatura para cada una de estas partes con base en la temperatura de la fotografía tomada en el momento antes de iniciar las tareas repetitivas y las temperaturas registradas en la fotografía en el minuto 60, cuando el operario realizó el esfuerzo más prolongado.

El cálculo las deltas de temperatura (Dt) de las partes del brazo se obtuvieron con la ecuación 1:

$$\text{Delta} = \text{Temperatura}_{(\text{minuto } 60)} - \text{Temperatura}_{(\text{minuto } 0 \text{ o inicial})} \quad (1)$$

Donde:

t: temperatura de parte del brazo a medir.

Lo siguiente es graficar cada una de las partes del brazo con el propósito de deducir los compartimento visuales crecientes o decrecientes considerando lados, posición y ritmo de trabajo. Esta información define el resultado; sin embargo, es necesario poder aplicar herramientas adicionales, como la estadística, en las siguientes etapas: la media (Me), mediana (Med), varianza (Va) y desviación estándar (De). Además, se deben contrastar los cambios en las partes del brazo con respecto al ritmo de trabajo, así como comparar estas variaciones contra diferentes métodos en términos porcentuales (véanse las ecuaciones 2-5).

El valor de la Me se calcula con la ecuación 2.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2)$$

Donde:

Me: Promedio de las muestras

X_1, \dots, X_n : Una muestra

n: Número de datos

Por otro lado, el valor de la Med se calcula con la ecuación 3:

$$\text{Med} = \frac{(n+1)}{2} \quad (3)$$

Asimismo, la Va se calcula con la ecuación 4:

$$S^2 = \frac{(X_1 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (4)$$

Donde:

S^2 : Es la Va, la media

$X_1, X_2 \dots X_n$: Es una muestra de observaciones

La De se calcula con la ecuación 5:

$$S = \sqrt{\frac{1}{1-n} (\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2)} \text{ o } S = \sqrt{S^2} \quad (5)$$

En el contraste de las partes de brazo al cambio de ritmo de trabajo, se tiene que identificar los cambios sufridos por la actividad en términos de las áreas específicas impactadas y en números de manera porcentual.

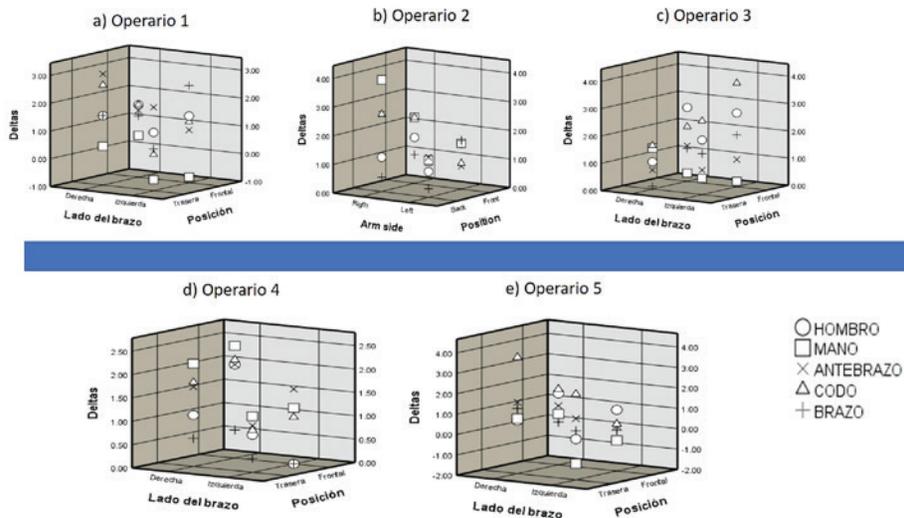
3. RESULTADOS

En términos generales, los cinco operarios sufrieron cambios de temperatura en las partes del brazo al ejecutar tareas repetitivas en los ritmos de trabajo normal y acelerado. Las zonas con Dt más significativas fueron el codo, el antebrazo y la mano. Las Dt más altas representaron el parámetro cuantitativo que definió el nivel y área de impacto. El Codo estuvo por encima de los 2 °C, el antebrazo y la mano variaron entre 1 °C y 2° C. Sobre la base de las Dt, las zonas determinadas que mayor trabajo reportaron fueron el codo y antebrazo.

Se analizaron las imágenes termográficas del ensamble a ritmo normal (RN) y se dedujo que el estudio mostró un aumento de temperatura en las zonas de los brazos y la mano de los cinco operarios. La Figura 5 detalla aspectos cualitativos y cuantitativos de las Dt en cuanto al lado y la posición del brazo.

Figura 5

Trabajo repetitivo del brazo a ritmo normal



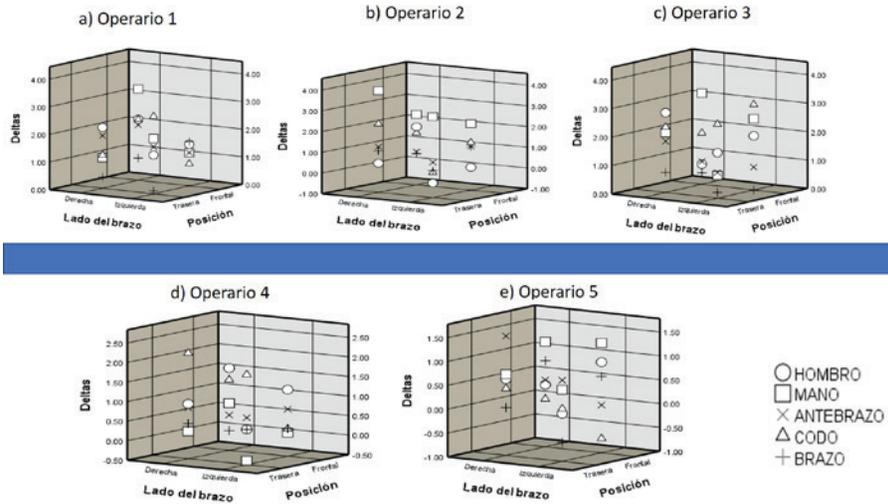
La Figura 6 define el comportamiento del ensamble a RN, por medio de cuatro zonas de las partes del brazo de cada operario y estas son las siguientes:

1. *Derecho trasero*. Las áreas más significativas fueron el codo, el antebrazo y la mano. El codo tuvo Dt por arriba de los 2 °C, el antebrazo y la mano variaron entre 1 °C y 2 °C.
2. *Izquierda trasera*. Las Dt fueron muy pequeñas, por lo que no se considera que hubo un trabajo significativo.
3. *Derecha frontal*. Las Dt más altas registradas en la mayoría de los operarios fueron en el codo con 2 °C.
4. *Izquierda frontal*. La Dt registradas no fueron significativas y los valores fueron variables entre los operarios y registraron en su mayoría entre 1 °C.

La revisión de las imágenes termográficas del ensamble a ritmo acelerado (RA) definió que el estudio mostrara un aumento de temperatura en las zonas de brazos y mano de los cinco operarios. La Figura 6 detalla aspectos cualitativos y cuantitativos de Dt, lado y posición del brazo.

Figura 6

Trabajo repetitivo a ritmo acelerado



La Figura 7 define el comportamiento del ensamble a RA por medio de cuatro zonas de las partes del brazo de cada operario y estas son las siguientes:

1. *Derecho trasero*. Las Dt más altas registradas fueron en el codo y mano con 2 °C.
2. *Izquierda trasera*. Las Dt significativas estuvieron en el codo con un aproximado de 2 °C.
3. *Derecho frontal*. Las Dt más representativas y con mayor número de operarios fueron la mano y el codo con 3 °C y 2 °C.
4. *Izquierda frontal*. La Dt significativa fue la mano con un aproximado de 2 °C.

La otra herramienta que se aplicó en esta investigación fue el análisis estadístico de medidas de tendencia central por medio de las variables Me, Med, Va y De de las partes del brazo (véase la Tabla 1).

Tabla 1

Análisis estadístico de medidas de tendencia central en unidades de deltas

Posición	FDN	FIN	TDN	TIN	FDA	FIA	TDA	TIA	Partes del brazo
Me	1,88	1,34	1,08	0,96	1,32	1,12	1,38	0,62	Hombro
	0,82	1,22	0,78	0,60	0,50	0,70	0,50	0,08	Brazo
	1,94	1,44	2,48	1,46	1,36	0,92	1,68	1,50	Codo
	1,58	0,90	1,92	1,26	0,84	0,76	1,44	0,94	Antebrazo
	1,20	0,34	1,74	0,26	2,16	1,46	1,60	1,16	Mano
Med	1,6	1,4	1,1	0,9	1,6	1,2	0,9	0,4	Hombro
	1,0	1,7	0,6	0,4	0,5	0,6	0,4	0,2	Brazo
	2,0	1,0	2,6	1,2	1,5	0,8	2,2	1,8	Codo
	1,4	0,9	1,7	1,0	0,6	0,8	1,5	0,7	Antebrazo
	0,5	0,2	1,5	0,6	2,4	1,3	1,1	0,8	Mano
Var	0,247	0,958	0,107	0,513	0,627	0,462	1,122	0,712	Hombro
	0,222	1,327	0,317	0,260	0,110	0,430	0,140	0,374	Brazo
	0,083	1,853	0,697	0,953	0,693	1,907	0,727	1,660	Codo
	0,317	0,250	0,872	0,208	0,448	0,223	0,203	0,188	Antebrazo
	1,110	1,088	1,953	1,238	1,373	0,893	2,140	1,683	Mano
De	0,497	0,979	0,327	0,716	0,792	0,680	1,059	0,844	Hombro
	0,471	1,152	0,563	0,510	0,332	0,656	0,157	0,396	Brazo
	0,288	1,361	0,835	0,976	0,832	1,381	0,853	1,288	Codo
	0,563	0,500	0,934	0,456	0,669	0,472	0,451	0,434	Antebrazo
	1,054	1,043	1,397	1,113	1,172	0,945	1,463	1,297	Mano

Nota. FDN: frente derecho normal. FIN: frente izquierdo normal. TDN: trasero derecho normal, TIN: trasero izquierdo normal. FDA: frente derecho acelerado. FIA: frente izquierdo acelerado. TDA: trasero derecho acelerado. TIA: trasero izquierdo acelerado.

La Tabla 1 deduce que los promedios de las Dt en las partes del brazo tienen variabilidad por las posiciones y condiciones a las que son sometidos los operarios por la repetitividad. Las Va y De de las Dt de las partes del brazo son significativamente diferentes, dado que el comportamiento de las temperaturas tiene menor dispersión respecto a la Me muestral, salvo en los casos del hombro (TIA), brazo (FIN, TIA), codo (FIN, FIA, TIA) y mano (FIN, TIN, TDA, TIA), como consecuencia de la compatibilidad entre las Me y la representatividad de los RN y RA.

En cuanto a los contrastes en las partes de brazo al cambio de ritmo de trabajo, se ha identificado que las Dt experimentan variaciones significativas debido a los cambios en el ritmo de trabajo. Estas diferencias se detallan en la Tabla 2, la cual muestra el comportamiento de las Dt al acelerar la operación en distintas partes del brazo.

Tabla 2*Comportamiento de las deltas de ritmo normal a ritmo acelerado de las partes del brazo*

Posición	Lado	Disminución de la temperatura al acelerar la operación	Incremento de la temperatura al acelerar la operación
Frente	Derecho	Hombro, brazo, codo y antebrazo	Mano
	Izquierdo	Hombro, brazo, codo y antebrazo	Mano
Trasera	Derecho	Brazo, codo y antebrazo	Hombro y mano
	Izquierdo	Hombro, brazo, codo y antebrazo	Mano

En la posición frontal, la temperatura disminuye en el hombro, brazo, codo y antebrazo, mientras que aumenta en la mano. En la posición trasera, la temperatura puede disminuir en ciertas áreas del brazo y aumentar en otras, según el lado del cuerpo. Estos cambios sugieren respuestas fisiológicas y biomecánicas específicas del cuerpo humano ante la actividad física intensa o la manipulación de objetos, también a la influencia de factores individuales como la edad, las condiciones de salud de las personas y la fatiga.

En la Tabla 3, se muestra la comparación de la mediana de temperatura entre diferentes posiciones que identifican patrones térmicos que pueden indicar una mayor actividad muscular en ciertas áreas.

Tabla 3*Comparación de la mediana de la temperatura entre posiciones del brazo*

Parte del brazo	Comparación FDN versus FIN	Comparación TDN versus TIN
Hombro	Mayor	Mayor
Brazo	Mayor	Igual
Codo	Mayor	Igual
Antebrazo	Igual	Igual
Mano	Igual	Mayor

Nota. FDN: frente derecho normal. FIN: frente izquierdo normal. TDN: trasero derecho normal, TIN: trasero izquierdo normal. Mayor: indica que la mediana en la posición FDN es mayor que en la posición FIN. Igual: indica que las medianas son iguales entre las dos posiciones. Menor: indica que la mediana en la posición FDN es menor que en la posición FIN.

El análisis de las medianas de temperatura muestra que hay temperaturas mayores en distintas partes del brazo entre posiciones. El hombro y el brazo registran temperaturas mayores en la posición FDN que en FIN, mientras que el codo y el antebrazo muestran poca variación entre TDN y TIN. Sin embargo, la mano presenta temperaturas mayores en TDN que en TIN. Estos resultados destacan la importancia de considerar el confort térmico en entornos laborales para asegurar condiciones adecuadas de trabajo.

Los contrastes porcentuales de las Dt en las partes del brazo cuando se cambia de RN a RA deducen que el impacto porcentual de las Dt en las partes del brazo se producirá cuando se someten el ensamble del Ce al cambio del ritmo de trabajo normal al acelerado. Estos se representan en incremento (>) y decremento (<) (véase la Tabla 4).

Tabla 4

Comportamientos porcentuales de las deltas en las partes del brazo cuando se cambia de ritmo normal a ritmo acelerado

Posición, lado, ritmo del brazo	Hombro	Brazo	Codo	Antebrazo	Mano
FDN-FDA	< 46 %	< 30 %	< 30 %	< 60 %	> 116 %
FIN-FIA	< 32 %	< 54 %	< 80 %	< 28 %	> 92 %
TDN-TDA	> 42 %	< 12 %	< 50 %	< 38 %	> 24 %
TIN-TIA	< 46 %	< 68 %	< 26 %	< 42 %	> 52 %

Nota. FDN: frente derecho normal. FIN: frente izquierdo normal. TDN: trasero derecho normal. TIN: trasero izquierdo normal. FDA: frente derecho acelerado. FIA: frente izquierdo acelerado. TDA: trasero derecho acelerado. TIA: trasero izquierdo acelerado.

En términos generales, la Tabla 4 describe la variabilidad del comportamiento de las Dt de temperatura en las áreas del brazo, consecuencia que indica que unas zonas trabajaron más que otras. En detalle, de esta se originan las siguientes cuatro resultantes en unidades porcentuales (%):

- Del FDN a FDA disminuyeron las Dt del hombro, brazo, codo y el antebrazo con 46, 30, 30 y 60 %, respectivamente. La mano incrementó en 116 %.
- Del FIN a FIA disminuyeron las Dt del hombro, brazo, codo y antebrazo con 32, 54, 80 y 28 %, respectivamente. La mano incrementó en 92 %.
- Del TDN a TDA disminuyeron Dt del brazo, codo y antebrazo con 12, 50 y 38 %, respectivamente. El hombro y la mano incrementaron en 42 y 24 %.
- Del TIN a TIA disminuyeron las Dt en el hombro, brazo, codo y antebrazo 46, 68, 26, 42 %, respectivamente. La mano incrementó en 52 %.

El incremento o decremento de las Dt en las áreas del brazo por el cambio de ritmo de trabajo generó mejoría en la productividad de los individuos 1-5. La cantidad de piezas producidas aumentó y quedó de la siguiente manera ([individuo] piezas RN - piezas RA): (1) 225-289, (2) 232-258, (3) 210-272, (4) 246-249 y (5)197-249.

4. DISCUSIÓN

El ensamble del Ce generó variabilidad en el comportamiento de las Dt en las diversas partes de brazo. Las tablas 2 y 3 determinaron que las tareas repetitivas en el proceso de ensamble del Ce originan molestias y cambios térmicos en las diversas partes del brazo de los individuos. Kilbom (1994a, p. 51) menciona que “al proporcionar asistencia en la prevención primaria y secundaria de los trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo repetitivo”, es decir, existen tendencias hacia la prevención de factores que influyen o provocan accidentes de trabajo en el corto plazo y enfermedades laborales en el mediano y largo plazo. El autor alude a que al proporcionar asistencia en la prevención primaria y secundaria de los trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo repetitivo se disminuirán lesiones en los tendones, músculos y nervios del hombro, antebrazo, muñeca y mano (Kilbom, 1994a). Además, con fundamento en la estadística aplicada y los análisis termográficos y contrastes, se determinó que se generan impactos térmicos específicos de sintomatologías intensas o pasivas en las partes del brazo.

La investigación es integral e innovadora, pues si se compara con los documentos mencionados en la primera parte de este estudio, se señala que este es un análisis de todas las partes del brazo, mientras que las otras investigaciones se concentran en una o ciertas zonas específicas por estudiar. Sin embargo, tales documentos han sido una base esencial para proponer este prototipo. Por ejemplo, Govindu y Babski-Reeves (2012) aplicaron termografía para el análisis del deltoide anterior por medio de un análisis estadístico; Gold et al. (2004) analizaron la piel dorsal de la mano con termografía; Zaproudina et al. (2006) compararon la temperatura de la piel y dolor lumbar de la espalda; Garagiola y Giani (1990) aplicaron termografía en la rehabilitación de lesiones deportivas; Gold et al. (2009) aplicaron termografía para actividades cutáneas en teclado; Wang et al. (2007) aplicaron la termografía lejana y cercana para analizar el flujo sanguíneo de las venas del dorso de la mano, palma y muñeca; y De Stratul et al. (2010) aplicaron termografía para detectar tendinitis en los dentistas después de trabajos prolongados.

Por otro lado, la variabilidad de los cambios térmicos fue originada por el ritmo de trabajo y tipo de ensambles. Ante ello, Quintana y Hernandez-Masser (2003) realizaron un análisis del ensamble en tareas repetitivas y lesiones musculoesqueléticas; Kilbom et al. (1998) estudiaron las lesiones musculoesqueléticas en géneros usando el tamaño corporal, la fuerza muscular y la capacidad aeróbica, en combinación con demandas físicas excesivas; Cote et al. (2002) determinaron los trastornos musculoesqueléticos y síntomas por trabajo repetitivo; Colombini (1998) determinó los niveles de fuerza de contracción, periodo de recuperación adecuado, condición de riesgo, con la mayor discrepancia entre la situación real y la óptima; Latko et al. (1999) analizaron la repetición

del trastorno de trauma acumulativo, ergonomía, síndrome del túnel carpiano, tendinitis incomodidad; Kilbom (1994a) evaluó el riesgo (posturas extremas, falta de control, falta de habilidad, altas demandas de producción y velocidad, y monotonía) y determinó cómo influyen lo repetitivo, tiempo, fuerza, con la extremidad superior (síntomas y lesiones del sistema musculoesquelético); Kilbom (1994b) determinó cómo influyen lo repetitivo, tiempo, fuerza, con la extremidad superior (síntomas y lesiones del sistema musculoesquelético). Entonces, el aporte general del protocolo de investigación es beneficioso, porque se aplica un método y una técnica que proporcionan resultados confiables y efectivos que se validaron con otros estudios. Además, se genera cifras del comportamiento de las partes del brazo, posición y lados para los diversos usos futuros del sector industrial.

Tanto en los estudios de Govindu y Babski-Reeves (2012) como en los de Gold et al. (2004), Zaproudina et al. (2006), Garagiola y Giani (1990), Gold et al. (2009), Wang et al. (2007) y De Stratul et al. (2010), se empleó la termografía como herramienta de análisis, con el objetivo principal de analizar los efectos del trabajo repetitivo en el cuerpo humano mediante el análisis de los cambios térmicos y la identificación de áreas específicas del cuerpo que experimentan cambios de temperatura significativos durante la ejecución de las tareas repetitivas. Sin embargo, mientras que los estudios citados abarcan una variedad de temas relacionados con la salud musculoesquelética y el trabajo repetitivo, la presente investigación se ha centrado específicamente en el análisis de cambios térmicos en los brazos y manos de los operarios.

En cuanto a los detalles proporcionados, se ofrece información específica sobre las áreas del cuerpo afectadas por los cambios de temperatura y su relación con el trabajo repetitivo, mientras que los estudios citados discuten aspectos más generales de la salud musculoesquelética y los factores de riesgo laboral.

5. CONCLUSIONES

En términos generales, este estudio permitió mostrar que la termografía puede ser utilizada como una técnica no invasiva para detectar el trabajo diferencial que distintas partes del cuerpo pueden tener al desarrollar una tarea en un lapso de tiempo en condiciones distintas.

Los resultados presentados comprueban que los ritmos de velocidad de trabajo en este tipo de tarea repetitiva no tienen una influencia en todas las partes de las extremidades que se analizaron, dado que, en la investigación, se encontró que cuando se aceleraba la operación, algunos niveles de las deltas de temperatura se mantenían constantes.

Las herramientas estadísticas fueron esenciales para determinar los resultados y regiones específicas en las partes del brazo y tomar decisiones estratégicas sobre las tareas.

A los resultados de este protocolo se le podría dar continuidad para analizar y comparar el comportamiento con operarias. En este sentido, sería importante verificar si las mujeres tienen el mismo comportamiento en cuanto a las zonas del brazo con que más trabajan en una tarea repetitiva.

Otro estudio que podría ser interesante es analizar el comportamiento musculoesquelético en protocolos donde se desarrollen tareas repetitivas con fuerza. Aquí sería fundamental analizar el tiempo en el que una parte del cuerpo llega a un punto de trabajo importante.

6. REFERENCIAS

- Al-Nakhli, H. H., Petrofsky, J. S., Laymon, M. S., & Berk, L. S. (2012). The use of thermal infra-red imaging to detect delayed onset muscle soreness. *Journal of Visualized Experiments*, 59. <https://dx.doi.org/10.3791/3551>
- Bartuzi, P., Roman-Liu, D., & Wiśniewski, T. (2012). The influence of fatigue on muscle temperature. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 18(2), 233-243. <https://doi.org/10.1080/10803548.2012.11076931>
- Camargo, C., Ordorica, J., De la Vega, E. J., Olguín, J. E., López, O. R., & López, J. A. (2012). Analysis of temperature on the surface of the wrist due to repetitive movements using sensory thermography. *Work*, 41(1), 2569-2575. <https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0500-2569>
- Colombini, D. (1998). An observational method for classifying exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Ergonomics*, 41(9), 1261-1289. <http://dx.doi.org/10.1080/001401398186306>
- Cote, H., Aparecida I., Alem, M., & Oishi J. (2002). Influence of gender on work-related musculoskeletal disorders in repetitive tasks. *International Journal of Industrial Ergonomic*, 29(1), 33-39. [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(01\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(01)00047-6)
- Das, D., Kumar, A., & Sharma, M. A. (2020). A systematic review of work-related musculoskeletal disorders among handicraft workers. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 26(1), 55-70. <https://doi.org/10.1080/10803548.2018.1458487>
- De Stratul, S., Rusu, D., Kulcsar, R., Argesanu, V., Ogodescu, A., & Nica, L. (2010, 1 de enero). Thermographical methods in highlighting the tendinitis in dentistry. *Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM*, 21(1), 1373-1375. https://www.daaam.info/Downloads/Pdfs/proceedings/proceedings_2010/24675_Annals_5_head.pdf

- Dul, J., Bruder, R., Buckle, P., Carayon, P., Falzon, P., Marras, W. S., Wilson, J. R., & Van der Doelen, B. (2012). A strategy for human factors/ergonomics: developing the discipline and profession. *Ergonomics*, *55*(4), 377-395. <https://doi.org/10.1080/00140139.2012.661087>
- Faust, O., Rajendra Acharya, U., Ng, E. Y. K., Hong, T. J., & Yu, W. (2014). Application of infrared thermography in computer aided diagnosis. *Infrared Physics & Technology*, *66*, 160-175. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2014.06.001>
- Ferreira, J., Mendonça, L., Nunes, L., Andrade, A., Rebelatto, J., & Salvini, T. (2008). Exercise-associated thermographic changes in young and elderly subjects. *Annals of Biomedical Engineering*, *36*, 1420-1427. <https://doi.org/10.1007/s10439-008-9512-1>
- Flores-Olivares, B., Yoguez-Seoane, A., Susarrey-Huerta, O., & Gutiérrez-Torres, C. (2015). Preliminary study on the evaluation of musculoskeletal risks through Infrared thermography for drummers. *Procedia Manufacturing*, *3*, 4415-4420. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.442>
- Garagiola, U., & Giani, E. (1990). Use of telethermography in the management of sports injuries. *Sports Medicine*, *10*(4), 267-272. <https://doi.org/10.2165/00007256-199010040-00005>
- Gold, J. E., Cherniack, M., & Buchholz, B. (2004). Infrared thermography for examination of skin temperature in the dorsal hand of office workers. *European Journal of Applied Physiology*, *93*, 245-251. <https://doi.org/10.1007/s00421-004-1210-6>
- Gold, J. E., Cherniack, M., Hanlon, A., Dennerlein, J. T., & Dropkin, J. (2009). Skin temperature in the dorsal hand of office workers and severity of upper extremity musculoskeletal disorders. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, *82*, 1281-1292. <https://doi.org/10.1007/s00420-009-0450-5>
- Govindu, N. K., & Babski-Reeves, K. (2012). Reliability of thermal readings of the skin surface over the anterior deltoid during intermittent, overhead tapping tasks. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *42*(1), 136-142. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2011.11.002>
- Hollnagel, E. (2014). Human factors/ergonomics as a systems discipline? "The human use of human beings" revisited. *Applied Ergonomics*, *45*(1), 40-44. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.03.024>
- Kilbom, Å. (1994a). Repetitive work of the upper extremity. Part I - Guidelines for the practitioner. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *14*(1-2), 51-57. [https://doi.org/10.1016/0169-8141\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0169-8141(94)90005-1)

- Kilbom, Å. (1994b). Repetitive work of the upper extremity. Part II - The scientific basis (knowledge base) for the guide. *International Journal of Industrial Ergonomic*, 14 (1-2), 59-86. [https://doi.org/10.1016/0169-8141\(94\)90006-X](https://doi.org/10.1016/0169-8141(94)90006-X)
- Kilbom, Å., Messing, K., & Thorbjörnsson, C. (1998). Aches and pains-an affliction of women: work-related musculoskeletal disorders. En Kilbom, Å., Messing, K., & C. Bildt-Thorbjörnsson (Eds.), *Women's health at work* (pp. 203-227). National Institute for Working Life.
- Lasanen, R., Malo, M., Airaksinen O., Karhu J., Töyräs J., & Julkunen, P. (2018). Infrared thermography reveals effect of working posture on skin temperature in office workers. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 24(3), 457-463. <https://doi.org/10.1080/10803548.2017.1336299>
- Latko, W. A., Armstrong, T. J., Franzblau, A., Ulin, S. S., Werner, R. A., & Albers, J. W. (1999). Cross-sectional study of the relationship between repetitive work and the prevalence of upper limb musculoskeletal disorders. *American Journal of Industrial Medicine*, 36(2), 248-259. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0274\(199908\)36:2%3C248::AID-AJIM4%3E3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0274(199908)36:2%3C248::AID-AJIM4%3E3.0.CO;2-Q)
- López, B. P., González, E. L., Colunga, C., & Oliva, E. (2014). Workers postural overload assessment: literature review. *Ciencia & trabajo*, 16(50), 111-115. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-24492014000200009>
- Magas, V., Abreu de Souza, M., Borba, E., & Nohama, Percy (2019). Evaluation of thermal imaging for the diagnosis of repetitive strain injuries of the wrist and hand joints. *Research on Biomedical Engineering*, 35, 57-64. <https://doi.org/10.1007/s42600-019-00009-y>
- Manville, C., El Akremi, A., Niezborala, M., & Mignonac, K. (2016). Injustice hurts, literally: the role of sleep and emotional exhaustion in the relationship between organizational justice and musculoskeletal disorders. *Human Relations*, 69(6), 1315-1339. <https://doi.org/10.1177/0018726715615927>
- Merla, A., Mattei, P. A., Di Donato, L., & Romani, G. L. (2010). Thermal imaging of cutaneous temperature modifications in runners during graded exercise. *Annals of Biomedical Engineering*, 38, 158-163. <https://doi.org/10.1007/s10439-009-9809-8>
- Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*. Mc Graw Hill.
- Ng, E. Y.-K. (2009). A review of thermography as promising non-invasive detection modality for breast tumor. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(5), 849-859. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.06.015>

- Quintana, R., & Hernandez-Masser, V. (2003). Limiting design criteria framework for manual electronics assembly. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 13(2), 165-179. <https://doi.org/10.1002/hfm.10033>
- Ring, E. F. J., & Ammer, K. (2012). Infrared thermal imaging in medicine. *Physiological Measurement*, 33(3). <https://doi.org/10.1088/0967-3334/33/3/r33>
- Ríos, M. M., Chacón, E. M., Fernández, A. C., & Guillén, E. O. (2011). Termografía infrarroja y el estudio de riesgos de lesiones músculo esqueléticas. *Revista Ingeniería Industrial*, 10(1), 55-68. <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RI/article/view/50/3292>
- Roman-Liu, D. (2014). Comparison of concepts in easy-to-use methods for MSD risk assessment. *Applied Ergonomics*, 45(3), 420-427. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.05.010>
- Santos, J., Santos, B. J., Ribeiro, P., Miguel, A., Santos, R., & Vaz, M. A. (2016). The influence of task design on upper limb muscles fatigue during low-load repetitive work: a systematic review. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 52, 78-91. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2015.09.010>
- Selfe, J., Hardaker, N., Thewlis, D., & Karki, A. (2006). An accurate and reliable method of thermal data analysis in thermal imaging of the anterior knee for use in cryotherapy research. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 87(12), 1630-1635. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2006.08.346>
- Soares, A., Augusto de Paula, X., & Michaloski, A. (2020). Occupational risk evaluation through infrared thermography: development and proposal of a rapid screening tool for risk assessment arising from repetitive actions of the upper limbs. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(10). <https://doi.org/10.3390/ijerph17103390>
- Sousa, E., Vardasca, R., Teixeira, S., Seixas, A., Mendes, J., & Costa-Ferreira, A. (2017). A review on the application of medical infrared thermal imaging in hands. *Infrared Physics & Technology*, 85, 315-323. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2017.07.020>
- Symons, F., Byiers, B., Hoch, J., Dimian, A., Barney, C., Feyma, T., & Beisang, A. (2015). Infrared thermal analysis and individual differences in skin temperature asymmetry in rett syndrome. *Pediatric Neurology*, 53(2), 169-72. <https://doi.org/10.1016/j.pediatrneurol.2015.03.018>
- Vardasca, R., Ring, F., Plassmann, P., & Jones, C. (2012). Thermal symmetry of the upper and lower extremities in healthy subjects. *Thermology International*, 22(2), 53-60. <http://www.uhlen.at/thermology-international/index.php?target=220253.htm>

- Wang, L., Leedham, G., & Cho, Y. (2007). Infrared imaging of hand vein patterns for biometric purposes. *IET Computer Vision*, 1(3-4), 113-122. <https://doi.org/10.1049/iet-cvi:20070009>
- You, H., & Kwon, O. (2005). A survey of repetitiveness assessment methodologies for hand-intensive tasks. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35(4), 353-360. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2004.07.006>
- Zaproudina, N., Ming, Z., & Hänninen, O. (2006). Plantar infrared thermography measurements and low back pain intensity. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 29(3), 219-223. <https://doi.org/10.1016/j.jmpt.2006.01.003>

