



Termoterapia Para Tratamiento del Dolor: Modelado Paramétrico de la Temperatura.

J.J.A. Flores Cuautle¹, O.O. Sandoval Gonzalez², R. Martínez Mendez³, R. Martínez Valdez⁴, C.J. Trujillo Romero⁵

¹ CONACYT-Maestría en Ingeniería Electrónica, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Orizaba

² Maestría en Ingeniería Electrónica, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de Orizaba

³ Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ingeniería. Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria

⁴ Departamento de Ingeniería Biomédica, Universidad Politécnica de Chiapas, Chiapas, México

⁵ División de investigación en Ingeniería Médica, Instituto Nacional de Rehabilitación-LGII., México

Resumen— Se estudia la distribución de temperaturas en el cuerpo al aplicar una férula para terapia térmica por medio de un estudio paramétrico. En dicho estudio se analizó el efecto de diferentes espesores de la capa de grasa (1 mm-30 mm) al utilizar férulas a temperaturas que van de los 38°C a los 44°C. Se analizó la profundidad de penetración de calor, así como las temperaturas en las diferentes capas bajo la zona de aplicación. Los resultados sugieren que se obtienen mejores resultados al aplicar terapia térmica en zonas con poca grasa y a una temperatura de 44°C.

Palabras clave— Termoterapia; Biocalentamiento; Férula; Modelado

I. INTRODUCCIÓN

Desafortunadamente, millones de personas sufren de dolor agudo o crónico cada año. El dolor, no sólo afecta la calidad de vida de las personas; también provoca una reducción o pérdida en la productividad del trabajador. Además de ser una carga emocional y financiera para el paciente. Actualmente, existen diferentes terapias capaces de ayudar a aliviar el dolor. Sin embargo, las termoterapias han jugado un papel importante en los últimos años. La termoterapia se puede definir como el uso de diferentes niveles de calor sobre el cuerpo humano con fines terapéuticos. El calor se aplica mediante agentes térmicos cuya temperatura se encuentra arriba de los límites fisiológicos [1, 2]. Esta terapia ha sido ampliamente utilizada ya que su costo es reducido y su eficacia como medida paliativa en el tratamiento del dolor ha sido probada con anterioridad. La terapia por calor es considerada como un método no farmacológico para el tratamiento, sobre todo de dolores musculares y de articulaciones.

Independientemente de la causa del dolor los terapeutas coinciden en el uso de termoterapia como medida paliativa al dolor articular. Esto debido a que este es un tratamiento no invasivo; además de que no involucra los efectos secundarios asociados al uso de fármacos [2]. El efecto analgésico del calor es el principio sobre el que se basa el uso de la termoterapia en personas con dolor articular. El principio de

acción se debe en parte al aumento del flujo sanguíneo producto de la vasodilatación que provoca el calor en el cuerpo. Esto conlleva un mayor transporte de glóbulos blancos promoviendo la acción del sistema inmunológico que resulta beneficioso en caso de que el dolor sea causado por alguna lesión provocada por trauma o sobreesfuerzo físico [3]. Pese a que esta técnica es ampliamente aceptada como una terapia paliativa para las personas que sufren algún dolor articular de cualquier índole, sus beneficios a largo plazo debido a los efectos que presenta el cuerpo ante el aumento de temperatura sobre enfermedades degenerativas, aun son debatidos. Esto se debe en parte a la falta de estandarización en los métodos de aplicación de terapia térmica. Este factor también conlleva a que existan diferencias en los gradientes de temperatura aplicados en un rango de 38°C a 44°C [4] que es el rango típico que reportan los terapeutas para su aplicación. Si bien existen reportes de profundidad de penetración de calor para ultrasonido o microondas son pocos los reportes que existen sobre la profundidad de penetración de calor mediante el uso de férulas o “hotpacks” [5], por lo cual un estudio paramétrico sobre las distribuciones de temperatura en el área a tratar cuando se usan este tipo de dispositivos se hace necesario. Como una primera aproximación para el estudio de la temperatura se usa un modelo bidimensional. En dicho modelo se consideró una capa de piel de 1 mm, una capa de grasa con un espesor entre 1 mm-30 mm y una capa de músculo de 50 mm. Por otro lado, la temperatura de la férula varío de los 38°C a los 44°C.

II. METODOLOGÍA

A. Estudio Paramétrico: espesor de la grasa y temperatura de la férula

De acuerdo a la literatura, durante las terapias térmicas, se deben de mantener temperaturas entre los 38°C - 44°C. Además, se debe de alcanzar una penetración, de la temperatura, mínima de 5 mm en el tejido. Sin embargo, debido a la gran variedad de personas que utilizan este tipo de terapia, es imposible afirmar que la penetración del calentamiento será la misma. Es decir, el espesor de cada capa de tejido es diferente entre cada persona. Por lo tanto, para conocer

el efecto de los tejidos sobre el nivel de penetración del calentamiento se realizó un estudio paramétrico. El modelo se llevó a cabo en el software COMSOL-Multiphysics (v5.0, COMSOL Multiphysics Inc., USA); el cual trabaja con el método del elemento finito. En dicho estudio se varió el espesor de la grasa de 1 mm-30 mm; mientras que la piel y el músculo se mantuvieron con un espesor constante de 1mm y 50 mm, respectivamente. El modelo en 1D utilizado para analizar este efecto se describe en la Fig. 1. Es importante mencionar que la grasa funciona como aislante térmico; por lo tanto, es necesario conocer el nivel de penetración del calor cuando el espesor de esta es grande. Por lo tanto, este estudio se centra principalmente en el efecto del espesor de la grasa sobre los resultados de la termoterapia.

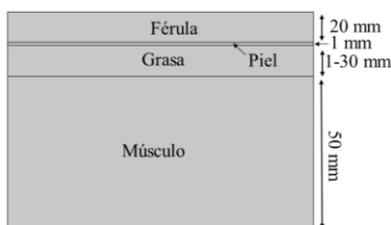


Fig. 1. Esquema utilizado para realizar el análisis paramétrico y evaluar el efecto del espesor de la grasa sobre el nivel de penetración del calentamiento en las terapias térmicas.

Para modelar el calentamiento en tejido se utilizó la ecuación de Biocalentamiento [6]; dicha ecuación describe el calentamiento del tejido debido a una fuente externa y está descrita por la Ecuación 1.

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + [-\rho_b w c_b (T - T_{core})] + Q_m + Q_{ext} \quad (1)$$

dónde c (J/kg/K) representa la capacidad calorífica, ρ (Kg/m³) la densidad, k (W/m/K) la conductividad térmica, C_b (J/kg/K) la capacidad calorífica de la sangre, W (kg/m³/s) la perfusión sanguínea, T_b (K) la temperatura de la sangre, Q (W/m³) el calor generado por el metabolismo y Q_{ext} (W/kg) la fuente de calor externo. En este caso, la fuente de calor externo es representada por las diferentes temperaturas a las que se encuentra la férula. Por otro lado, el calor generado por el metabolismo es mínimo; por lo tanto, este no fue considerado en este análisis. Las propiedades de los tejidos fueron consideradas como homogéneas. La Tabla I describe las características térmicas de los tejidos involucrados en este análisis.

TABLA I. Propiedades de los tejidos incluidos en el modelo.

Tejido	Conductividad térmica [W/(m*K)]	Calor específico [J/(kg*K)]	Perfusión [ml/min/kg]	Densidad (kg/m ³)
Piel	0.37	3391	106	1109
Grasa	0.21	2348	33	911
Músculo	0.49	3421	37	1090

La temperatura inicial de los tejidos se definió a 37°C. Por otro lado, el borde de la férula en contacto con la piel se definió con una temperatura que varió entre los 38°C-44°C. Dicha temperatura se consideró como la fuente de calentamiento. En este caso, se considera que el calentamiento se debe a la conducción térmica que se presenta entre la férula y los tejidos en contacto. Los bordes externos del modelo se consideraron como aislantes térmicos.

III. RESULTADOS

El análisis paramétrico mostró que al utilizar una férula a 38°C es posible incrementar la temperatura en 0.5°C a una profundidad de 6.45 mm (músculo) cuando la capa de grasa tiene un espesor de 1 mm. Por otro lado, al tener una capa de grasa de 30 mm con la férula a 38°C, se logró un incremento de temperatura de 0.5°C a 5.8 mm. Sin embargo, este calentamiento se da únicamente sobre la grasa. Al aumentar la temperatura de la férula es posible alcanzar temperaturas mayores y a mayor profundidad. La Fig. 2 muestra los resultados obtenidos con la férula de 39°C - 44°C y con los diferentes espesores de grasa incluidos en el análisis. Para una férula a 39°C y un 1 mm de grasa se obtuvo una temperatura de 38.5°C y de 37.5°C a 2mm y 10.9 mm de profundidad respectivamente. Al analizar el modelo con una capa de grasa de 30 mm se observaron las mismas temperaturas (38.5°C y de 37.5°C) a 2.6 mm y 10.3 mm, respectivamente. Al incrementar la temperatura de la férula a 40°C, y analizar un espesor de 1 mm de grasa, las temperaturas registradas fueron de 37.5°C a 13 mm de profundidad y de 39.5°C a 1.2 mm de profundidad. Para un espesor de grasa de 30 mm, se obtuvieron temperaturas de 39.5°C a 1.8 mm y de 37.5°C a 12 mm de profundidad. Un comportamiento similar se observó en todos los casos analizados; como se muestra en la Fig. 2. Sin embargo, es importante mencionar que con una férula a temperaturas de 40°C - 44°C es posible alcanzar un incremento de temperatura de 0.5°C a profundidades superiores a los 15 mm (sobre músculo) y de hasta 3°C y 4°C a 5 mm de profundidad (músculo), al analizar un espesor de la grasa de 1 mm. Es posible decir que una férula a 44°C presenta los mejores resultados, esto debido a que se alcanza un incremento de temperatura de 0.5°C a una profundidad de hasta 20 mm; mientras un incremento de temperatura superior a los 4°C (superiores a los 37°C de temperatura inicial del tejido) se presenta a una profundidad de 5 mm. En este caso, al analizar un espesor de la grasa de 30 mm se observó que únicamente es posible lograr un incremento de temperatura de 0.5°C a una profundidad que no va más allá de la mitad del espesor de esta capa. Es decir, la máxima profundidad de penetración fue de 15 mm. Temperaturas de hasta 43°C fueron alcanzadas; sin embargo, estas se presentaron a niveles muy superficiales sobre la grasa (~ 2 mm de profundidad sobre la grasa).

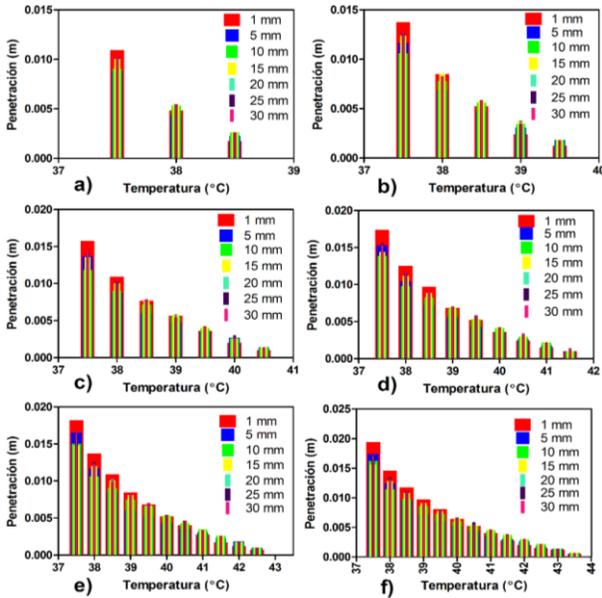


Fig. 2. Temperaturas alcanzadas a diferentes niveles de penetración al analizar diferentes espesores de grasa (1 mm-30 mm) considerando una férula a temperaturas de 39°C-44°C. a) férula a 39°C, b) férula a 40°C, c) férula a 41°C, d) férula a 42°C, e) férula a 43°C, f) férula a 44°C.

La Tabla II muestra el valor promedio y la desviación estándar de las máximas temperaturas alcanzadas al aplicar calentamiento con la férula a 38°C-44°C por 10, 30 y 30 minutos. En esta tabla se observa que el incrementar el tiempo del tratamiento no modifica de manera significativa la temperatura alcanzada. Por lo tanto, el único parámetro que afectará el resultado de la terapia térmica será la temperatura a la que se encuentre la férula y el espesor de la capa de grasa que tenga el paciente bajo tratamiento.

TABLA II. Promedios y desviación estándar de las temperaturas máximas alcanzadas con la férula a temperaturas entre 38°C-44°C, con los diferentes espesores de la grasa incluidos en el análisis, al aplicar el calor durante 10, 20 y 30 minutos.

T férula [°C]	Espesor de la capa de grasa [mm]			
	1	5	10	15
38	37.50±0.05	37.52±0.03	37.52±0.03	37.53±0.02
39	38.57±0.04	38.55±0.03	38.53±0.02	38.55±0.03
40	39.59±0.04	39.46±0.03	39.54±0.02	39.55±0.02
41	40.60±0.04	40.48±0.03	40.57±0.02	40.56±0.02
42	40.62±0.16	40.63±0.10	40.67±0.09	40.71±0.10
43	40.77±0.27	40.83±0.18	40.73±0.15	40.68±0.18
44	40.94±0.38	40.90±0.26	40.80±0.22	40.89±0.25
T férula [°C]	Espesor de la capa de grasa [mm]			
	20	25	30	
38	37.53±0.33	37.54±0.03	37.54±0.03	
39	38.56±0.03	38.56±0.03	38.56±0.03	
40	39.56±0.03	39.56±0.03	39.56±0.03	
41	40.57±0.03	40.57±0.03	40.57±0.03	
42	40.55±0.12	40.56±0.12	40.56±0.12	
43	40.70±0.20	40.71±0.20	40.71±0.20	
44	40.74±0.29	40.75±0.29	40.94±0.28	

La Fig. 3 muestra las distribuciones de temperatura que se obtuvieron en seis de los diferentes casos incluidos en este estudio. Se observa que el espesor de la capa de grasa juega un papel muy importante sobre la profundidad a la cual se logra incrementar la temperatura, como mínimo en 0.5°C. Mientras más delgada sea la capa de grasa es posible lograr el calentamiento del tejido muscular e incluso lograr incrementos superiores a los 4°C a una profundidad de 15 mm (férula a 44°C). Por otro lado, al analizar una capa de grasa de 30 mm se observa que los incrementos de temperatura se encuentran dentro del mismo rango. Sin embargo, se observa que el calentamiento se da únicamente sobre la grasa, sin afectar a los músculos.

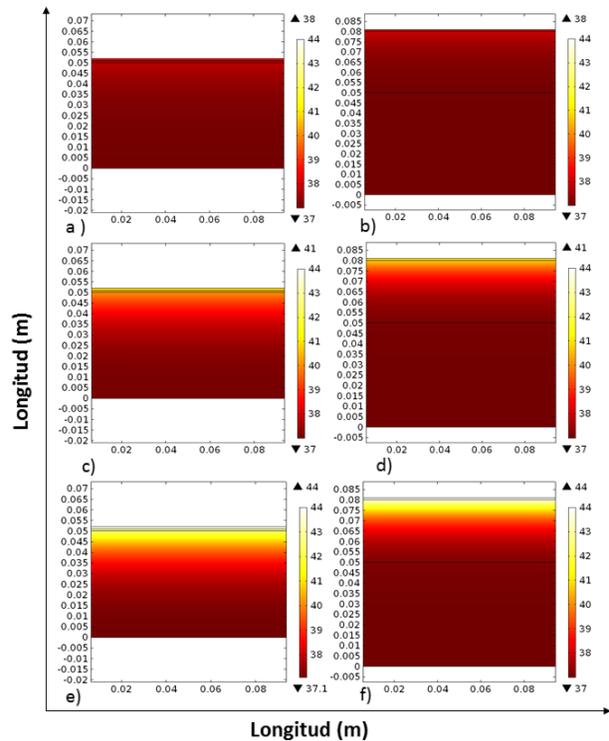


Fig. 3. Distribuciones térmicas obtenidas en tres modelos con diferentes espesores de grasa y temperaturas de la férula. a) distribuciones térmicas obtenidas con una capa de grasa de 1 mm y una férula a 38°C, b) distribuciones térmicas obtenidas con una capa de grasa de 30 mm y una férula a 38°C. c) distribuciones térmicas obtenidas con una capa de grasa de 1 mm y una férula a 41°C, d) distribuciones térmicas obtenidas con una capa de grasa de 30 mm y una férula a 41°C, e) distribuciones térmicas obtenidas con una capa de grasa de 1 mm y una férula a 44°C, f) distribuciones térmicas obtenidas con una capa de grasa de 30 mm y una férula a 44°C

La Figura 4 a) muestra el incremento de temperatura en función del tiempo que se generó en un punto ubicado a 5 mm sobre el nivel de la capa de tejido muscular. En esta Figura se observa el efecto de utilizar la férula a las diferentes temperaturas propuestas (38°C - 44°C). Se observa que con una férula a 38°C se logró un incremento de temperatura de apenas 0.5°C a 5mm de profundidad en músculo (incremento mínimo considerado como terapéutico) [7]. Al incrementar la temperatura de la férula, la temperatura alcanzada a los mismos 5mm puede llegar a ser de hasta 3.5°C. Por otro lado,

la Figura 4 b) muestra el decremento de la temperatura en función de la profundidad de penetración. Únicamente se muestra el caso para un espesor de grasa de 1 mm. Se observa que con una férula a 39°C es posible alcanzar incrementos de temperatura de 0.5°C a una profundidad aproximada de 16 mm. Al utilizar una férula a 44°C se alcanzaron incrementos de temperaturas de 1.8°C a los mismos 16 mm de profundidad. Con esto se confirma una vez más que la temperatura de la férula juega un papel muy importante para la obtención de temperaturas terapéuticas.

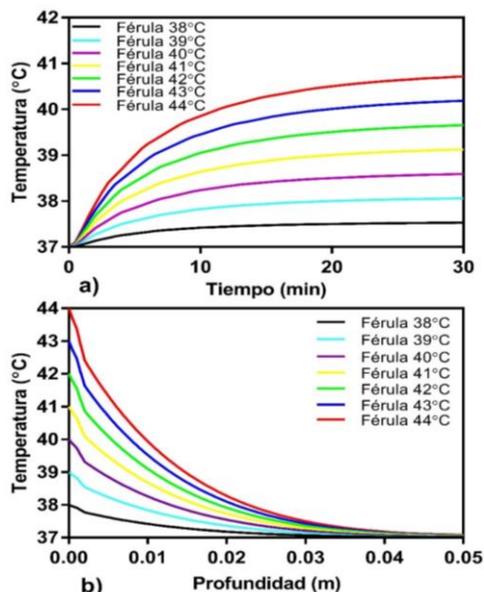


Fig. 4. Perfiles de temperatura obtenidos con una capa de grasa de 1 mm y las diferentes temperaturas de la férula incluidas en este estudio. a) Perfiles de temperatura en función del tiempo obtenidos en un punto central a 5 mm sobre la capa de músculo. b) Perfiles de temperatura en función de la profundidad medidos sobre la línea central del modelo.

IV. DISCUSIÓN

Esta es una primera aproximación para conocer el efecto que tiene cada una de las capas de tejido y la temperatura de la férula sobre la profundidad de penetración del calentamiento en las terapias térmicas para el tratamiento del dolor. Los resultados obtenidos mostraron que este tipo de terapia puede no ser completamente conveniente si la temperatura de la férula es menor a 40°C y el sujeto tiene una capa de grasa de aproximadamente 30 mm. Esto debido a que el incremento de temperatura se concentra en su mayor parte sobre la grasa; mientras que el tejido muscular no se ve afectado por los incrementos de temperatura. Por otro lado, la perfusión sanguínea de los tejidos es un parámetro termo-dependiente; mientras que los modelos aquí presentados se realizaron con valores de perfusión sanguínea constantes. Por lo tanto, las distribuciones térmicas podrían llegar a presentar pequeñas modificaciones. Se considera necesario realizar modelos más complejos que ayuden a entender el efecto terapéutico que tiene el calor sobre el alivio del dolor.

V. CONCLUSIÓN

Aun cuando esta es una primera aproximación sobre el efecto de aplicar calor mediante férulas a diferentes temperaturas, los resultados obtenidos mostraron que el espesor de la capa de grasa puede llegar a ser un parámetro fundamental para lograr una terapia exitosa o no por la cual es evidente conocer el índice de masa corporal como un auxiliar en la planeación de este tipo de terapias. Es decir, con este estudio se observó que los resultados de la terapia térmica dependerán principalmente del espesor de la grasa que se tenga en la región a ser tratada. Mientras menor sea el espesor de la grasa la terapia térmica será más exitosa. Se observó que utilizar una férula a 44°C es más eficiente; esto debido a que se obtiene incrementos de temperatura de hasta 4°C a profundidades de 15 mm (sobre el músculo). Es decir, el calor no sólo afecta al tejido graso, sino que afecta directamente al tejido muscular; lo cual ayudaría a incrementar el efecto terapéutico del calor.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Brosseau, K. A. Yonge, V. Welch, S. Marchand, M. Judd, G. A. Wells, and P. Tugwell, "Thermotherapy for treatment of osteoarthritis," *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2003.
- [2] S. F. N. D.O, W. Kurt, and K. Roger, "The Physiologic Basis and Clinical Applications of Cryotherapy and Thermotherapy for the Pain Practitioner," *Pain Physician*, vol. 7, p. 6, 2004.
- [3] S. Poitras and L. Brosseau, "Evidence-informed management of chronic low back pain with transcutaneous electrical nerve stimulation, interferential current, electrical muscle stimulation, ultrasound, and thermotherapy," *The Spine Journal*, vol. 8, pp. 226-233, 2008/01/01/ 2008.
- [4] Infomed, "Medicina de Rehabilitación", [En línea]. Disponible en: http://www.sld.cu/sitios/rehabilitacion/temas.php?i_dv=2020 [Accedido: jun-2016].
- [5] J. Hanks, D. Levine, and B. Bockstahler, "Physical Agent Modalities in Physical Therapy and Rehabilitation of Small Animals," *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*, vol. 45, pp. 29-44, 2015/01/01/ 2015.
- [6] H. H. Pennes, "Analysis of Tissue and Arterial Blood Temperatures in the Resting Human Forearm," *Journal of Applied Physiology*, vol. 1, pp. 93-122, 1948.
- [7] Ganong (2010). *Fisiología Médica*, McGraw-Hill España.