

Diseño y Construcción de un Prototipo de Terapia Alternativa en la Recuperación del Bíceps Braquial por Actividad Deportiva Utilizando un EMG y la EEM

S. Acosta Jiménez¹, A. C. González Rodríguez¹, A. I. Anchondo Ortiz¹, C. E. Cañedo Figueroa²

¹Licenciatura en Ingeniería Biomédica, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.

²Docente del programa de Ingeniería Biomédica, Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México.
samjmez19@gmail.com, alexiaglez24@gmail.com, aleanchondo16@gmail.com, eduardo171192@gmail.com

Resumen— En este documento se describe el desarrollo de un prototipo auxiliar para la relajación del músculo bíceps braquial de deportistas después de la actividad física. Dicho prototipo consta con la capacidad de adquirir señales por medio de la técnica de electromiograma (EMG), las cuales son procesadas y analizadas por un sistema de redes neuronales con lo que se determina el grado de tensión y/o desgaste que tiene el deportista al finalizar la actividad física y la intensidad de electroestimulación muscular (EEM) adecuada. Lo anterior se estandarizó gracias a dos fases de experimentación; la 1^o fase consistió en capturar las señales miográficas del bíceps braquial de deportistas de natación, tiro con arco y gimnasia artística, antes y después del entrenamiento, demostrando con la técnica de EMG la tensión del músculo al finalizar la actividad física. La 2^o fase radicó en aplicar EEM de 4, 10 y 20 Hz en intervalos diferentes de tiempo (5, 10 y 15 minutos) a 6 sujetos de prueba los cuales realizaron el ejercicio de curl de bíceps con una mancuerna de 12 libras. Con dichos sujetos se ajustó el sistema de redes neuronales de acuerdo a los resultados de su nivel de satisfacción/relajación con la EEM.

Palabras clave— electroestimulación, electromiografía, fatiga.

I. INTRODUCCIÓN

Durante la práctica de la actividad física existe una gran incidencia de lesiones musculares, si bien se han llevado a cabo pocos estudios clínicos sobre el tratamiento y la resolución de las mismas [1]. Lograr una rápida recuperación muscular es uno de los objetivos prioritarios de los deportistas de alto rendimiento, especialmente cuando la intensidad del ejercicio es elevada o traumática [2].

La incidencia de lesiones es provocada por numerosas causas, siendo más frecuente en aquellos músculos poliarticulares cuando las condiciones ambientales son desfavorables o se tiene una acumulación de fatiga lo que se manifiesta con la reducción de la capacidad de mantener un determinado nivel de fuerza en una contracción sostenida o como la incapacidad de alcanzar un nivel de fuerza inicial en contracciones repetidas [1][3].

La etiología de la fatiga muscular proviene de diferentes factores, como fallos en el aporte energético y de O₂ con depleción de sustratos, alteración en la actividad de enzimas kinasas, desbalance electrolítico, desequilibrio del pH, entre otros. [4].

Dentro de los medios de recuperación de la fatiga muscular se encuentran las ayudas mecánicas o físicas, como la electroestimulación, masajes, baños fríos, cuyo objetivo principal es favorecer la llegada de más volumen de sangre a los músculos fatigados y así ayudar en su recuperación [2].

Al no existir una adecuada estrategia entrenamiento-competencia-recuperación, los deportistas acumulan fatiga residual y se encuentran a un paso del síndrome de sobreentrenamiento deportivo [4].

La terapia que se sugiere es la EEM (electroestimulación muscular), definida como un método utilizado en el área de rehabilitación clínica y entrenamiento de deportistas de alto rendimiento, con fines de conservación y/o recuperación de la masa muscular [5]. El objetivo consiste en fusionar la técnica de EMG (electromiograma) y la terapia de EEM. La finalidad es captar señales electromiográficas a partir de las cuales se sugiere un grado de EEM, según la tensión o desgaste que tenga el músculo bíceps braquial. Se pretende demostrar que la terapia mencionada es una alternativa que puede ayudar al atleta.

II. METODOLOGÍA

A continuación, se da una breve explicación del desarrollo del prototipo. En la Fig. 1 se muestra un esquema del funcionamiento general, se inicia con la contracción del músculo, la señal es captada por un EMG, el cual cuenta con tres electrodos, dos para el músculo bíceps braquial y uno de referencia, la señal entra a un programa de redes neuronales en MATLAB, el cual clasifica la señal y sugiere un nivel de EEM adecuada. Finalmente, se le provee la terapia al deportista por medio de dos electrodos.

A. EMG

La Fig. 2 muestra el circuito en el cual se basó la construcción del EMG. El componente principal para el desarrollo del EMG es un INA128P (Amplificador de instrumentación de precisión y baja potencia. Burr Brown de Texas Instruments), el cual capta la señal que arroja el músculo. Debido a que las señales miográficas son de pequeña amplitud, el ruido ambiental o en mayor medida el ruido de línea (60 Hz) puede provocar una falsa interpretación de los resultados [6]. El filtrado de la señal obtenida se realizó

como un método experimental implementando un filtro de orden cinco pasa baja Butterworth.



Fig. 1. Esquema de funcionamiento general.

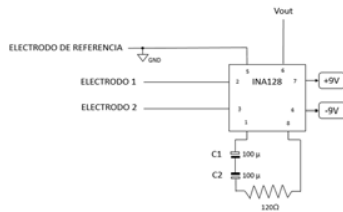


Fig. 2. Circuito del EMG

B. Electroestimulador

El circuito está conformado por dos temporizadores 555. El primero tiene una configuración a estable que se encarga de controlar la frecuencia de la EEM. Se calcularon 3 valores de resistencias a partir de la fórmula (1), con el fin de obtener las frecuencias (f) deseadas, en este caso 4, 10 y 20 Hz.

$$f = \frac{1.44}{(R1 + 2R2)C1} \quad (1)$$

La cual se despejó para poder obtener el valor de la resistencia 2 ($R2$) quedando la ecuación como (2):

$$R = \frac{\frac{1.44}{fC1} - R1}{2} \quad (2)$$

Se le asignó un valor a $R1$ de 220Ω y a $C1$ de $10\mu F$. Obteniendo los siguientes valores mostrados en la Tabla 1.

TABLA 1. VALORES DE LAS RESISTENCIAS SEGÚN LA FRECUENCIA DE EEM.

F (Hz)	4	10	20
$R2 (\Omega)$	17747	7090	3461

Las resistencias fueron colocadas estratégicamente entre los pines 6 y 7 del primer temporizador. El pin 3, considerado como el pin de salida, del primer temporizador llega al pin de disparo, pin 2 del segundo temporizador, el cual se encuentra en una configuración monoestable. La salida del segundo temporizador se dirige a un LM317 (Regulador de voltaje positivo, salida ajustable, ONSEMI) que controla la salida de amperaje, para que esta no sea mayor de 10 mA, teniendo en cuenta que intensidades mayores a esta podrían dañar al deportista [7]. La salida del LM317 llega a un TIP31 (Transistor de poder de 3A, 40-100V, 40. MOSPEC), luego la señal se dirige a un transformador, en seguida se conectan los electrodos que brindan el grado de EEM.

Se utilizó un Arduino Mega 2560 (microcontrolador Atmega) y el software de MATLAB (R2014a) para realizar

una comunicación serial, de esta forma se puede controlar el funcionamiento de las salidas y/o entradas digitales del Arduino, auxiliados por una interfaz gráfica para brindar la EEM. La forma de activar el electroestimulador es por medio de relevadores (SONGLE), cada uno de ellos se encuentra conectado a una de las resistencias calculadas, que a su vez son controlados por el Arduino a través de sus pines digitales.

C. Experimentación

Este apartado se dividió en dos fases:

- 1) Demostración de la tensión muscular del bíceps braquial de los atletas de alto rendimiento después de hacer ejercicio.
- 2) Aplicación de EEM (4, 10 y 20 Hz) a 6 sujetos de prueba en distintos intervalos de tiempo (5, 10 y 15 minutos) luego de realizar actividad física.

La actividad del músculo bíceps braquial no está implicada en todos los deportistas, por lo tanto, se seleccionaron tres disciplinas que incluyen la acción del ya mencionado músculo. En la 1° fase hubo participación del equipo de natación de la UACH, 15 atletas; del equipo de tiro con arco SAETA, 7 atletas y del equipo de gimnasia artística KRASTEVA MITOVA, 10 atletas. En la 2° fase se contó con la colaboración de 6 sujetos de prueba, 3 de ellos atletas de alto rendimiento, correspondientes a cada una de las disciplinas ya mencionadas, mientras que los 3 restantes son personas que practican ejercicio, pero no de alto rendimiento. Se contó con el consentimiento total de cada uno de ellos para el desarrollo de este proyecto.

La 1° fase consistió en comparar las señales obtenidas por el EMG antes y después de realizar ejercicio en cada uno de los atletas. Por lo tanto, previo a realizar su entrenamiento y al término se realizaron los siguientes pasos.

1. Se colocaron los electrodos correspondientes en el brazo derecho sobre el bíceps braquial.
2. Se les pidió que hicieran un esfuerzo máximo en el músculo, con el brazo flexionado y con la mano extendida durante 3 segundos.
3. Se registraron 100 diferentes datos los cuales fueron guardados en un vector.

Se obtuvo un vector V_{sr} (vector en reposo), donde s es el número de sujeto de prueba, dicho vector se recolectó antes de realizar actividad física. Al finalizar el entrenamiento se capturaron las señales miográficas, obteniendo un vector V_{se} (vector de ejercicio). Al relacionar el promedio de los dos vectores obtenidos de cada uno de los deportistas se logró observar que después de realizar una actividad física el músculo desprende una señal miográfica mayor a comparación de antes de realizarla, aun y cuando el atleta se sienta agotado. En la Fig. 5 se muestran los resultados de los atletas dedicados a la disciplina de tiro con arco. Con ello se

puede justificar la aplicación de EEM para relajación y pronta recuperación del deportista después del ejercicio.

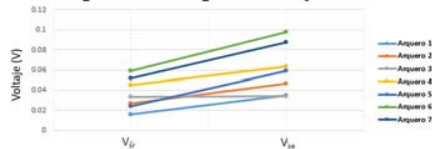


Fig. 5. Demostración del aumento de la señal en el músculo bíceps braquial en los atletas de tiro con arco.

La 2° fase tuvo una duración de 9 días, se aplicó EEM después de realizar ejercicio a cada uno de los sujetos según la Tabla 2.

TABLA 2. CRONOGRAMA DE LA 2° FASE DE EXPERIMENTACIÓN

Día	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Frecuencia (Hz)	4	4	4	10	10	10	20	20	20
Duración (min.)	5	10	15	5	10	15	5	10	15

En esta fase se realizaron los siguientes pasos con el fin de observar el comportamiento del músculo:

1. Se tomó una muestra de señales electromiográficas del bíceps braquial del brazo derecho, flexionado y con la mano extendida durante 3 segundos obteniendo un vector V_{sr} de 100 datos.
2. Posteriormente, el sujeto de prueba realizó 20 repeticiones del ejercicio curl de bíceps con una mancuerna de 12 libras, únicamente con el brazo derecho. Dicha actividad se consideró exhaustiva debido al peso, ya que nuestro conjunto de personas así lo manifestó.
3. Al finalizar el ejercicio se capturó un vector V_{se} de 100 datos.
4. Se proporcionó una terapia de EEM a cada sujeto siguiendo el cronograma y tiempos presentados en la Tabla 2, con la finalidad de relajar y producir una mejor oxigenación para el músculo [8][9].
5. Al término de la terapia se realizó una toma de señales con el EMG obteniendo un vector V_{st} (vector de terapia) de 100 datos.

A continuación, se llevó a cabo una encuesta de satisfacción a cada uno de los sujetos de prueba, la cual variaba del 1 al 10, siendo el 10 el valor de mayor satisfacción. Refiriéndose a satisfacción al grado de relajación que consideraron con cada una de las frecuencias y tiempos establecidos (Fig. 6). Los sujetos 1, 2 y 3, son aquellos atletas de alto rendimiento y los sujetos 4, 5 y 6, aquellas personas que practican ejercicio moderado.

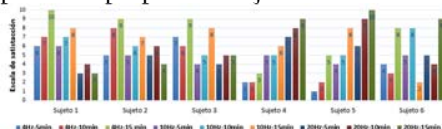


Fig. 6. Encuesta de satisfacción/relajación de los 6 sujetos de prueba según el grado de EEM y tiempo establecido.

D. Redes Neuronales

El método de clasificación de datos que se decidió implementar fue el de una red neuronal, caracterizado como un proceso con flexibilidad y facilidad de uso. Es capaz de detectar relaciones complejas y no lineales entre variables, se busca que la obtención de datos crezca y se pueda ir actualizando para enfoques musculares posteriores [10].

Se creó una base de datos con señales electromiográficas tomadas después de hacer ejercicio y fueron ajustadas al sistema de redes neuronales, diseñado en la plataforma de MATLAB. Las señales de la base de datos se encuentran clasificadas dentro de la red neuronal según la EEM que el atleta necesite de acuerdo a la señal desprendida del músculo. De esta manera, cuando el EMG capte una señal será procesada por la red neuronal y se sugerirá un grado de electroestimulación para la relajación del músculo.

El número total de muestras de la base de datos que se utilizó para la red neuronal fue de un total de 60 atletas, correspondientes a las instituciones ya mencionadas. Para la definición de la red neuronal se tomaron como características la media y la desviación estándar de las señales electromiográficas obtenidas de los deportistas. Se utilizó el 70 % de las muestras para el entrenamiento de la red neuronal, un 15 % para pruebas y el 15 % restante para validación.

El sistema de redes neuronales se configuró de acuerdo a la Tabla 3, obteniendo matrices de confusión con 0 % de error y un porcentaje de clasificación del 100%.

TABLA 3. CONFIGURACIÓN DE LAS REDES NEURONALES

Red experta	Entradas	Capa oculta	Salidas
Red de 4 Hz	2	10	1
Red de 10 Hz	2	9	1
Red de 20 Hz	2	10	1

III. RESULTADOS.

En la Fig. 7 se muestran los promedios obtenidos de voltajes del día 3 y 9 de experimentación. En la primera etapa se muestra el promedio del vector V_{sr} , mientras que en la segunda etapa el de V_{se} . Por último, en la tercera etapa se observa el promedio de V_{st} . Con esto se confirma que la EEM es una terapia que promueve la relajación muscular, de acuerdo a V_{sr} , V_{se} y V_{st} .

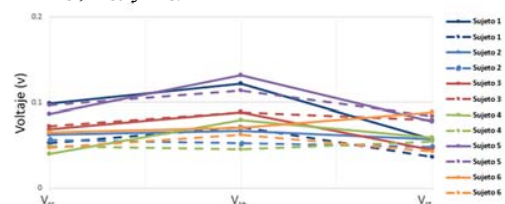


Fig. 7. Resultados del promedio de los 100 datos guardados en los vectores (V_{sr} , V_{se} y V_{st}) obtenidos con el EMG de cada uno de los sujetos en la 2° fase de experimentación en el día 3 (línea punteada) y día 9 (línea continua).

Tomando en cuenta la encuesta de satisfacción y los resultados en la fase experimental se llegó a la conclusión que aquellas personas que practican ejercicio en forma moderada responden mejor a la EEM de 20 Hz, mientras que las que son de alto rendimiento tienen una mejor respuesta a frecuencias como 4 Hz. Un ejemplo de ello se puede observar en la Fig. 8, en la cual se hace la comparación entre los sujetos 3 y 6, la línea continua corresponde a la frecuencia de 4 Hz y la punteada a 20 Hz, ambas durante 15 minutos. Que corresponden a los días en que los 2 sujetos respondieron a la encuesta de satisfacción con un valor de 9, según la terapia más apropiada para cada uno.

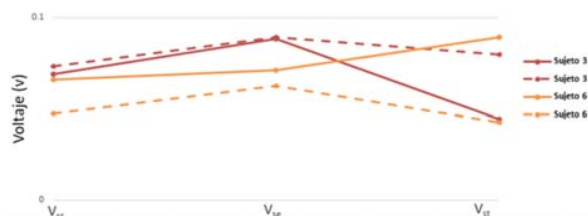


Fig. 8. Comparación entre un sujeto de alto rendimiento y un sujeto de bajo rendimiento con frecuencia de 4 Hz (línea continua) y de 20 Hz (línea punteada).

IV. DISCUSIÓN

En la construcción del EMG se decidió utilizar un filtro digital en la plataforma de MATLAB en lugar de un filtro analógico típico, ya que con ello se tiene una mayor facilidad de modificar la frecuencia de corte. Al mismo tiempo, el diseño del circuito del electroestimulador es sencillo de realizar, esto es porque sus componentes son económicos y cuentan con configuraciones establecidas. Se pensó en que el dispositivo final debía tener una apariencia atractiva y un modo fácil de controlar, es por eso que se recurrió a la realización de una interfaz gráfica en MATLAB, obteniendo como resultado un modelo compacto y con control digital.

Durante la experimentación en la 1ª fase, se pensaba que los resultados iban a variar ya que no todos los deportistas practicaban la misma actividad física. Aun así, los resultados fueron concretos y se pudo observar que antes y después del ejercicio existe un cambio en la señal muscular, siendo mayor posterior al ejercicio. En la 2ª fase de experimentación, se otorgaron roles con respecto a la frecuencia de electroestimulación y al tiempo a cada uno de los 6 individuos. Con los resultados obtenidos de acuerdo a la encuesta de satisfacción, se comprobó que la relajación del músculo depende del estado físico del sujeto, ya que la frecuencia de 4 Hz resultó ser más cómoda para deportistas de alto rendimiento y 20 Hz para los de bajo rendimiento. Con respecto al tiempo de EEM, se pudo observar que el tiempo óptimo es de 15 minutos.

En cuanto la utilización de las redes neuronales, se obtuvo una eficiencia del 100%, resultando un método

totalmente confiable para sugerir el grado de EEM según la señal captada.

V. CONCLUSIÓN

La EEM es una buena técnica para brindar relajación y oxigenación al músculo mediante la aplicación de frecuencias eléctricas bajas. La fusión de un EMG y la EMM es una solución económica y práctica a la incidencia de lesiones en deportistas de alto rendimiento, de forma que la recuperación muscular post entrenamiento sea rápida y efectiva.

El proyecto fue enfocado a un solo músculo, el bíceps braquial, y el resultado fue favorable. Se tiene como objetivo realizar más pruebas y bases de datos para aplicarlo a distintas áreas musculares, de tal manera que el dispositivo pueda ser utilizado por cualquier deportista.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Díaz-Jiménez JF. Lesiones musculares en el deporte. *Revista Internacional de Ciencias del Deporte*. 2 (3): 55-67, 2006.
- [2] Urdampilleta A, Armentia I, Gómez-Zorita S, Martínez-Sanz JM, Mielgo-Ayuso J. La fatiga muscular en los deportistas: métodos físicos, nutricionales y farmacológicos para combatirla. *Revista Archivos de Medicina del Deporte*. 32(1):36-43, 2015.
- [3] Rodríguez-Matoso D, *et al.* Evaluación de la respuesta muscular como herramienta de control en el campo de la actividad física, la salud y el deporte. *Rev. Andal. Med. Deporte*. 5(1):28-40, 2012. DOI: 10.1016/S1888-7546(12)70006-0
- [4] Pancorbo-Sandoval AE. Diagnóstico y prevención de la fatiga crónica o del síndrome de sobreentrenamiento en el deporte de alto rendimiento. Una propuesta de mecanismos de recuperación biológica. *Cuad. Psicol. Deporte*. 3(1):61-80, 2003.
- [5] Campos-Jara C, *et al.* Efecto de 8 semanas de corriente TENS modificada y la corriente rusa, sobre la fuerza muscular y la composición corporal. *Rev. Andal. Med. Deporte*. 9(1):3-6, 2016. DOI: 10.1016/j.ramd.2015.03.002
- [6] Correa-Figueroa JL, Morales-Sánchez E, Huerta-Ruelas JA, González-Barbosa JJ, Cárdenas-Pérez CR. Sistema de Adquisición de Señales SEMG para la Detección de Fatiga Muscular. *Rev. Mex. Ing. Biom.* 32(1): 17-27, 2016. DOI: 10.17488/RMIB.37.1.4
- [7] Villarrubia M. Seguridad eléctrica: efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano. Facultad de Física, Universidad de Barcelona, 2000.
- [8] Bastidas-Agualongo JD, Uvidia-Paredes JE. La electroestimulación y su incidencia en el desarrollo de la fuerza máxima en los levantadores de pesas olímpicos de la categoría juvenil. *Licenciatura en Cultura Física y Entrenamiento Deportivo, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Nacional de Chimborazo*. 2017.
- [9] Benito-Martínez E, Martínez-Amat A, Lara-Sánchez AJ, Berdejo-Del-Fresno D, Martínez-López EJ. Effect of combined electrostimulation and plyometric training on 30 meters dash and triple jump. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. 53(4): 387-395, 2013.
- [10] Vega-Huerta H, Cortez-Vásquez A, Huayna AM, Alarcón Loayza L, Romero-Naupari P. Reconocimiento de patrones mediante redes. *Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática, Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, 2009.