

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TERAPIA ALTERNATIVA EN LA RECUPERACIÓN DEL BÍCEPS BRAQUIAL POR ACTIVIDAD DEPORTIVA UTILIZANDO UN EMG Y LA EEM

Samara Acosta Jiménez

Facultad de Medicina y Ciencias Biomédicas
de la Universidad Autónoma de Chihuahua
Chihuahua, México

Alexia Concepción González Rodríguez

Facultad de Medicina y Ciencias Biomédicas
de la Universidad Autónoma de Chihuahua
Chihuahua, México

Alejandra Irene Anchondo Ortiz

Facultad de Medicina y Ciencias Biomédicas
de la Universidad Autónoma de Chihuahua
Chihuahua, México

Carlos Eduardo Cañedo Figueroa

Facultad de Medicina y Ciencias Biomédicas
de la Universidad Autónoma de Chihuahua
Chihuahua, México

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



Resumen: En este estudio se describe el desarrollo de un prototipo auxiliar para la relajación del músculo 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 por un sistema de redes neuronales con lo que se determina el grado de tensión que tiene el deportista al finalizar la actividad física y la intensidad de electroestimulación muscular (EEM) adecuada. Lo anterior se estandarizó gracias a una base de datos de 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. A 6 sujetos de prueba se les aplicó la EEM de 4, 10 y 20 Hz en intervalos diferentes de tiempo (5, 10 y 15 minutos), los cuales realizaron el ejercicio de curl de bíceps con una mancuerna de 12 lb. Con dichos sujetos se ajustó el sistema de redes neuronales conforme a los resultados de su nivel de satisfacción/relajación con la EEM.

Palabras clave: Electroestimulación, electromiografía, fatiga.

INTRODUCCIÓN

Durante la práctica de la actividad física existe gran incidencia de lesiones musculares, se han llevado a cabo pocos estudios clínicos sobre el tratamiento y la resolución de las mismas (1). Lograr la rápida recuperación muscular es un objetivo prioritario en deportistas de alto rendimiento (2).

Las lesiones son más usuales en los músculos poliarticulares cuando las condiciones ambientales son desfavorables o se tiene 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 fallo 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).

Para la recuperación muscular existen ayudas mecánicas o físicas, el objetivo es favorecer la llegada de más volumen de sangre a los músculos fatigados (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 en este estudio es la EEM (electroestimulación muscular), 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 de este estudio consiste en fusionar la técnica de EMG (electromiograma) y la terapia de EEM por medio de inteligencia artificial, específicamente un sistema de redes neuronales (6). También se pretende demostrar que la terapia mencionada es una alternativa que puede ayudar al atleta.

El funcionamiento general de nuestra metodología propuesta es la siguiente: se inicia con la contracción del músculo, la señal es captada por un EMG a través de electrodos, luego entra a un programa de redes neuronales el cual clasifica la señal y sugiere el nivel de EEM adecuada. Finalmente, se provee la terapia al deportista por medio de dos electrodos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Electromiograma

Se construyó un prototipo de EMG, el componente principal fue un INA128P (Amplificador de instrumentación de

precisión y baja potencia. Burr Brown de Texas Instruments) (7), el cual capta las señales 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 (8). Por lo tanto, se aplicó un filtro digital de orden cinco pasa baja Butterworth en el software de programación MATLAB (R2014a) (9).

Electroestimulador

Para implementar la terapia, se construyó un prototipo de electroestimulador, conformado por dos temporizadores 555 conectados entre sí (10). El primero fue configurado de modo estable para el control de la frecuencia de la EEM y el segundo de forma monoestable para brindar la terapia.

Frecuencias de electroestimulación

Se ajustaron las frecuencias de EEM a 4, 10 y 20 Hz. Se calcularon 3 valores de resistencias a partir de la siguiente fórmula, con el fin de obtener las frecuencias (f) deseadas.

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

Se despejó para poder obtener el valor de la resistencia 2 (R2) quedando la ecuación como:

$$R2 = \frac{\frac{1.44}{fC1} - R1}{2}$$

Se le asignó un valor a R1 de 220Ω y a C1 de 10μF. Obteniendo los valores mostrados en la Tabla 1.

F (Hz)	4	10	20
R2 (Ω)	17747	7090	3461

Tabla 1. Valores de las resistencias según la frecuencia de EEM.

Las resistencias se colocaron estratégicamente en la configuración estable del 1° temporizador. La salida del 2° temporizador se conectó a un LM317 (Regulador de voltaje positivo, salida ajustable, ONSEMI) (11), que controló la salida de amperaje, para que no fuera mayor a 10 mA, tomando en cuenta que intensidades mayores podrían dañar al deportista (12).

Control del EMG y la EEM

Se utilizó un Arduino Mega 2560 (microcontrolador Atmega) (13) y el software de MATLAB (9). El control del EMG y la EEM se dio por medio de las salidas y/o entradas tanto digitales como analógicas del Arduino por comunicación serial.

Las señales miográficas se captaron por el EMG y a su vez por una de las entradas analógicas del microcontrolador. Así mismo, la terapia de EEM fue controlada por las salidas digitales del arduino, la cual se controló mediante una interfaz gráfica con botones de 4, 10 o 20 Hz, creada en MATLAB (9).

Para evitar el proceso lento de colocar los electrodos para el EMG y posteriormente para la EEM, los dos prototipos fueron conectados a un mismo par de electrodos por medio de relevadores (SONGLE) (14).

Base de datos de señales electromiográficas

Mediante el prototipo de EMG se tomaron muestras de señales musculares del bíceps braquial en 60 atletas después de hacer ejercicio para crear la base de datos.

Se eligieron 3 disciplinas que incluyen la acción del músculo bíceps braquial: natación, gimnastas y arqueros. El procedimiento fue el siguiente: se colocaron los electrodos en el brazo derecho sobre el músculo y se les pidió que hicieran contracción con el brazo flexionado por 3 segundos. Se registraron 100 datos almacenados en un vector.

Además, en 27 de los 60 atletas; 15 nadadores, 10 gimnastas y 7 arqueros, se tomaron muestras antes del ejercicio con intención de demostrar que posterior a éste existe tensión muscular. Se obtuvo un vector V_{sr} (vector en reposo), mismo que se recolectó antes de realizar actividad física. Al finalizar el entrenamiento se capturó un vector V_{se} (vector de ejercicio).

Determinación de la terapia según la tensión muscular

Se aplicó EEM a 6 sujetos de prueba, 3 atletas correspondientes a cada una de las disciplinas ya mencionadas y 3 personas que practicaban ejercicio pero no de alto rendimiento. La aplicación de EEM consistió en administrar las frecuencias 4, 10 y 20 Hz a los 6 sujetos de prueba en distintos intervalos de tiempo (5, 10 y 15 minutos) luego de realizar actividad física durante 9 días según el cronograma de la Tabla 2. El propósito fue asociar las frecuencias de EEM a los atletas por medio de una encuesta de satisfacción a cada uno de los sujetos de prueba, con un valor del 1 al 10, siendo el 10 el valor de más satisfacción.

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

Tabla 2. Cronograma para la terapia de EEM

El procedimiento fue el siguiente: Se tomó una muestra de EMG del musculo del brazo derecho flexionado durante 3 segundos, obteniendo un vector V_{sr} de 100 datos. Luego, el sujeto de prueba realizó 20 repeticiones del ejercicio curl de bíceps con una mancuerna de 12 lb. Dicha actividad se consideró exhaustiva, pues el conjunto de sujetos así lo manifestó. Al finalizar el ejercicio, se capturó un vector V_{se} de 100 datos. Se proporcionó la

EEM a cada sujeto siguiendo el cronograma, con la finalidad de relajar y producir una mejor oxigenación en el músculo (15,16). Al terminar la terapia se realizó la toma de señales con el EMG obteniendo un vector V_{st} (vector de terapia) de 100 datos.

Redes Neuronales

El método de clasificación de datos implementado fue a través de redes neuronales (17). A partir de la base de datos con señales miográficas tomadas después de hacer ejercicio, las señales fueron ajustadas al sistema de redes neuronales diseñado en la plataforma de MATLAB (9). Las señales de la base de datos fueron etiquetadas dentro de la red neuronal según la EEM que el atleta necesite de acuerdo a la señal desprendida del músculo (alta, media, baja). De esta manera, cuando el EMG capta una señal será procesada por la red neuronal y se sugerirá un grado de EEM.

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.

RESULTADOS

Electromiograma

Se fabricó un electromiograma capaz de leer señales musculares (Figura 1).

Electroestimulador

Se creó un electroestimulador capaz de proporcionar EEM de 4,10 y 20 Hz.

Control del electroestimulador

Se obtuvo una interfaz gráfica capaz de controlar la terapia de EEM (Figura 2).

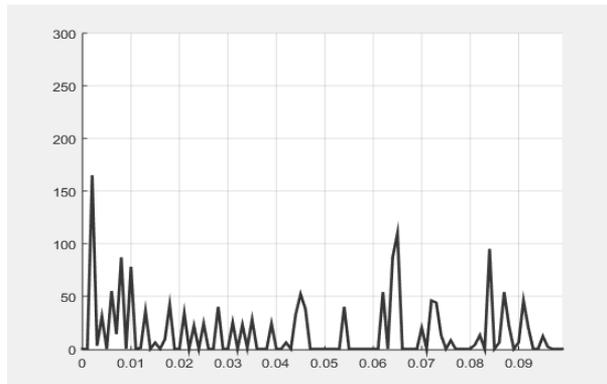


Figura 1. Lectura de señal muscular del músculo bíceps braquial con el prototipo de electromiograma.

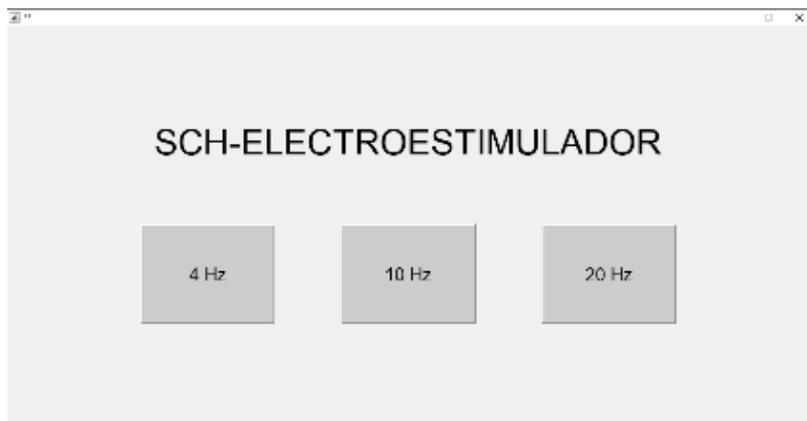


Figura 2. Interfaz gráfica para el control de la EEM

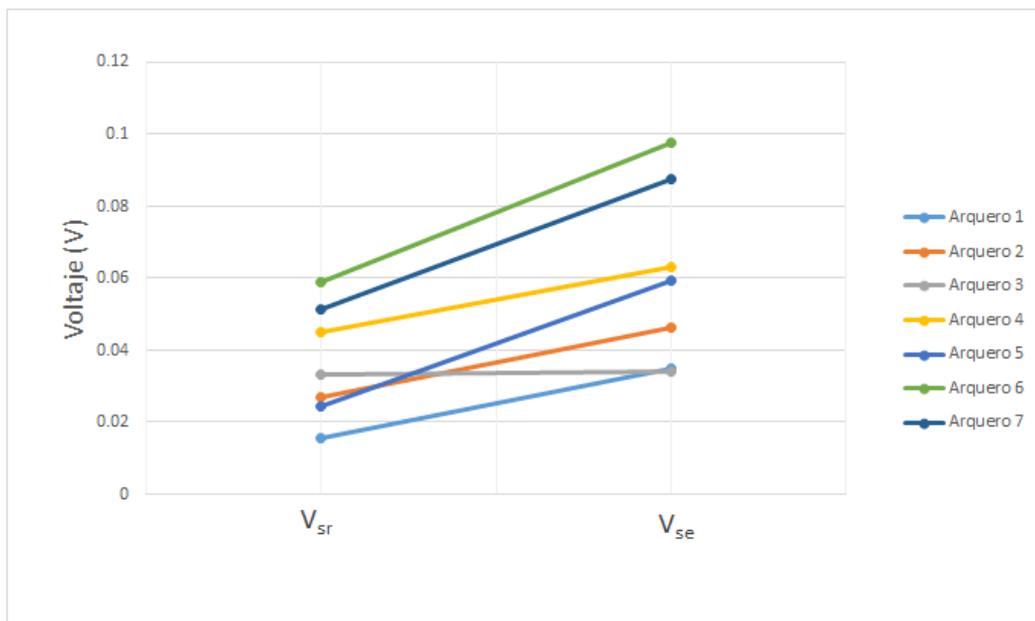


Figura 3. Demostración del aumento de la señal en el músculo bíceps braquial en los atletas de tiro con arco.

Base de datos

Se obtuvo una base de datos de señales electromiográficas de 60 atletas. Se logró comprobar a través de nuestro prototipo de EMG, 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, como se ve en la figura 3.

Determinación de la terapia según la tensión muscular

La encuesta de satisfacción en escala del 1 al 10 aplicada a los 6 sujetos, refiriéndose a satisfacción al grado de relajación que consideraron con cada frecuencia y tiempos establecidos se muestra en la figura 4. Los sujetos 1, 2 y 3, son atletas de alto rendimiento y los sujetos 4, 5 y 6, personas que practican ejercicio moderado. En la figura se observa que el sujeto 1 manifestó mayor satisfacción por frecuencias bajas (4 Hz), al igual que el sujeto 2 y 3, en cambio en los sujetos 4,5 y 6, se puede observar que ocurre lo contrario, muestran un mayor grado de satisfacción en frecuencias de 20 Hz. En ambos casos, el lapso de tiempo de más agrado fue el de 15 minutos.

En la figura 5 se muestran los promedios obtenidos de voltajes de las señales miográficas del día 3 y 9, donde la escala de satisfacción fue de 9 o 10 en cada uno de los 6 sujetos. 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} . Así se confirma que la EEM es una terapia que promueve la relajación muscular, de acuerdo a V_{sr} , V_{se} y V_{st} .

Tomando en cuenta lo anterior se concluyó que aquellas personas que practican ejercicio en forma moderada responden mejor a la EEM de 20 Hz, mientras que las que de alto rendimiento tienen mejor respuesta a frecuencias como 4 Hz. Esto se puede observar

en la figura 6, donde se hace la comparación entre los sujetos 3 y 6, en dos diferentes frecuencias, ambas durante 15 minutos.

Redes neuronales

Se obtuvieron tres redes neuronales con una precisión de 100 %, las cuales fueron entrenadas según las etiquetas de las señales miográficas de la base de datos (baja, media y alta), es decir, cada red fue experta en 4, 10 o 20 Hz.

En la figura 7 se muestran la matriz de confusión de nuestro sistema de redes neuronales además de su configuración.

DISCUSIÓN

Nuestro principal hallazgo fue sugerir un método que propone la terapia adecuada para el deportista de alto rendimiento según su tensión muscular luego de hacer ejercicio, además se demostró que la terapia de EEM es una buena técnica para la relajación muscular post ejercicio.

Los resultados fueron concretos a pesar de que no todos los deportistas participantes realizaban la misma actividad física. Se observó que antes y después del ejercicio existe un cambio en la señal muscular, siendo mayor posterior al ejercicio.

Para la determinación de la terapia de la EEM, con los resultados obtenidos de acuerdo a la encuesta de satisfacción, se comprobó que la relajación del músculo depende del estado físico del sujeto. Con respecto al tiempo de EEM, se observó que el tiempo óptimo es de 15 minutos. Según Malone, et. al, la frecuencia media utilizada en sus estudios fue de 4,7 Hz, con un rango de 1 a 8 Hz, las cuales se encuentran dentro del rango esperado de frecuencias que se utilizan normalmente para inducir contracciones musculares subtetánicas. La estimulación eléctrica neuromuscular utilizada con el propósito de mejorar la recuperación

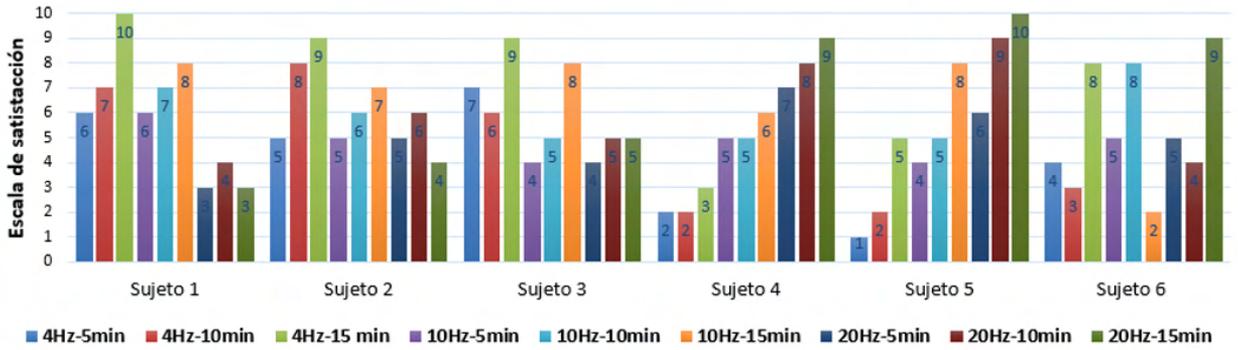


Figura 4. Encuesta de satisfacción/relajación de los 6 sujetos de prueba según el grado de EEM y tiempo establecido.

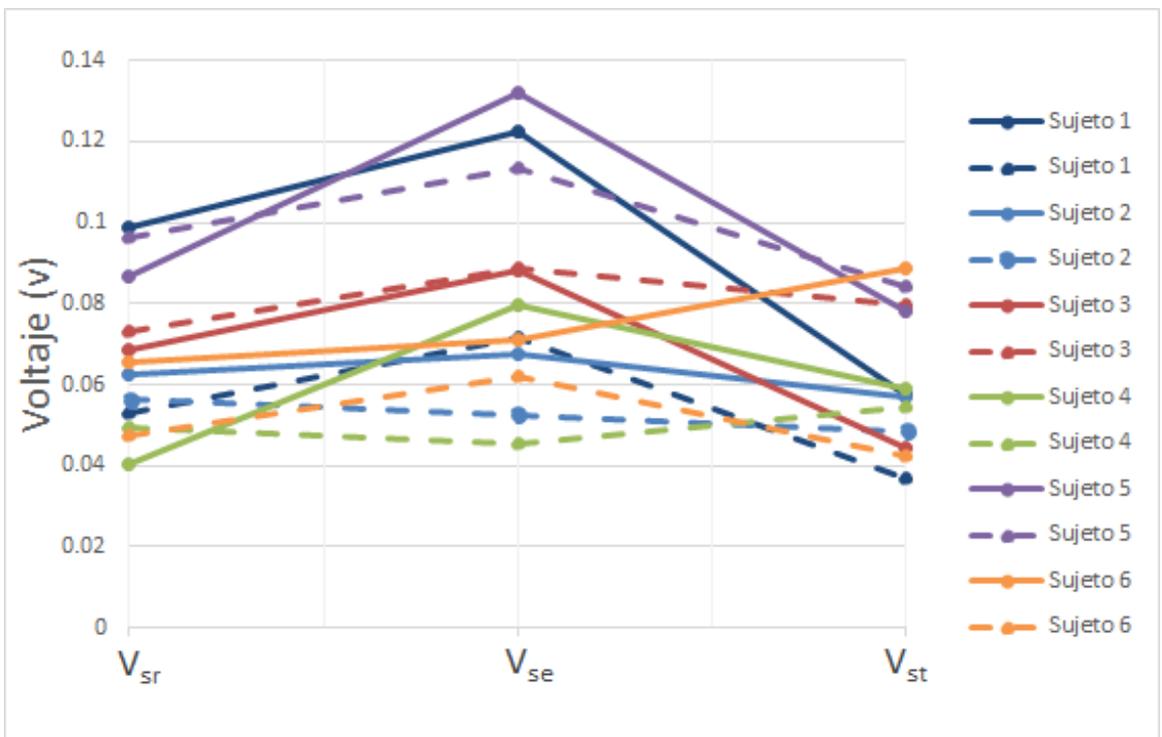


Figura 5. Resultados del promedio de los 100 datos guardados en los vectores (V_{sr}, V_{se} y V_{st}) obtenidos con el EMG de cada uno de los sujetos en la determinación de la terapia en el día 3 (línea punteada) y día 9 (línea continua).

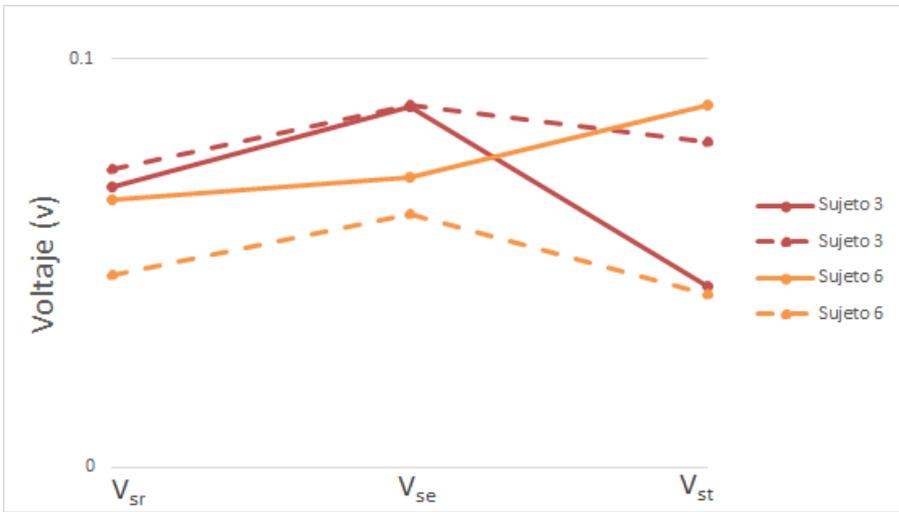


Figura 6. Comparación entre un sujeto de alto rendimiento y un sujeto de bajo rendimiento con frecuencia de 4 Hz (línea continua) y de 20 Hz (línea punteada).

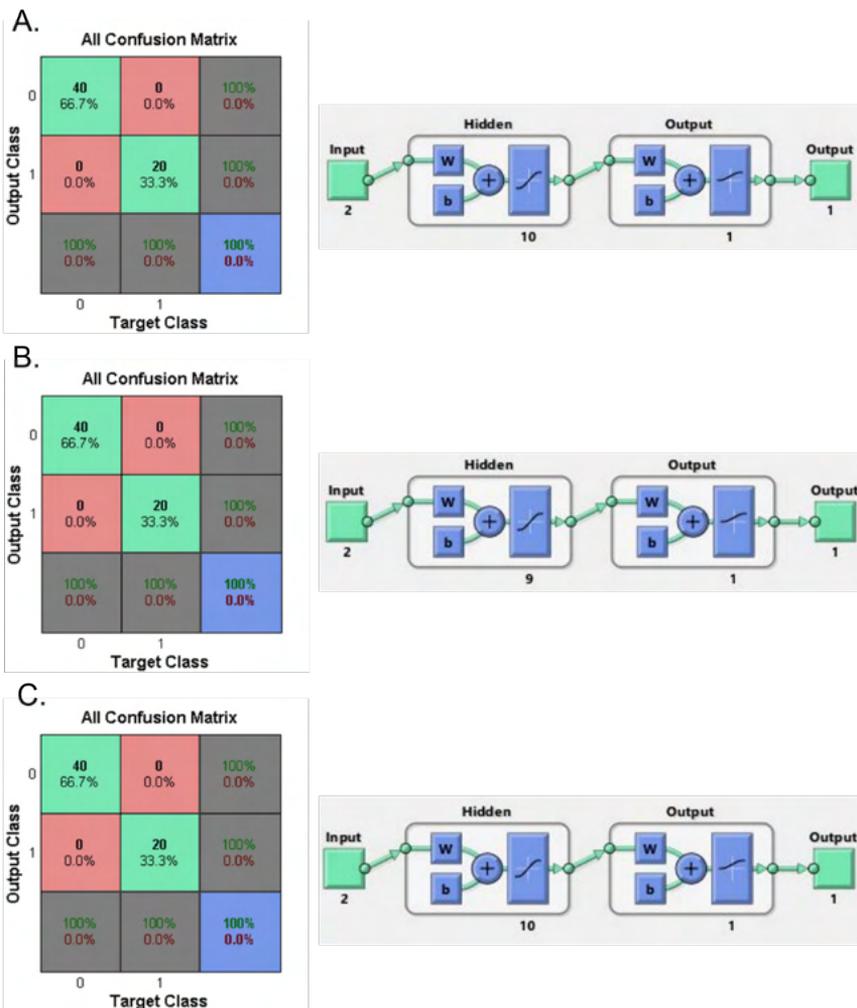


Figura 7. A) Se muestra la matriz de confusión, así como su configuración de la matriz experta en 4 Hz. B) Se muestra la matriz de confusión, así como su configuración de la matriz experta en 10 Hz. C) Se muestra la matriz de confusión, así como su configuración de la matriz experta en 20 Hz.

después del ejercicio se caracteriza por el uso de estimulación de baja frecuencia para inducir contracciones musculares leves, en contraposición a la estimulación de alta frecuencia y baja intensidad que se usa normalmente para estimulación a nivel sensorial (18), concordando con nuestra encuesta de satisfacción, en donde las frecuencias bajas (4 Hz) son más adecuadas para la recuperación del músculo en deportistas. Además, según Soto, et. al, menciona en una de sus conclusiones sobre su investigación, que la EEM actúa de manera diferente con deportistas de alto rendimiento a comparación con sujetos menos entrenados. El resultado que ellos notaron fue que para los primeros no se encuentran muchos efectos cuando se les aplica EEM, los cuales fueron medidos por medio de pruebas físicas. En el caso de los sujetos menos entrenados se observaba una mejoría en sus resultados en estas pruebas. Esto con relación a nuestra investigación se puede observar en la figura 6, donde mencionamos que son mejores las frecuencias altas (20 Hz) para personas que practican ejercicio de manera moderada o sujetos menos entrenados y para deportistas de alto rendimiento los atletas responden mejor a frecuencias bajas. Por lo tanto, cada individuo corresponde a una terapia distinta, lo cual proporciona nuestro prototipo al ser capaz de analizar y clasificar los parámetros para proporcionar una EEM a frecuencias cercanas a las necesarias para una correcta recuperación del músculo (19).

En cuanto la utilización de las redes neuronales, se obtuvo una eficiencia del 100% en cada resultando un método totalmente confiable para sugerir el grado de EEM según la señal captada del músculo.

Nuestra principal limitante fue que solo se pudo probar nuestro método propuesto en el músculo del bíceps braquial.

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 EEM a través de un sistema de redes neuronales, 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 espera que la obtención de señales miográficas crezca y se pueda ir actualizando para distintos enfoques musculares, de manera que el dispositivo pueda ser utilizado por cualquier deportista.

REFERENCIAS

1. Díaz FJ. Lesiones musculares en el deporte. (Muscular injuries in sport). RICYDE Rev Int Cienc Deporte Doi105232ricyde. 2006;2(3):55-67.
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. enero de 2015 [citado 8 de noviembre de 2021]; Disponible en: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/49766>

3. Moyano MM, Peña García-Orea DG, Heredia Elvar DJR. Control de la Carga Interna en Deportes Colectivos. Relación con el Rendimiento, la Fatiga y la Prevención de Lesiones - Instituto Internacional de Ciencias del Ejercicio Físico y Salud. *International Journal of Physical Exercise and Health Science for Trainers* [Internet]. 2020 [citado 8 de noviembre de 2021]; Disponible en: <https://g-se.com/control-de-la-carga-interna-en-deportes-colectivos-relacion-con-el-rendimiento-la-fatiga-y-la-prevencion-de-lesiones-2767-sa-V5e8bb61fa6a86>
4. Marulanda AG, Segura LMZ, Mosquera EE, Vallejo MAV, Riascos ITA, Ararat DCR. Revisión de las técnicas de recuperación post entrenamiento más usadas para disminuir la incidencia de fatiga crónica en futbolistas. *Rev VERITAS Sci - UPT*. 14 de diciembre de 2020;9(2):253-62.
5. Campos-Jara C, Martínez-Salazar C, Carrasco-Alarcón V, Arcay-Montoya R, Ramírez-Campillo R, Mariscal-Arcas M, 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*. marzo de 2016;9(1):3-6.
6. Matich DJ. *Redes Neuronales: Conceptos Básicos y Aplicaciones*. 2001.
7. INA128 data sheet, product information and support | TI.com [Internet]. [citado 7 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://www.ti.com/product/INA128>
8. Correa-Figueroa JL, Morales-Sánchez E, Huerta-Ruelas JA, González-Barbosa JJ, Cárdenas-Pérez CR, Correa-Figueroa JL, et al. Sistema de Adquisición de Señales SEMG para la Detección de Fatiga Muscular. *Rev Mex Ing Bioméd*. abril de 2016;37(1):17-27.
9. MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink [Internet]. [citado 7 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
10. NE555 data sheet, product information and support | TI.com [Internet]. [citado 7 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://www.ti.com/product/NE555>
11. LM317 data sheet, product information and support | TI.com [Internet]. [citado 7 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://www.ti.com/product/LM317>
12. Mayorga-Rodríguez JN. Sistema efecto Táser para dispositivo móvil como método antirrobo. 2021 [citado 8 de noviembre de 2021]; Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/26158>
13. Arduino Mega 2560 Rev3 [Internet]. Arduino Official Store. [citado 7 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>
14. SRD-05VDC-SL-C-Datasheet.pdf [Internet]. [citado 7 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://www.circuitbasics.com/wp-content/uploads/2015/11/SRD-05VDC-SL-C-Datasheet.pdf>
15. Ponce Soria ÁA. Electroestimulación para la ejecución de ejercicios de fortalecimiento muscular. 8 de marzo de 2019 [citado 8 de noviembre de 2021]; Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/39585>
16. Bastidas Agualongo JD. La electroestimulación y su incidencia en el desarrollo de la fuerza máxima en los levantadores de pesas olímpicos de la categoría juvenil. 2017 [citado 8 de noviembre de 2021]; Disponible en: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/3811>
17. Serna M. E, Serna A, Acevedo E. Principios y características de las redes neuronales artificiales. En 2017. p. 173-82.
18. Malone JK, Blake C, Caulfield BM. Neuromuscular Electrical Stimulation During Recovery From Exercise: A Systematic Review. *J Strength Cond Res*. septiembre de 2014;28(9):2478-506.
19. Soto CEP. Electroestimulación Con Ejercicios Físicos Para Aumentar La fuerza Rápida Del Cuádriceps. *Xihmai*. 2010;5(9):59-74.