



## DESARROLLO DE UN SIMULADOR DE LA CONTRACCIÓN MUSCULAR

Erika Alarcón Ponce<sup>a</sup>, Rosa María Reyes Chaperó<sup>a</sup>, Marleni Reyes Monreal<sup>b</sup>, Arturo Reyes Lazalde<sup>a</sup>, y María Eugenia Pérez Bonilla<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Escuela de Biología-BUAP, Puebla, Pue. [eerikaalarcon@gmail.com](mailto:eerikaalarcon@gmail.com), [romarec2008@hotmail.com](mailto:romarec2008@hotmail.com), [arturoreyeslazalde@gmail.com](mailto:arturoreyeslazalde@gmail.com), [bonillaeugenia@gmail.com](mailto:bonillaeugenia@gmail.com)

<sup>b</sup>Dirección General de Innovación Educativa-BUAP, Puebla, Pue. [marleni.reyes@yahoo.com.mx](mailto:marleni.reyes@yahoo.com.mx)

### RESUMEN

Los modelos matemáticos representan una importante herramienta para el estudio y comprensión de algún proceso biológico, en este caso el de la contracción muscular. Mediante la simulación se pueden describir, predecir y comprender dicho fenómeno. Este trabajo tiene como objetivo representar en el software computacional Visual Basic 5.0 para ambiente Windows desde XP a Windows 8, los procesos que implica la contracción muscular, así como conocer las características del músculo, las células que lo conforman, las proteínas implicadas, la secuencia de la contracción muscular y los modelos matemáticos que se han realizado para comprender el funcionamiento del músculo. El simulador está representado por una serie de interfaces en las cuales se puede observar conceptos para comprender las características principales del músculo, así como el modelo que diseñó Hill en 1922. Se pueden observar las gráficas que representan la contracción isotónica, la deformación del tendón, el modelo de Hill, entre otras. El programa es interactivo y esto facilita su uso. Para finalizar, el disponer de un software especializado en la simulación permite al usuario tener una herramienta para el estudio y comprensión de fenómenos que ocurren en la fisiología de los organismos.

### 1. INTRODUCCIÓN

El cuerpo humano tiene tres tipos diferentes de músculos: músculo cardiaco, músculo liso y músculo esquelético [1]. Los músculos estriados son fundamentales para actividades como el movimiento voluntario, el mantenimiento de la postura, dirigir la mirada, y expresiones faciales, entre otras. Los músculos están constituidos por células alargadas, las fibras musculares, el tejido conectivo o conjuntivo que las rodea y que contiene nervios, vasos y capilares sanguíneos, y por los tendones que permiten su inserción a los huesos [2]. Específicamente, el músculo esquelético se observa al microscopio de luz con una serie de estrías y bandas oscuras y claras separadas por líneas, llamadas "z" que delimitan una sarcómera. Actualmente, se sabe la estructura molecular de cada una de estas bandas y líneas [1]. La contracción voluntaria del músculo esquelético se inicia por la actividad en el sistema nervioso. El lugar donde se inicia la intención para un movimiento en particular, es un tema que se está estudiando y debatiendo actualmente y aún no existe claridad al respecto. Sin embargo, las neuronas piramidales de la corteza motora (área 4) mandan sus axones por dos vías: (i) la vía directa y (ii) la vía indirecta. Los axones de la vía directa después de cruzar en el tronco del encéfalo se dirigen a las motoneuronas ubicadas en la médula espinal. En tanto que, los axones de las piramidales de la vía indirecta hacen sinapsis en varios núcleos para por fin llegar a la motoneurona [1]. Las motoneuronas inervan a los músculos, su terminal axónica se dividen varias veces para llegar a un grupo de miocitos. La llegada de un potencial de acción a la terminal axónica, abre canales de calcio voltaje dependientes y en consecuencia la corriente de calcio entrante permite la liberación del neurotransmisor [3]. La acetilcolina liberada al espacio sináptico de la placa neuromuscular se une a canales de tipo



nicotínicos ubicados en la membrana del músculo que forma esta placa. La apertura de estos canales produce una corriente entrante de sodio y una saliente de potasio por el mismo canal. Esta actividad ocasiona una despolarización que inicia el potencial de acción muscular que se desplaza por los túbulos T, produciendo la apertura de canales de calcio dependientes de voltaje localizados en el retículo sarcoplásmico. Finalmente, se produce la contracción muscular [5]. Los eventos electrofisiológicos y moleculares de la contracción muscular ya son conocidos [6]. Se sabe que la contracción muscular se debe a la interacción de dos proteínas fibrilares: la actina y la miosina; se inicia con la unión de dos moléculas de calcio que se unen a la tropomiosina "C", este proceso desplaza a la troponina I, y esto descubre una zona en la actina que permite la unión de las cabezas de la miosina. La consecuencia es el desplazamiento de la actina sobre la miosina produciéndose la contracción muscular [6]. Para la relajación es necesaria energía (ATP).

Los estudios de la contracción muscular permiten distinguir dos tipos de contracciones: la contracción isotónica y la contracción isométrica. En la isotónica, el músculo es cargado en uno de sus extremos con un peso y el otro está fijo; ante un estímulo, el músculo se contrae acortando su longitud. En la isométrica, el músculo es fijado de ambos extremos; ante un estímulo, el músculo se contrae produciendo un incremento en la fuerza muscular sin que se acorte el músculo. Ambos tipos de contracciones se producen en la vida cotidiana. Sin embargo, la contracción isométrica produce mayor fuerza. En todo caso, su inserción en los huesos mueven palancas, unas que producen un amplio desplazamiento y permiten una acción rápida (por ejemplo, de huida) y otras que producen solamente pequeños desplazamientos y permiten una acción tónica [1]. A los músculos estriados también se les puede clasificar en rápidos y lentos (tónicos). La diferencia de este tipo de músculos se presenta en su estructura y en los tiempos de interacción del calcio con la troponina C, y en consecuencia en los tiempos de unión de la actina y la miosina. Los músculos rápidos, entre otras características, tienen alineadas las líneas Z; en tanto que, los tónicos o lentos, tienen las líneas Z dentada, en zigzag.

Los primeros estudios de la contracción muscular fueron realizados por Hill en 1922 y 1938. En este trabajo se propone un modelo del músculo formado por un elemento elástico en serie con un elemento contráctil [7, 8]. Este modelo, llamado visco-elástico, ha sido usado ampliamente para el estudio teórico de la contracción muscular.

En este trabajo se diseñó un simulador de la contracción muscular isotónica mediante el modelo viscoelástico de Hill.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

El simulador se desarrolló con el software computacional Visual Basic 5.0 para ambiente Windows desde XP a Windows 8. El simulador permite al usuario comprender el proceso de la contracción muscular mediante el acceso a dos módulos principales: (1) Módulo para el estudio de la velocidad contra la longitud y (2) módulo para el estudio de la contracción isotónica.

En este simulador se utilizó el modelo propuesto por Hill en 1922: consta de elementos pasivos en serie y en paralelo amortiguados por una viscosidad interna capaz de ejercer fuerza, trabajo o calor (figura 1).

En el modelo visco-elástico del músculo la ecuación diferencial que caracteriza el movimiento en condiciones de contracción isotónica es:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (1)$$

Donde: "m" es la masa (peso) con que se carga uno de los extremos del músculo. "k" es una constante que tiene que ver con el componente elástico del músculo, "c" es otra constante que



tiene que ver con la parte que amortigua el sistema, parte viscosa del modelo del músculo, “ $x$ ” es el desplazamiento del músculo (ante un estímulo).

La solución de esta ecuación se realizó descomponiendo la ecuación de segundo orden en dos ecuaciones de primer orden que se resolvieron simultáneamente por medio de métodos numéricos.

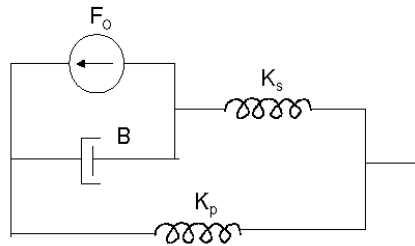


Fig. 1. Modelo mecánico unidimensional.  $K_s$  corresponde al componente elástico en serie,  $K_p$  es el componente elástico en paralelo,  $B$  es el componente que amortigua y  $F_o$  es el sistema contráctil actina-miosina. En este modelo se considera que la fuerza y el desplazamiento se producen principalmente en la dirección de las fibras musculares, por eso es unidimensional.

### 3. RESULTADOS

El simulador desarrollado es ejecutable y cuenta con varios módulos de enseñanza. La figura 1, muestra la pantalla de inicio donde se encuentra el menú principal. En esta primera versión se tiene acceso a las simulaciones de la relación velocidad contra longitud. El usuario puede variar el peso impuesto en uno de los extremos de la preparación muscular (figura 2).

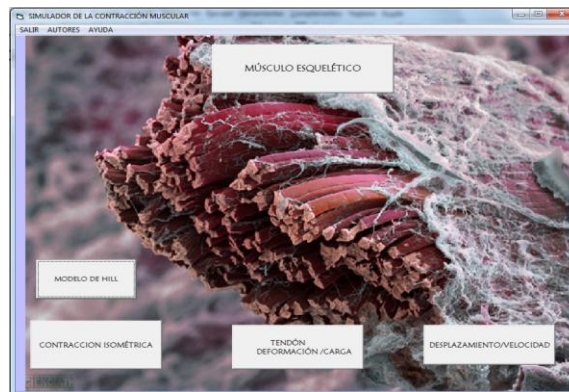


Fig. 1. Interfaz del simulador con el menú principal.

Como se puede observar en la figura 2, conforme se aumenta la carga la longitud del músculo se hace mayor, sin embargo, la velocidad de alargamiento disminuye.

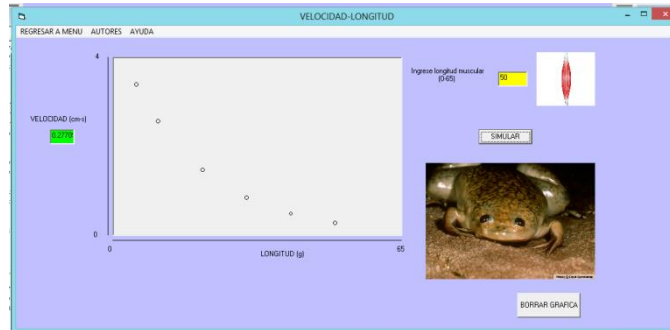


Fig. 2. Simulación que muestra la relación velocidad vs longitud con respecto al aumento de un peso colocado en uno de los extremos del músculo.

En los experimentos de contracción isotónica uno de los extremos del músculo está fijo y el otro mantiene un peso. Ante un estímulo, el músculo produce una contracción y se observa un desplazamiento. En condiciones normales, el músculo es altamente amortiguado y esta situación obliga a que el músculo prácticamente no oscile (figura 3).

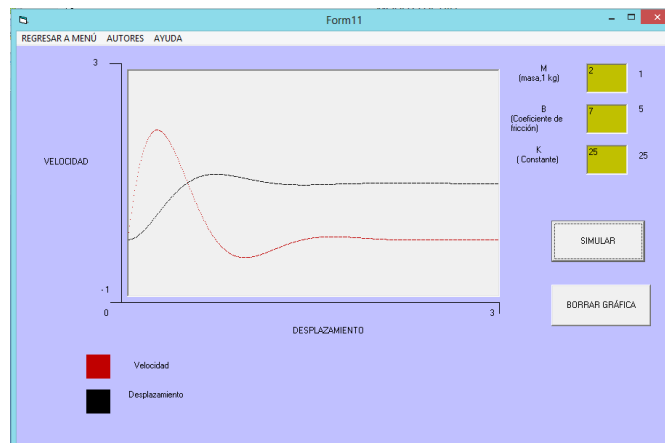


Fig. 3. Simulación de una contracción isométrica. En el osciloscopio se muestran los registros de la velocidad y el desplazamiento. El desplazamiento se observa amortiguado.

La figura 4, muestra una simulación con el mismo peso en el extremo del músculo, pero con un factor de rozamiento bajo. El resultado es un desplazamiento que oscila fuertemente. Esta característica se encuentra en pacientes con alteraciones motoras como el Parkinson. La constante  $k$  del sistema cuando aumenta disminuye la amplitud.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un simulador de la contracción muscular, muestra fenómenos que suceden cuando se lleva a cabo la contracción en condiciones isométricas. Esta primera versión permite reproducir la contracción muscular de acuerdo al modelo viscoelástico de Hill. El simulador es de fácil manejo y no requiere de conocimientos especiales de computación. Es ejecutable en



ambiente Windows® desde Xp a Windows 8. En una siguiente versión se incorporará un módulo para reproducir contracciones musculares isotónicas.

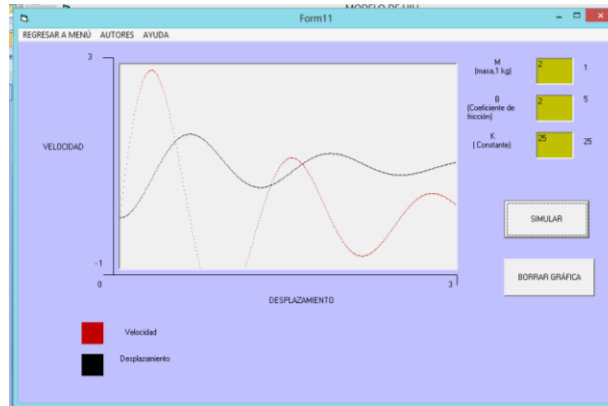


Fig. 4. Simulación de contracción isotónica sin amortiguamiento. Las oscilaciones en el desplazamiento son más amplias y el músculo oscila fuertemente.

## BIBLIOGRAFÍA

1. A. Larios, "Estructura y función del músculo", Centro de Investigaciones Biomédicas, Colima. 1998.
2. C. Caputo, "Compendio histórico de fisiología muscular". Venezuela. 2011, pp17-138.
3. R. Llinas, I. Z. Steinberg, K. Walton, "Presynaptic calcium currents and their relation to synaptic transmission: Voltage clamp study in squid giant synapse and theoretical model for the calcium gate". Proc. Natl Acad. Sci. 73: 2918-2922, 1976.
4. G. M. Shepherd, "Foundation of the neuron doctrine". Oxford University Press, Oxford, 1991.
5. A. F. Huxley, R. M. Simmons, "Proposed mechanism of force generation in striated muscle". Nature 233:533-538, 1971.
6. A. M. Gordon, A. F. Huxley, F. J. Jilian, "The variation in isometric tension with sarcomere length in vertebrate muscle fibres". J. Physiol. 184:170-192, 1966.
7. A. V. Hill, "The heat of shortening and the dynamic constants of muscle". Proc. R. Soc. Lond. 126:136-195, 1938.
8. A. V. Hill, "The maximum work and mechanical efficiency of human muscles, and their most economical speed". 20-41, 1922.