

Caracterización de una línea bifilar a partir del modelamiento de una neurona

Characterization of a two-wire line from the shaped of a neuron

GONZALO GALINDO CERINZA

Estudiante de 10 semestre de Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Correo electrónico: andresitostr@hotmail.com

LEANDRO GUZMÁN LÓPEZ

Estudiante de 10 semestre de Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Correo electrónico: leovermeta@hotmail.com

LEONARDO OLAYA BELLO

Estudiante de 10 semestre de Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Correo electrónico: "leo_laya@hotmail.com

HERNÁN PAZ PENAGOS

Magíster en Teleinformática de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia, Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y Filósofo de la Universidad Santo Tomás de Aquino. Docente del área de comunicaciones, Facultad de Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Correo electrónico: hpaz @ escuelaing.edu.co

Clasificación del artículo: reflexión (Re-creaciones)

Fecha de recepción: 2 de marzo de 2008

Fecha de aceptación: 30 de marzo de 2008

Palabras clave: fibra nerviosa, línea bifilar, línea coaxial, potencial de acción, ecuación de Nerst.

Key words: nervous fiber, bifilar line, coaxial line, action potential, Nernst equation.

RESUMEN

Una fibra nerviosa posee en el Potencial de Acción, una característica importante en la transmisión de la información. Mediante el intercambio de iones de Sodio y Potasio a través de la membrana celular, la fibra nerviosa cambia desde un estado de reposo, de

aproximadamente -100 mV, a un estado de excitación de 40 mV. La morfología y fisiología de la neurona permite hacer analogías con líneas de transmisión, tanto bifilar, como coaxial, ya que existen parámetros tales como la conductancia, la resistencia y la capacitancia, que se han encontrado en las fibras

nerviosas. Sin embargo, hay detalles en la neurona y en el sistema nervioso que no se pueden modelar matemáticamente como líneas de transmisión y, por ende, tampoco se pueden simular para inferir mejoras en los canales de comunicación electrónicos.

ABSTRACT

A nervous fiber has in the Action Potential an important characteristic in the transmission of the information. By means of the exchange ions of Sodium and Potassium through the cell membrane, the nervous fiber changes from a normal resting

value, approximately -100 mV, to a critical threshold of 40 mV. Taking into account that there are parameters such as the conductance, the resistance and the capacitance, which they have found in the nervous fibers, the neuron morphology and physiology allows to do analogies with transmission lines, as many bifilar as coaxial. Nevertheless, there are details in the neuron and in the nervous system that they cannot shape mathematically as transmission lines; therefore, they cannot be simulated to infer improvements in the electronic communication channels either.

* * *

1. Introducción

Jean Pierre Changeux menciona en su libro *El hombre neuronal*: “Los cables de ese teléfono interior son las fibras nerviosas, axones y dendritas” [1]; esta frase hace referencia a los canales de comunicación que interconectan el interior del ser humano. Es evidente que el sistema nervioso de todo ser vivo, al igual que un sistema de comunicaciones electrónico, está formado por emisores, receptores y canales [12]. Las neuronas, como canales básicos en el transporte de información en el sistema nervioso, son eficientes porque no presentan pérdidas, ni errores y tampoco son susceptibles de interferencias; estas características serían las deseables para poseer en cualquier sistema de comunicaciones electrónico alámbrico; sin embargo, la realidad es otra. En este artículo, que resume el desarrollo de un trabajo de investigación de último semestre de pregrado en Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería, se establece una analogía entre la neurona y las líneas de transmisión, con el propósito de inferir algunas mejoras en los medios de comunicación electrónicos alámbricos, a partir del reconocimiento de la neurona como canal de comunicación.

2. Marco teórico

2.1 Potencial de acción en la neurona

Un potencial de acción es un cambio rápido en el potencial de la membrana que se extienden a grandes velocidades por la membrana de la fibra nerviosa.

2.2 Fases del potencial de acción

Como lo ilustra la figura 1, el potencial de acción presenta varias fases en su corta duración.

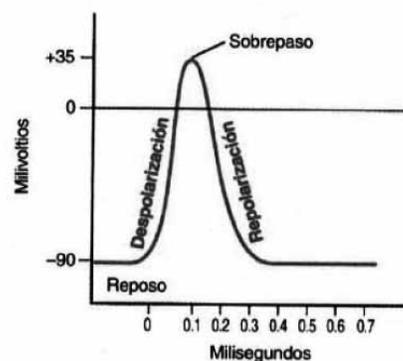


Figura 1. Potencial de acción [2].

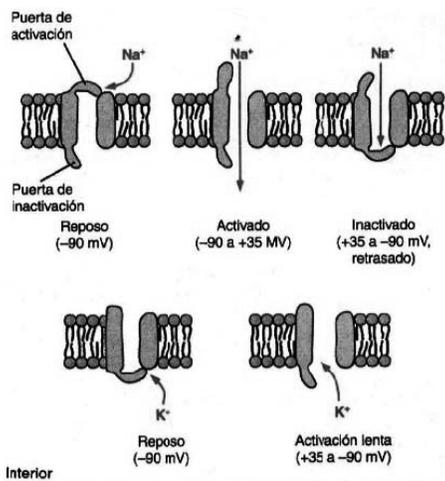


Figura 2. Activación de los canales de sodio y potasio [2].

- Activación del canal de Sodio: se abren las puertas de la membrana, cuando el potencial de ésta se hace más positiva que la del estado de reposo (entre -70 y -50 mV); en este momento los iones de sodio invaden el interior de la membrana y así se aumenta la permeabilidad de ésta al Sodio.
- Inactivación del canal de Sodio: después de algunas diezmilésimas de segundo de estar abierto el canal, éste comienza a cerrarse lentamente; esto hace que los iones de Sodio no puedan ingresar hasta que la membrana no llegue a su potencial de reposo. El potencial de acción en la fibra nerviosa vuelve a empezar cuando la misma membrana se haya repolarizado.
- Activación del canal de Potasio: cuando se están cerrando los canales de Sodio se abren los de Potasio para llevar a la membrana a su potencial de reposo.

2.3. Proceso de formación del potencial de acción

Para generar un potencial de acción se necesita aproximadamente una elevación de 15 a 30 milivol-

tios en el potencial de membrana (-65 mV es denominado el umbral de estimulación de un potencial de acción); en este momento, las conductancias de los canales de Sodio y Potasio varían, esto permite la difusión de los iones en los diferentes estados del potencial de acción, ver figura 3.

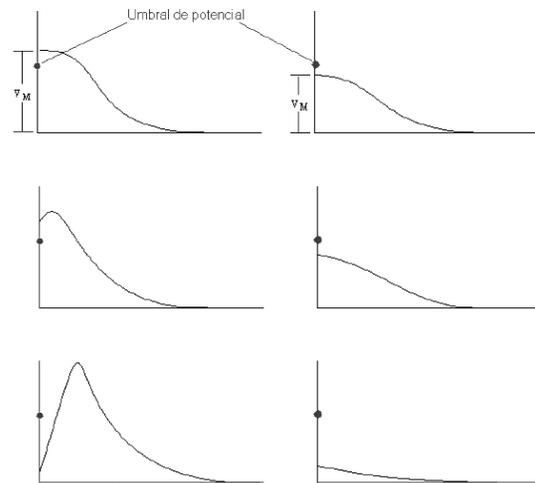


Figura 3. Las figuras de la columna izquierda muestran cómo se genera el PA y las de la columna derecha cómo se desvanece una señal que no representa algo para el sistema nervioso.

Una vez el potencial de membrana se eleva más allá del umbral de estimulación, la fibra nerviosa crea una realimentación positiva en la apertura de canales de Sodio y de Potasio, lo que genera una cadena que se extiende por todos los canales de la fibra nerviosa, llevando así el potencial por toda la fibra, ver figura 4.

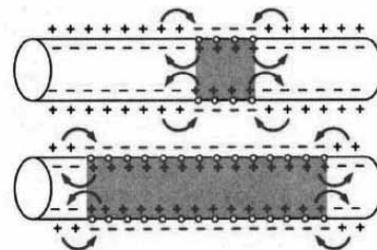


Figura 4. Propagación de un potencial [2].

Algunos potenciales de acción presentan un fenómeno conocido como meseta, como se observa en la figura 5, que sucede cuando la repolarización no se presenta inmediatamente después de la despolarización, entonces, este potencial permanece con un nivel casi constante, similar a una meseta, durante varios milisegundos hasta iniciar de nuevo su repolarización. Este fenómeno eléctrico se presenta frecuentemente en las fibras del músculo cardíaco, las cuales hacen que la contracción del músculo se prolongue por varios milisegundos.

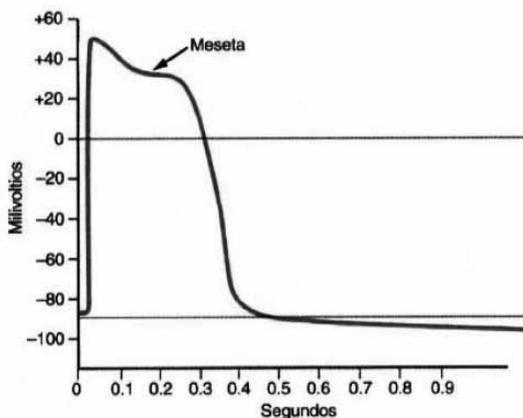


Figura 5. Meseta en un potencial de acción [2].

2.4 Propagación del potencial de acción

Para que la información llegue a su destino y se realicen las respectivas funciones, se hace necesaria la transmisión de los impulsos a través de todo el nervio o cadena de neuronas. El paso del potencial de acción de una neurona a otra contigua se da gracias a la interconexión de sus respectivas dendritas (ver figura 6). El proceso de intercambio de energía entre ellas se denomina sinapsis y es indispensable en la propagación de los impulsos.

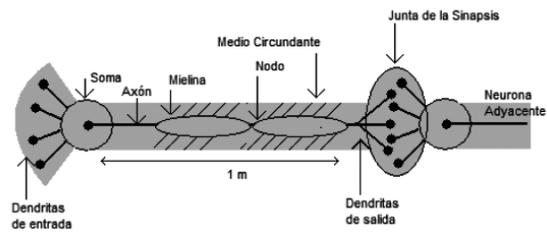


Figura 6. Diagrama idealizado de una neurona típica, como se encuentra en el nervio ciático de mamífero [4].

Como se observa en la figura 7, el cambio de conductancia en la fibra nerviosa incide en la propagación del impulso; dicho cambio depende del intercambio del Sodio y Potasio entre el interior y el exterior de la célula nerviosa, lo cual, a su vez, depende del cambio de la permeabilidad de la membrana. El cambio de las conductancias del Na^+ y K^+ es inverso y se refleja en el potencial, así: cuando el potencial de acción pasa de la fase de reposo a la de despolarización la conductancia de Sodio aumenta y la del Potasio disminuye; mientras que cuando el potencial de acción retorna de la fase de repolarización a la de reposo, la conductancia del Sodio disminuye y aumenta la conductancia del Potasio. Es importante tener en cuenta el nivel de aumento de la conductancia del Na^+ , ya que el cambio en la conductancia puede ser hasta 5.000 veces, en un intervalo de tiempo mínimo [5].

2.5 Comportamiento del potencial de acción con la frecuencia

La frecuencia de transmisión de las señales en los canales nerviosos depende del tipo de fibra, en el cual se propaguen, pues se puede desplazar a través de dos tipos de fibras distintas, a saber: mielínicas y amielínicas.

Como se ilustra en la figura 8, en las fibras nerviosas mielínicas el potencial de acción se propaga a saltos; debido a que estas señales van de nódulo de Ranvier a nódulo, distanciados aproximadamente 1-2 mm [13], y no a través del axón; esta propagación se caracteriza por ser de alta frecuencia, ya

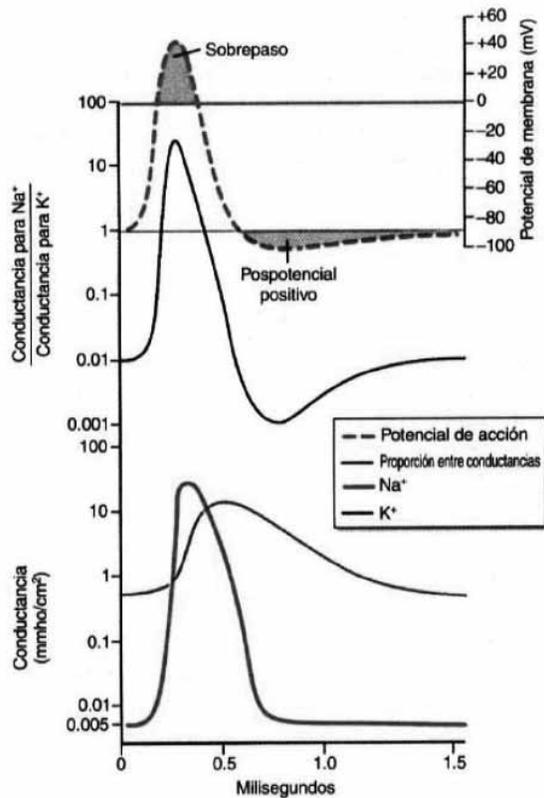


Figura 7. Cambios en las conductancias del sodio y el potasio durante el potencial de acción [5].

que los procesos de despolarización van saltando de nódulo en nódulo, pierden menos iones y, por consiguiente, se conserva más la energía; además, requieren menos metabolismo para restablecer las diferencias de concentración de iones de Sodio y Potasio. A través de estas fibras se pueden propagar potenciales de acción con tasas desde $0,5m/s$ hasta $120m/s$.

La conducción a saltos tiene otras ventajas, tales como el excelente aislamiento de la membrana de mielina, y la reducción de unas 50 veces la capacitancia de la membrana, lo cual permite que ocurra una repolarización con poca transferencia de iones y que haya menos retardo en la propagación del potencial de acción. La capacitancia reducida se da por la esfingomielina, sustancia que se caracteriza por ser un buen aislante eléctrico.

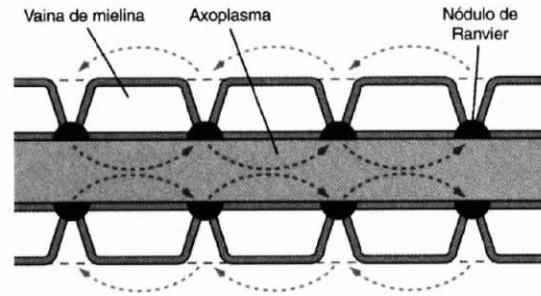


Figura 8. Conducción a saltos [2].

Como lo indica la tabla 1, las velocidades que puede alcanzar un potencial de acción varían según el tipo de fibra por el cual se propague, así: entre $0,25-2 m/s$ para las fibras amielínicas, y desde $3 m/s$ hasta $120 m/s$ para las fibras mielinizadas; lo que representa frecuencias de $125 Hz$ y $120 KHz$ respectivamente (ver figura 9).

Tipo de fibra	Velocidad [m/s]	Diámetro [μm]	Funciones	Mielina
A	70-120		Motoras, músculo esquelético.	
Alfa		12-20		Si
Beta	40-70	5-12	Sensitiva, tacto, presión, vibración	Si
Gamma	10-50	3-6	Huso muscular	Si
Delta	6-30	2-5	Dolor, tacto, temperatura	Si
B	3-15	<3	Preganglionar autónomo	Si
C	0,25-2	0,4-1,2	Dolor, difuso, posganglionar autónomo.	No

Tabla 1. Clasificación de las fibras nerviosas [17].

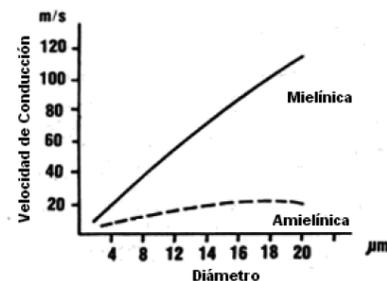


Figura 9. Relación entre el diámetro y la velocidad de transmisión [3].

Por otra parte, un cambio en el ritmo oscilatorio fisiológico está anunciando la posible presencia de una enfermedad; cada célula tiene un potencial eléctrico que es emitido a un ritmo determinado, cada órgano tiene su propio ritmo y presenta bandas de frecuencia que lo distinguen; estas frecuencias son impulsadas rítmicamente en forma de ondas electromagnéticas. La detección temprana de la alteración de frecuencias puede ser tratada terapéuticamente en la medicina alternativa por la aplicación de campos magnéticos, potables, sencillos y discretos.

3. Modelamiento de la neurona como línea de transmisión

Modelo Eléctrico: A. L. Hodgkin y A. F. Huxley [6] desarrollaron la primera teoría del comportamiento de un axón en 1952. Sus investigaciones basadas en el comportamiento de un axón de calamar proporcionan un inicio importante para el desarrollo de otras teorías de modelamiento de las neuronas como líneas de transmisión.

En su modelo, se destacan varias premisas: 1) el axón proporciona un medio de conducción de impulsos nerviosos (potencial de acción); 2) la mielina es material eléctricamente pasivo que actúa como aislante; 3) en el modelamiento de la neurona se debe tener en cuenta el medio físico-químico que circunda el axón y la mielina.

Según las pruebas de laboratorio realizadas en Cambridge con el axón de calamar, se puede llegar a un valor promedio de capacitancia y resistencia en la fibra nerviosa como se puede ver en la tabla 2; sin embargo, éste no es caso de la conductancia, cuyo valor es difícil de promediar.

La conductancia es un parámetro importante en el modelamiento eléctrico de una neurona; sin

embargo, como lo señalan Jhon Kraus y Daniel Fleisch [4], se debe ser cuidadoso con el manejo de conductancias variables en cualquier modelamiento [4]. De hecho, hay que fijar un valor de conductancia que caracterice la fibra nerviosa en sus valores específicos de concentración de iones de Sodio y Potasio (ver figura 10).

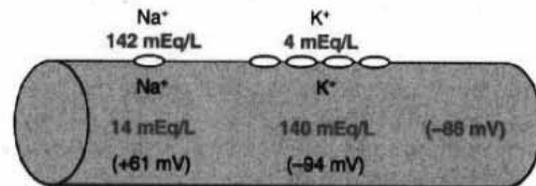


Figura 10. Potencial causado por difusión de Sodio y Potasio [5].

El modelo eléctrico completo se observa en la figura 11, en la que se caracteriza la membrana celular bajo la cubierta de mielina y bajo el nodo de Ranvier. Como ya se mencionó anteriormente, un potencial de acción se genera únicamente, en fibras miélicas, bajo los

Número de Axón	Diámetro (µm)	Temperatura (°C)	Cambio en el Potencial (mV)	Capacitancia en la membrana (µF/cm ²)		R _s (Ω/cm ²)	r _i (Ω)	r _i /r _{cd}
				Anodic	Cathodic			
13	520	9	+36 - 36 +56 - 59 +98 - 98	0,76 0,83 0,83	0,83 0,90 0,96	8,2	72	0,77
14	430	9	+36 - 34	0,81	0,83	5,8	61	0,65
17	588	7	+31 - 32	0,72	0,76	8,3	64	0,65
18	605	21	+30 - 31	0,92	0,91	5,5	41	0,57
19	515	8	+43 - 45	0,93	0,90	7,8	69	0,73
20	545	6	+42 - 43	0,88	0,86	9,1	76	0,77
21	533	9	+42 - 44	0,98	1,01	9,1	78	0,84
22	542	23	+40 - 41	1,01	1,03	4,0	34	0,50
25	603	8	+39 - 41	0,88	0,86	7,0	53	0,57
25*	603	7	+39 - 41	0,84*	0,82*	8,8*	66*	0,55*
26	675	20	+40 - 42	0,97	0,93	4,7	52	0,70
Average	-	-	-	0,88	0,90	7,3	60	0,68
				0,89				
B. Short shock								
13	520	9	+58 - 50	1,07	1,11	-	-	-
17	588	6	-	0,79	0,74	-	-	-
18	605	23	-	0,85	0,88	-	-	-
Average	-	-	-	0,90	0,91	-	-	-
				0,91				
C. Constant current								
29	540	21	-	-	1,49	6,4	4,2	0,57
41	21	4	-	-	0,78	11,9	9,2	0,88
Average	-	-	-	-	1,13	9,2	6,7	0,73
				1,13				
Average all	-	-	-	0,91		7,6	6,1	0,68

Tabla 2. Resultados de la capacitancia en la membrana luego de las pruebas hechas en la Universidad de Cambridge [6].

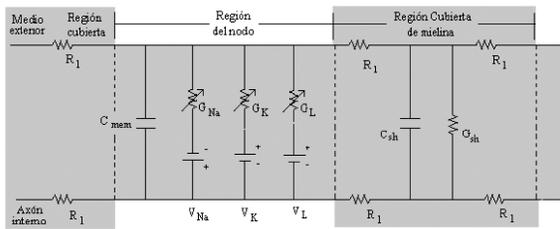


Figura 11. Circuito equivalente de una línea de transmisión axón, dividida en nodo y regiones de cubiertas [7].

nodos de Ranvier. Punto en el que la membrana se encuentra con mayor exposición al medio circundante de la neurona; allí, gracias a la difusión por medio del cambio en la permeabilidad, se permite el ingreso de iones de Sodio o Potasio según sea el caso.

4. Parámetros primarios de una línea bifilar y de un cable coaxial

Línea bifilar: es un par de conductores paralelos (ver figura 12), que cuentan con una impedancia característica de 600 Ω.

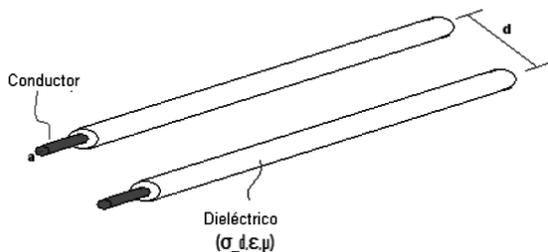


Figura 12. Parámetros por unidad de longitud de una línea bifilar.

Sus parámetros primarios se determinan tanto por características físicas (geométricas) como eléctricas y están definidos por las siguientes ecuaciones [8, 9]

$$R = \frac{2}{\sigma_c \pi a^2} \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (1)$$

$$L = \frac{\mu}{\pi} \left(\frac{1}{4} + \cosh^{-1} \left(\frac{d}{2a} \right) \right) \left[\frac{H}{m} \right] \quad (2)$$

$$G = \frac{\pi \sigma_d}{\cosh^{-1} \left(\frac{d}{2a} \right)} \left[\frac{S}{m} \right] \quad (3)$$

$$C = \frac{\pi \epsilon}{\cosh^{-1} \left(\frac{d}{2a} \right)} \left[\frac{F}{m} \right] \quad (4)$$

Examinando las figuras 13 y 14, se pueden extraer dos correlaciones entre las características físicas de la línea bifilar y las fibras nerviosas (neuronas).

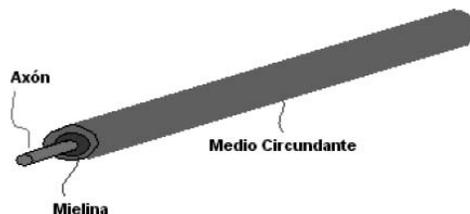


Figura 13. Primera correlación de línea bifilar con fibra nerviosa.

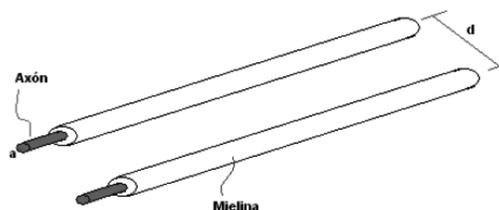


Figura 14. Segunda correlación de la línea bifilar con la fibra nerviosa.

Cable coaxial: es un cable formado por dos conductores concéntricos y separados por un material dieléctrico; un conductor central o hilo sólido de cobre y otro formado por una malla trenzada de Cobre o Aluminio que produce un efecto de blindaje y además sirve como retorno de la señal (ver figura 15).

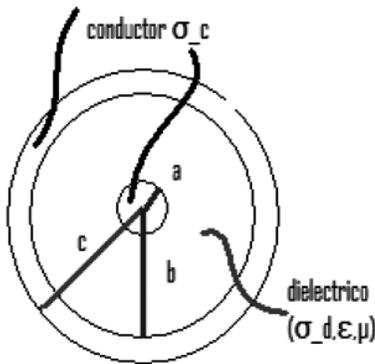


Figura 15. Parámetros por unidad de longitud línea coaxial [8, 9].

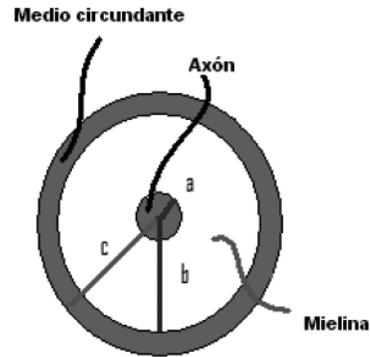


Figura 16. Analogía de cable coaxial con fibra nerviosa.

Las ecuaciones [8, 9] que definen los parámetros primarios del cable coaxial son las siguientes [10, 11].

$$R = \frac{1}{\sigma_c} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{c^2 - b^2} \right) \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (5)$$

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \left\{ \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{1}{4} + \frac{1}{4(c^2 - b^2)} (b^2 - 3c^2) + \frac{4c^2}{c^2 - b^2} \cdot \ln\left(\frac{c}{b}\right) \right\} \left[\frac{H}{m} \right] \quad (6)$$

$$G = \frac{2\pi\sigma_d}{\ln(b/a)} \left[\frac{S}{m} \right] \quad (7)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(b/a)} \left[\frac{F}{m} \right] \quad (8)$$

Construyendo una analogía entre la línea de transmisión y la neurona se encuentran las siguientes similitudes identificadas por la figura 16.

Sin duda, una cualidad importante en la línea de transmisión bifilar es que es una línea balanceada. En este tipo de línea se infiere que en uno de los conductores se encuentra un potencial positivo (+V) y el otro se encuentra el mismo potencial, pero de

signo contrario (-V); esta distribución facilita un camino de ida y otro de retorno de la información a la fuente. Por ende, se infiere que para esta línea existe un punto común externo a los dos hilos, denominado tierra y es la referencia para las diferencias de potencial presentes en la línea.

Aunque es factible hacer una analogía entre un cable bifilar y las fibras nerviosas, no se puede garantizar la presencia de las características de línea balanceada en el sistema nervioso. Como se puede observar atrás en la figura 13, en la línea bifilar existen dos conductores, similares a las dos membranas de la neurona, externa e interna, medios a través de los cuales existe un campo eléctrico, que es llamado potencial de acción y que es la señal característica del sistema nervioso. Sin embargo, afirmar que son medios paralelos y balanceados es arriesgado por la complejidad fisico-química que implican los cambios de estado desde el establecimiento, la propagación y terminación del potencial de acción en la neurona.

Igualmente, se puede interpretar el sistema de transmisión de señales eléctricas nerviosas como dos conductores paralelos en los cuales dos neuronas representarían el par balanceado, como se observa en la figura 14, una de ellas que lleva la señal desde un punto de estímulo a un punto de interpretación y la otra hace el debido retorno. Claro está, que esta hipótesis no es acorde al funcionamiento del siste-

ma nervioso pues en él no existe la posibilidad que dos neuronas se relacionen con respecto a la misma señal; es decir, cumplan funciones complementarias de propagación y de retorno de la señal. Además las señales de respuesta, no siempre se sitúan en el mismo punto de estímulo.

5. Simulaciones de la neurona como línea de transmisión

Para la simulación se modeló la neurona como circuito eléctrico distribuido (ver figura 17). Los valores de los parámetros primarios dependen de las características de concentración de Sodio y Potasio en la membrana que se tomaron de las curvas que aparecen en la figura 9.

$$G_{NA} = G_K \cong 1 \quad (\text{Punto 1})$$

$$G_{NA} = G_K \cong 10 \quad (\text{Punto 2})$$

En el esquemático de la figura 17 se utilizó una fuente excitación senoidal con amplitud de 100 mV y frecuencia de 100 Hz.

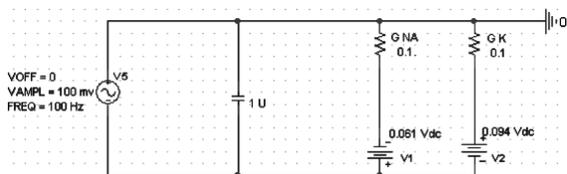


Figura 17. Circuito de simulación, con fuente de excitación senoidal con 100 Hz y 100 mV de amplitud.

Para examinar el comportamiento eléctrico de las fibras nerviosas, a continuación, se muestran simulaciones de la neurona sin tener en cuenta las pérdidas, que en el modelo de A. L. Hodgkin y A. F. Huxley se denomina resistencias de fuga.

En la figura 18 se observan las corrientes presentes en el modelo de la membrana; es de destacar el nivel

dc que se genera sobre las conductancias de Sodio y Potasio que no se puede despreciar, pues debido a las concentraciones de éstos sobre la fibra nerviosa, siempre va a existir un potencial; lo que se demuestra gracias a la ecuación de Nerst, la cual dice que siempre hay un potencial proporcional al logaritmo del coeficiente de concentración de Sodio o Potasio entre el exterior de la membrana y el interior.

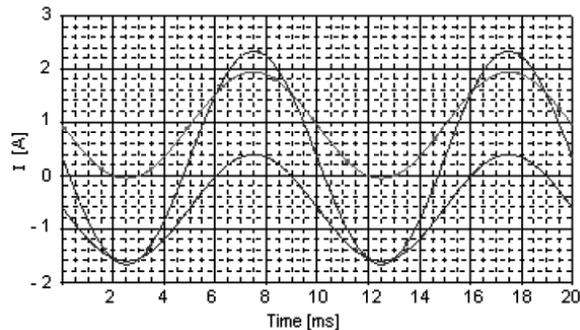


Figura 18. Corrientes de la fuente de excitación (Violeta) y por conductancias de Sodio (Rojo) y Potasio (Verde).

Realizando un cambio en la frecuencia de la fuente de excitación (1000Hz) y manteniendo constantes los demás parámetros, en la figura 19 se puede observar que un cambio de este tipo no tiene consecuencias significativas sobre la respuesta que genera el modelo de la membrana.

En el modelo de circuito distribuido de la neurona no se considera el parámetro primario de la inductancia por las longitudes cortas de las fibras nerviosas y su efecto despreciable, debido a la baja impedancia en bajas frecuencias; además, el ligero desfase debido a la capacitancia no afecta los tiempos de respuesta de los neurotransmisores y neureceptores.

A través de un estudio físico-químico de las propiedades de los elementos que constituyen la mielina y el axón, se podrían descubrir nuevos materiales o aleaciones de los ya existentes para lograr excelentes dieléctricos y conductores para los medios de transmisión.

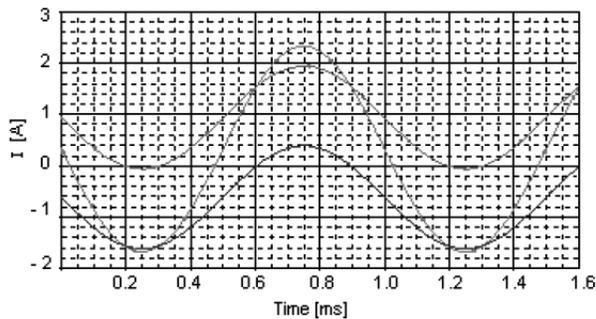


Figura 20. Corrientes de la fuente de excitación (Amarillo), y por conductancias de Sodio (Rojo) y Potasio (Verde)

6. Conclusiones

1. Se pueden observar parámetros comunes entre las líneas bifilares y a las fibras nerviosas; sin embargo, en cuanto al funcionamiento, no es correcto modelar la neurona como una línea de transmisión bifilar, pues no cumple con la particularidad de ser una línea balanceada.

2. Los intercambios de materiales que desencadena la bomba de Sodio y Potasio entre el exterior y el interior de la célula nerviosa genera unos umbrales de potencial de acción que se propagan de distintos modos, según la presencia o no de la capa de mielina en la neurona.

3. Las simulaciones de la fibra nerviosa, como circuito eléctrico distribuido muestran que diferentes concentraciones de Sodio y Potasio elevan el nivel DC de las corrientes iónicas sobre la membrana; este fenómeno eléctrico sería perjudicial en la propagación de señales por las pérdidas de energía en los acoples AC de los canales de comunicación.

4. La mielina en la fibra nerviosa no sólo facilita la propagación rápida del potencial de acción, sino que también disminuye la atenuación de la señal y garantiza bajos niveles de interferencia; sin embargo, el deterioro o pérdida de mielinización en las fibras nerviosas limita la rápida y correcta propagación del potencial de acción que se ve reflejada en la lentitud y entorpecimiento de los movimientos (esclerosis múltiple).

5. Cuando una línea de transmisión no está protegida por un buen aislante, puede recibir interferencia electromagnética de otras fuentes, para controlar este tipo de molestias se usa un buen blindaje de los conductores; sin embargo, también se puede controlar la interferencia y la integridad de la información dispersando la señal de información en grandes anchos de banda y con niveles parecidos al de los potenciales de acción.

Referencias bibliográficas

- | | |
|--|---|
| [1] J. Changeux, <i>El hombre neuronal</i> . Espasa Calpe, 1985. | [5] H. Guyton, <i>Tratado de fisiología médica</i> . 10a ed. Ed. McGraw Hill, 2001. |
| [2] H. Guyton, <i>Tratado de fisiología médica</i> , 10a ed. Ed. McGraw Hill, 2001. | [6] A.L. Hodgkin, A. F. Huxley & B. Katz, "Measurement of Current-Voltage Relation in the MEMBRANE of the Giant Axon of Loligo". <i>J. Physiol.</i> (1952) i i6, 424-448. |
| [3] R. Montoreano, <i>Manual de Fisiología y Biofísica para estudiantes de Medicina</i> , Universidad de Carabobo, 1992. | [7] J. Kraus J. & D. Fleisch. <i>Electromagnetismo</i> . 5ª ed. Ed. Mc Graw Hill. |
| [4] J. Kraus J. & D. Fleisch, <i>Electromagnetismo</i> , 5ª ed. Ed. Mc Graw Hill. | |

- [8] R.N. Vela, *Líneas de transmisión*, Ed. McGraw Hill, 1999.
- [9] H. Paz & G. Castellanos, *Guía para mediciones en comunicaciones electrónicas y prácticas de laboratorio*. Edición preliminar, Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2008.
- [10] D. Cheng, *Fundamentos de electromagnetismo para Ingeniería*. Ed. Única. Addison Wesley Iberoamericana S.A., 1998.
- [11] M. Sadiku, *Elementos de electromagnetismo*. 3ª ed. Oxford, 2003.
- [12] H. Paz Penagos, *Sistemas de comunicaciones digitales*, 1ª ed. Editorial de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2009.
- [13] B. Koepen, M. Levy, B. Stanton, Berne & Levy, *Fisiología*, 4a ed. Elsevier Musby 2006.
- [14] T. Powell, M.F. Valentinuzzi, H.E. Hoff, & L.A. Geddes, "Physicochemical Automaticity at a Mercury Electrolyte Interface: Associated Electrical Potential and Impedances Charges". *Experientia*, No. 28: 1009-1011.
- [15] M.H. Sherif, & R.J. "Gregor, Modelling Myoelectric Interference Patters during Movement". *Medical and biological engineering and computing*, 1986. Capitulo 24, p. 2-9.
- [16] B.J. Hammond, *2000 years of therapeutic electricity*. *Electronics and power* (London), June, 1969. p. 190-194.
- [17] R. Snell, *Neuroanatomía Clínica*, 4 ed. Editorial Médica Panamericana.