

## La teoría del cable

La llamada 'teoría del cable' es el método de elección para el análisis de la actividad eléctrica en células cilíndricas, tanto alrededor de sus condiciones de reposo como durante la actividad, pero inicialmente tuvo un desarrollo largo y errático.

Las primeras indicaciones de los efectos a distancia de la corriente eléctrica fueron obtenidas por Du Bois-Reymond, cuando demostró que después de la aplicación de pulsos de corriente a fibras de músculo esquelético había 'cambios electromotores' a distancias grandes de los electrodos. Para describir esos cambios acuñó el término 'electrotón', que estaba basado en la analogía con el alineamiento de la inducción de magnetos elementales en la teoría de Weber, por lo que imaginó que el axoplasma de una fibra nerviosa era capaz de polarizarse longitudinalmente, aunque nunca pudo proporcionar una base para explicar la difusión de la corriente más allá de los electrodos. El arreglo que Du Bois-Reymond usó para esos experimentos fue llamado 'conductor central' y así es como se le conoce actualmente cuando se usa como modelo del comportamiento eléctrico de músculos y axones.

### El alambre de hierro

La explicación sobre como ocurre la difusión de la corriente más allá del área de los electrodos fue obtenida durante los experimentos de Carlo Matteucci, quien encontró que la difusión también ocurría si en vez de un nervio usaba un alambre de hierro envuelto con un hilo empapado en una solución conductora. Matteucci pensó que la difusión del potencial se debía a una 'difusión de la electrolisis', una conclusión que apoyó con la observación de que se reducía al usar un alambre hecho con una amalgama de sulfato de zinc.

Un alambre de hierro en ácido nítrico concentrado se ve pasivo y en reposo, pero al tocarlo con un pedazo de zinc o conectarlo al cátodo de una batería, se activa, produciendo una reacción energética local. Una vez que la reacción se inicia también se mueve a una velocidad constante hasta llegar al final del alambre, después de lo cual, si el estímulo ha sido retirado, se propaga también una recuperación que terminará la actividad, regresando el alambre a su estado inicial pasivo.

También Ludimar Hermann (1838-1914), un estudiante de Du Bois-Reymond, trabajó intensamente sobre los fenómenos eléctricos del músculo, estableciendo algunos aspectos de las corrientes nerviosas extrapolares. Sabía sobre la difusión del estímulo en el nervio y trató de explicar sus características espaciales y temporales sobre la base de un cable con una resistencia superficial alta y una capacitancia, encontrando un análogo del nervio en la polarización de una interface metal-electrolito, que eventualmente evolucionó en el alambre de hierro estudiado extensamente por Ostwald (1900) y posteriormente por Lillie (1936).

Hermann (1879) repitió esos experimentos usando un alambre colocado dentro de un tubo lleno de líquido y concluyó que la causa de la difusión de la corriente era la resistencia a la polarización entre el alambre y el fluido. Aunque para que hubiera una difusión apreciable de corriente, la resistencia longitudinal del alambre no debía ser muy grande comparada con la resistencia radial de la membrana. Después, en 1873, Weber simplificó el problema al ignorar la corriente radial en el alambre y el líquido, reduciendo las tres dimensiones a una y así pudo calcular la distribución de corriente en el estado estacionario (independiente del tiempo).

## **El cable trans-Atlántico**

Ya en 1855 William Thompson (posteriormente Lord Kelvin), el físico inglés más destacado de la época, planteó la ecuación que describe la difusión del calor y posteriormente la aplicó al estudio del entonces recientemente instalado cable submarino trans-Atlántico. Para resolver la atenuación y distorsión de las señales, simplificó la postulación del problema suponiendo que los potenciales del interior y el exterior eran independientes de la distancia radial y solamente funciones de la distancia longitudinal; además, representó el aislamiento con una capacitancia y una conductancia de fuga.

## **La identidad de las ecuaciones**

El hecho de que las ecuaciones desarrolladas para el alambre de hierro y aquellas para el cable trans-Atlántico fueran idénticas no fue notado hasta posteriormente (Hoorweg, 1898). Actualmente es claro que la ecuación general del cable, con resistencias longitudinales y un paralelo transversal formado por una resistencia y una capacitancia, es semejante a la ecuación para la difusión del calor, la propagación del sonido y las ondas electromagnéticas y el flujo de electricidad en un medio conductor.

Para el cable submarino la constante de longitud es de muchos kilómetros, pero para los axones es de fracciones de milímetro. Por ejemplo, para los axones gigantes del calamar *Loligo pealeii* en Woods Hole varía alrededor de 500  $\mu\text{m}$  y hasta 700  $\mu\text{m}$  para *L. forbesi* en Plymouth, aunque en los *Dosidicus gigas* de la corriente de Humboldt, que pueden ser hasta de 2,000  $\mu\text{m}$  en diámetro, es alrededor de 1 mm.

En 1946 Hodgkin y Rushton consideraron que la estructura de un axón no mielinizado era similar a la de otras células que se sabía tenían un medio conductor en el interior y una membrana con una resistencia y capacitancia en paralelo, lo que las hacía eléctricamente análogas al cable submarino y aplicaron esas ecuaciones a la descripción de las propiedades del axón con el propósito de estudiar sus propiedades pasivas. Sin embargo, la idea principal era que el análisis de esas propiedades era esencial para entender el mecanismo que produce la propagación del potencial de acción y en esto, como en muchos otros casos, no estuvieron equivocados.

## La teoría del cable

La llamada 'teoría del cable' es el método de elección para el análisis de la actividad eléctrica en células cilíndricas, tanto alrededor de sus condiciones de reposo como durante la actividad, pero inicialmente tuvo un desarrollo largo y errático.

Las primeras indicaciones de los efectos a distancia de la corriente eléctrica fueron obtenidas por Du Bois-Reymond, cuando demostró que después de la aplicación de pulsos de corriente a fibras de músculo esquelético había 'cambios electromotores' a distancias grandes de los electrodos. Para describir esos cambios acuñó el término 'electrotón', que estaba basado en la analogía con el alineamiento de la inducción de magnetos elementales en la teoría de Weber, por lo que imaginó que el axoplasma de una fibra nerviosa era capaz de polarizarse longitudinalmente, aunque nunca pudo proporcionar una base para explicar la difusión de la corriente más allá de los electrodos. El arreglo que Du Bois-Reymond usó para esos experimentos fue llamado 'conductor central' y así es como se le conoce actualmente cuando se usa como modelo del comportamiento eléctrico de músculos y axones.

## El alambre de hierro

La explicación sobre como ocurre la difusión de la corriente más allá del área de los electrodos fue obtenida durante los experimentos de Carlo Matteucci, quien encontró que la difusión también ocurría si en vez de un nervio usaba un alambre de hierro envuelto con un hilo empapado en una solución conductora. Matteucci pensó que la difusión del potencial se debía a una 'difusión de la electrolisis', una conclusión que apoyó con la observación de que se reducía al usar un alambre hecho con una amalgama de sulfato de zinc.

Un alambre de hierro en ácido nítrico concentrado se ve pasivo y en reposo, pero al tocarlo con un pedazo de zinc o conectarlo al cátodo de una batería, se activa, produciendo una reacción energética local. Una vez que la reacción se inicia también se mueve a una velocidad constante hasta llegar al final del alambre, después de lo cual, si el estímulo ha sido retirado, se propaga también una recuperación que terminará la actividad, regresando el alambre a su estado inicial pasivo.

También Ludimar Hermann (1838-1914), un estudiante de Du Bois-Reymond, trabajó intensamente sobre los fenómenos eléctricos del músculo, estableciendo algunos aspectos de las corrientes nerviosas extrapolares. Sabía sobre la difusión del estímulo en el nervio y trató de explicar sus características espaciales y temporales sobre la base de un cable con una resistencia superficial alta y una capacitancia, encontrando un análogo del nervio en la polarización de una interface metal-electrolito, que eventualmente evolucionó en el alambre de hierro estudiado extensamente por Ostwald (1900) y posteriormente por Lillie (1936).

Hermann (1879) repitió esos experimentos usando un alambre colocado dentro de un tubo lleno de líquido y concluyó que la causa de la difusión de la corriente era la resistencia a la polarización entre el alambre y el fluido. Aunque para que hubiera una difusión apreciable de corriente, la resistencia longitudinal del alambre no debía ser muy grande comparada

con la resistencia radial de la membrana. Después, en 1873, Weber simplificó el problema al ignorar la corriente radial en el alambre y el líquido, reduciendo las tres dimensiones a una y así pudo calcular la distribución de corriente en el estado estacionario (independiente del tiempo).

El cable trans-Atlántico

Ya en 1855 William Thompson (posteriormente Lord Kelvin), el físico inglés más destacado de la época, planteó la ecuación que describe la difusión del calor y posteriormente la aplicó al estudio del entonces recientemente instalado cable submarino trans-Atlántico.

Para resolver la atenuación y distorsión de las señales, simplificó la postulación del problema suponiendo que los potenciales del interior y el exterior eran independientes de la distancia radial y solamente funciones de la distancia longitudinal; además, representó el aislamiento con una capacitancia y una conductancia de fuga.

## **La identidad de las ecuaciones**

El hecho de que las ecuaciones desarrolladas para el alambre de hierro y aquellas para el cable trans-Atlántico fueran idénticas no fue notado hasta posteriormente (Hoorweg, 1898). Actualmente es claro que la ecuación general del cable, con resistencias longitudinales y un paralelo transversal formado por una resistencia y una capacitancia, es semejante a la ecuación para la difusión del calor, la propagación del sonido y las ondas electromagnéticas y el flujo de electricidad en un medio conductor.

Para el cable submarino la constante de longitud es de muchos kilómetros, pero para los axones es de fracciones de milímetro. Por ejemplo, para los axones gigantes del calamar *Loligo pealeii* en Woods Hole varía alrededor de 500  $\mu\text{m}$  y hasta 700  $\mu\text{m}$  para *L. forbesi* en Plymouth, aunque en los *Dosidicus gigas* de la corriente de Humboldt, que pueden ser hasta de 2,000  $\mu\text{m}$  en diámetro, es alrededor de 1 mm.

En 1946 Hodgkin y Rushton consideraron que la estructura de un axón no mielinizado era similar a la de otras células que se sabía tenían un medio conductor en el interior y una membrana con una resistencia y capacitancia en paralelo, lo que las hacía eléctricamente análogas al cable submarino y aplicaron esas ecuaciones a la descripción de las propiedades del axón con el propósito de estudiar sus propiedades pasivas. Sin embargo, la idea principal era que el análisis de esas propiedades era esencial para entender el mecanismo que produce la propagación del potencial de acción y en esto, como en muchos otros casos, no estuvieron equivocados.