

El primer cable submarino. Thomson y Heaviside.

En la década de 1830 Samuel Morse había establecido la posibilidad práctica de enviar mensajes mediante corrientes eléctricas a lo largo de hilos conductores, enviando un mensaje desde Baltimore a Washington. Poco a poco gran parte de los países europeos y Estados Unidos tendieron redes de telegrafía que comunicaron las grandes ciudades. El siguiente paso sería establecer una comunicación intercontinental, para lo cual se requería instalar un cable submarino. En 1851 se estableció una conexión entre Inglaterra y Francia.

En 1856 se creó la Atlantic Telegraph Company con un capital de £ 350.000 (entonces equivalentes a unos u\$s 1.400.000), presidida por el empresario norteamericano Cyrus Field, cuyo único propósito era tender el primer cable transatlántico. Uno de sus diecisiete directores era el profesor de filosofía natural de la Universidad de Glasgow, **William Thomson** (izquierda).



En 1854 Thomson había aplicado el método de Fourier - quien había resuelto el problema de la transmisión del calor - a la propagación de los impulsos eléctricos en un cable largo. El modelo de Thomson era equivalente al que hemos propuesto para una línea con pérdidas, pero sin considerar los efectos inductivos ($L = 0$) ni pérdidas dieléctricas ($G = 0$). Llegaba así a ecuaciones del tipo:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = RG v + (RC + LG) \frac{\partial v}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \rightarrow \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = RC \frac{\partial v}{\partial t}$$

que es una ecuación de difusión del tipo de la transmisión del calor.

No existe para una perturbación que siga esta ecuación diferencial una velocidad definida. Ante un estímulo en forma de escalón la respuesta es una función error:

$$i(z, t) = \sqrt{C/\pi R t} \exp(-RCz^2/4t)$$

Para una línea de longitud L , el máximo de corriente se da para: $t_{\max} = \frac{1}{2} RCL^2$

Esta es la famosa “ley de cuadrados” que encontró Thomson. Significa que, si se aplica un pulso telegráfico a la entrada de la línea, el tiempo que tarda en llegar al otro extremo es proporcional al cuadrado de la longitud de la línea.

La tarea de colocar el cable se dividió entre dos barcos, la fragata norteamericana Niagara y el buque de guerra británico Agamemnon. El plan era navegar hasta el punto medio del tendido y desde allí el Niagara colocaría el cable hacia Norteamérica y el Agamemnon colocaría el cable hacia Inglaterra. El tendido comenzó el 30 de julio de 1857. Luego de muchas rupturas, la colocación se completó finalmente en el quinto intento más de un año después, el 5 de agosto de 1858. Los dos puntos extremos del tendido eran Valentia Harbour, en Irlanda, y Trinity Bay en Newfoundland.

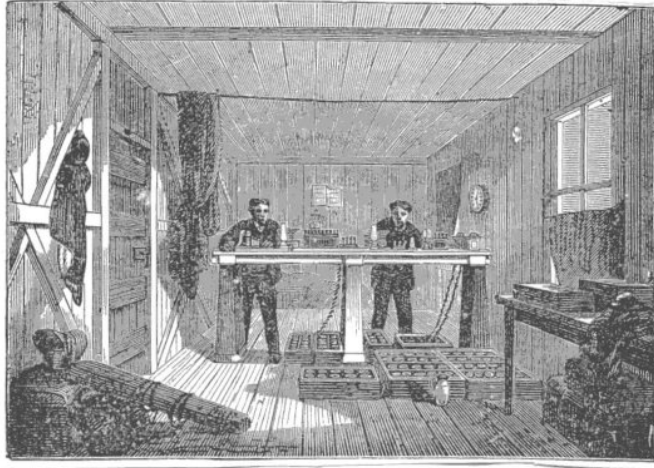
El 16 de agosto se estableció la primera comunicación, con el mensaje: "[Glory to God in the highest, and on earth, peace, good will to men](#)". Sin embargo, el cable dejó de funcionar tres semanas después. El "electricista" a cargo, un aficionado llamado O. E. W. Whitehouse, era en realidad un médico retirado que se había dedicado a la electricidad y la telegrafía y no tenía una comprensión acabada de los fenómenos involucrados. Por ejemplo, dijo sobre el modelo teórico de Thomson y su ley de cuadrados:

[“Con toda honestidad, estoy obligado a responder que creo que la naturaleza no conoce tal aplicación de esa ley, y la puedo solamente considerar como una ficción de las escuelas, una forzada y violenta adaptación de un principio en Física, bueno y verdadero bajo otras circunstancias, pero mal aplicado aquí.”](#)³

Para lograr detectar la muy débil señal telegráfica, en lugar de usar instrumentos más sensibles

Whitehouse optó por aumentar la tensión aplicada al cable, lo que causó que el cable se cortocircuitara en puntos débiles del aislante de gutapercha. Luego de un estudio de las causas de la salida de funcionamiento del cable tranatlántico, Whitehouse fue despedido.

En un segundo intento se tomaron en cuenta los estudios de Thomson. Se utilizó cable de cobre de la mejor calidad disponible y con una sección casi tres veces mayor del cable original, lo que



disminuía la resistencia por unidad de longitud, mejorando la performance. También Thomson insistió en lograr una mayor fortaleza y mejorar el aislamiento para evitar la acción del agua de mar, así como disminuir las tensiones de trabajo, para lo cual desarrolló un nuevo instrumento, el galvanómetro de espejo, que podía medir corrientes muy pequeñas. El segundo intento de colocar el cable submarino, realizado entre el 14 de julio de 1865 y el 28 de julio de 1866, fue exitoso y se pudieron establecer comunicaciones tranatlánticas permanentes. En la figura se muestra la estación

de recepción del telégrafo tranatlántico en Valentia, Irlanda⁴. El primer mensaje enviado fue: "[A treaty of peace has been signed between Austria and Prussia](#)". Relatos de la época hablan de la fascinación de los operadores porque los mensajes se recibían horas antes de que fueran enviados, debido a la diferencia de huso horario entre los extremos del cable).

Casi inmediatamente, el uso del cable fue abierto comercialmente pero sólo los muy ricos podían utilizarlo: las tarifas iniciales eran desde u\$s 1 por carta, pagables en oro, en una época en que el salario mensual de un trabajador era del orden de u\$s 20. El cable original colocado en 1866 dejó de operar en 1872, pero ya había otros cuatro cables tranatlánticos en uso para esa fecha. Para valorar la importancia de este desarrollo de la ingeniería, debe señalarse que para 1890 había ya más de 150 mil kilómetros de cables submarinos comunicando todo el mundo, y que recién en la década de 1960 el lanzamiento de los primeros satélites de comunicaciones presentaron una alternativa a los cables submarinos.

En noviembre de 1866 Thomson fue elevado a la categoría de par del reino británico bajo el título de Lord Kelvin of Largs por sus logros en relación al cable submarino. El Kelvin es el río que atraviesa el terreno de la Universidad de Glasgow y Largs es el pueblo sobre la costa escocesa donde Thomson construyó su residencia.



Dentro de la investigación en el electromagnetismo, Thomson introdujo en 1850 las nociones de susceptibilidad y permeabilidad magnética, junto con los conceptos de **B**, **H** y **M**, en 1853 usó la teoría magnética de Poisson para encontrar las ecuaciones de la energía magnética en términos de los campos, por una parte, y de la corriente circulante y la inductancia, por otra. Ese mismo año halló la ecuación del circuito RLC, lo que dio una descripción matemática a observaciones experimentales de Henry y Savery. Ya hemos hablado de su modelo mecánico del electromagnetismo que inspiró los primeros modelos de Maxwell.

En 1857 [Gustav Kirchhoff](#) (izquierda) encontró las ecuaciones del telegrafista para una línea coaxil. También halló que, si la resistencia del cable es pequeña, estas ecuaciones llevan a la ecuación de ondas con una velocidad

$v = 1/\sqrt{LC}$, que para un cable coaxial da un valor muy cercano a la velocidad de la luz. Kirchhoff se da cuenta de esta coincidencia y es así el primero en hallar que las señales electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz.

Las ideas de la propagación de ondas en cables fueron retomadas y completadas, usando el método operacional que él mismo inventó, por **Oliver Heaviside** (izquierda).



Heaviside no tuvo educación formal, ya que abandonó sus estudios a los 16 años. Aprendió el código Morse y se dedicó a ser operador telegráfico. A pesar de su falta de rigor matemático, Heaviside estudió el Treatise de Maxwell y consiguió reducir las veinte ecuaciones (escalares) con veinte incógnitas halladas por Maxwell a sólo dos ecuaciones (vectoriales) con dos incógnitas en el vacío. Logró esta hazaña inventando el análisis vectorial⁵. Por este motivo las actuales ecuaciones de Maxwell deberían llamarse de Maxwell-Heaviside. Por su falta de rigor la idea revolucionaria de Heaviside tuvo pocos seguidores. Los físicos que trabajaban con las ecuaciones de Maxwell estaban influenciados por el modelo de cuaterniones, desarrollado por el mismo

Maxwell y Tait. Sólo Heinrich Hertz, que iba a alcanzar fama mundial por su comprobación experimental de que las ondas electromagnéticas se propagan a la velocidad de la luz, entendió la importancia de los trabajos de Heaviside y Gibbs y en 1892 publicó un trabajo riguroso donde llega a la notación actual de las ecuaciones del electromagnetismo.

Entre 1880 y 1887 Heaviside desarrolló el **cálculo operacional** para estudiar los circuitos eléctricos, que permite pasar de modelos basados en ecuaciones diferenciales a ecuaciones algebraicas. Este es el método de la transformada de Laplace que hoy en día es el método normal de análisis de circuitos. A pesar del evidente éxito de este método, la falta de rigor matemático de las presentaciones de Heaviside hizo que no tuviera aceptación amplia hasta 1906 en que su fundamentación rigurosa fue establecida por el matemático inglés **Thomas Bromwich**.

Heaviside también se dedicó a la propagación de ondas en las líneas telegráficas. Redescubrió las ecuaciones del telegrafista que ya había hallado Kirchhoff. Heaviside se dio cuenta que el efecto de la inductancia de la línea puede llevar a la condición de propagación sin distorsión (p.6.6) por lo que sugirió aumentar la inductancia agregando inductores a lo largo de la línea.

En 1883 comienza a analizar la propagación de ondas electromagnéticas en conductores. En forma independiente en 1885 Heaviside y el físico Horace Lamb describieron por primera vez el efecto pelicular en conductores, que hace que la distribución de corriente a altas frecuencias no sea uniforme y haya una concentración de corriente sobre la periferia del conductor, modificando así su resistencia, como veremos en el Capítulo 8.

En 1902 y en forma casi simultánea Heaviside y el ingeniero norteamericano Arthur Kennelly anunciaron la probable existencia de una capa atmosférica de gas ionizado que afectaría la propagación de las ondas electromagnéticas. La capa de Heaviside-Kennelly es una de las capas de la ionosfera, cuya existencia fue corroborada experimentalmente en 1923.