



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
MAESTRÍA EN FILOSOFÍA DE LA CIENCIA
FILOSOFÍA DE LAS MATEMÁTICAS Y LÓGICA DE LA CIENCIA

NORMATIVIDAD TECNOLÓGICA:
EL PAPEL EPISTÉMICO DE LA TECNOLOGÍA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN FILOSOFÍA DE LA CIENCIA
PRESENTA:
PABLO ACEVES CANO

TUTOR:
DR. SERGIO FERNANDO MARTÍNEZ MUÑOZ, IIF

CIUDAD DE MÉXICO, ENERO 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Para mi ma.

Agradezco a la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca académica que me otorgó de agosto del 2014 a agosto del 2016, tiempo durante el cual el presente trabajo fue elaborado.

Agradezco también al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), proyecto IN403317.

Gracias mamá.

A mis amigos y a sus familias que me he apropiado.

A mis familiares.

A Nydia.

A Sergio.

A mi jurado y profesores.

A la UNAM.

Índice general

Introducción	10
1. Casos históricos	15
1.1 Motor de vapor	15
1.2 Telégrafo	20
1.3 Oliver Heaviside	23
1.3.1 Heaviside y sus aportaciones	26
1.3.1.1 Cálculo operacional	27
1.3.1.2 Función escalón de Heaviside ($H(t)$)	35
1.3.1.3 Álgebra vectorial	36
2. Plasticidad científica y matemática	46
3. Normatividad tecnológica	50
Reflexiones finales	55
Bibliografía	58

Introducción

Asumir que podemos dar cuenta de la ciencia caracterizando una metodología determinada que privilegia la semántica lingüística de las teorías científicas fue una idea determinante en diferentes corrientes filosóficas de mediados del siglo XX. Siendo su más claro exponente el ambicioso proyecto del empirismo lógico. Aunque esta tentación filosófica ha sido duramente objetada con el transcurso de los años, en la actualidad podemos identificar una herencia ideológica *apriorística* en propuestas que conservan o retoman parte de aquellos presupuestos fundamentales. Esto ha derivado en maneras particulares de entender la relación entre conocimiento, evidencia y teoría, así como la tradicional distinción epistemológica entre contexto de descubrimiento y contexto de justificación.

Lo anterior tiene diversas e importantes implicaciones. Una muy significativa para este trabajo es el entender una justificación científica como una relación entre evidencia y teoría, lo que contribuye a establecer la idea de una jerarquización epistémica que subordina la tecnología a la ciencia, priorizando el quehacer científico sobre el tecnológico, donde se asume a la ciencia como fuente cognitiva y a la tecnología como recipiente de esta. Aunque en la actualidad muchos estarían de acuerdo en que esta es una concepción obsoleta que ha mostrado ser parcial e incompleta, considero que falta mucho trabajo por delante para esclarecer qué clase de articulaciones pueden establecerse entre ciencia y tecnología.

El adentrarse en las formas como ciencia y tecnología se relacionan obliga a considerar el papel que las matemáticas han jugado en el desarrollo del conocimiento de ambas. El siglo XVII se caracterizó por asumir que el universo operaba de acuerdo a leyes matemáticas, siendo Galileo punta de lanza de esta postura y Newton uno de sus más representativos herederos. Con el paso del tiempo el entendimiento de las matemáticas se ha diversificado, el impulso que han recibido las matemáticas

puras es evidencia de ese proceso. Debido a la innegable importancia de las matemáticas en el desarrollo de la ciencia y la tecnología es que en el presente escrito intentaré dilucidar cierta manera en que esta tríada puede articularse.

La pregunta que me interesa abordar en este escrito es si la tecnología juega un papel epistémico relevante en el desarrollo del conocimiento científico y matemático. Para sostener que efectivamente así sucede propondré la noción de *normatividad tecnológica* como una manera en la que puede entenderse esa relevancia. Pretendo esclarecer las formas en que las matemáticas, la tecnología y la ciencia pueden relacionarse, pues considero que es fundamental para entender mejor las características de cada una de estas complejas nociones. Argumentaré que en cierto sentido las matemáticas no parecen diferenciarse tanto del quehacer científico.

Para tratar la cuestión del papel epistémico de la tecnología considero fundamental recuperar cierto peso histórico en el análisis de la ciencia, la tecnología y las matemáticas. Sin duda las tres se han apoyado mutuamente a lo largo de su historia. Podemos identificar ejemplos donde la investigación tecnológica permitió el desarrollo y modificación de la ciencia y las matemáticas, e incluso el abandono de una ciencia particular. En el trabajo presento dos casos históricos (capítulo 1) para argumentar que las teorías científicas y las matemáticas pueden ser entendidas como *instrumentos plásticos* (capítulo 2) que se amoldan a los requerimientos tecnológicos con el fin de entender mejor y de manera más clara los fenómenos estudiados. Lo anterior puede interpretarse como un conocimiento tecnológico de carácter *normativo*, en donde la tecnología establece directivas que le indican a la ciencia y a las matemáticas cómo *deberían* cambiar o ajustarse a problemas reales (capítulo 3).

Antes de presentar los casos históricos vale la pena abordar un aspecto puntual de la relación entre la ciencia y la tecnología que es fundamental para este trabajo. En su artículo *Science, Technology and the Science-Technology Relationship*,¹ Hans Radder identifica a la *experimentación* como un punto de encuentro entre ciencia y tecnología, en donde la acción instrumental toma la forma de acción

1 [Radder, 2009].

experimental. Siguiendo a Radder considero que las leyes empíricas predictivas de la ciencia dependen de la posible intervención activa y el control de situaciones empíricas. En la actualidad no podemos pensar en intervenir y controlar sin una acción instrumental.²

En la ciencia experimental el acceso a los objetos de estudio está mediado por la tecnología. Un aspecto fundamental de un experimento científico significativo es que nuestra intervención y control del objeto de estudio, mediado por la tecnología correspondiente, debe producir *estabilidad y reproducibilidad*. Una condición necesaria de esa estabilidad y reproducibilidad es el control apropiado de *interacciones con el medio ambiente*. Este es un aspecto importante, podemos distinguir tres tipos de interacciones: las *interacciones requeridas*, las cuales posibilitan que el sistema objeto-aparato se comporte de acuerdo a su diseño; las *interacciones prohibidas*, las cuales pueden perturbar el proceso experimental previsto; y las *interacciones permitidas*, las cuales son neutras, ni posibilitan ni perturban el curso previsto del sistema experimental.³

En la práctica científica y la investigación tecnológica es prácticamente imposible saber de antemano exactamente cuáles serán las interacciones requeridas, cuáles las prohibidas y cuáles las permitidas. Justamente uno de los principales objetivos de la experimentación es identificar estas interacciones. El definir a las interacciones de un sistema y su medio ambiente para conseguir la estabilidad y reproducibilidad deseada, será muy diferente entre un experimento científico y un experimento tecnológico:

*Materially and socially, however, experimental systems and the corresponding experimental technologies will usually be quite different for two reasons. First, technologies are typically required to remain stable and reproducible for a much longer period and in many more places. That is to say, the technology is supposed to function properly on a much larger **spatiotemporal scale** than its laboratory counterpart. Second, and related to the first reason, the **environments in***

2 [Radder, 2009, p. 79].

3 [Radder, 2009, p. 80].

which the experimental technologies are expected to function may be quite different from the average laboratory environment.

For these reasons, we cannot assume that a successfully realized experiment guarantees the success of the corresponding experimental technology. [el énfasis es mío] [Radder, 2009, p. 82]

Es fundamental tener presente las interacciones medioambientales y la diferencia en la escala espaciotemporal entre la ciencia y la tecnología pues ellas serán un punto de apoyo en mi trabajo para defender la relevancia epistémica de la tecnología.

Capítulo 1

Casos históricos

1.1 Máquina de vapor

La máquina de vapor fue un agente principal de la revolución industrial en el siglo XVIII y XIX. James Watt (1736-1819) fue un ingeniero reconocido, entre otras cosas, por sus fundamentales aportaciones en el desarrollo de la eficiencia de esta máquina. Watt creía que existía una relación entre la presión del vapor y su contenido relativo de calor latente (de acuerdo a la teoría del calórico, actualmente descartada) y que esa relación permitiría entender la capacidad del vapor, vía la máquina, para generar fuerza motriz⁴. Para 1782 y a falta de una mejor alternativa, en sus estudios del comportamiento de la máquina, Watt utilizaba valores teóricos de presión y volumen obtenidos con ayuda de la Ley de Boyle. El problema, y Watt era consciente de ello, era que la Ley de Boyle presupone la expansión del gas a una temperatura constante, hecho inverosímil para una máquina de vapor de la época. Por más de 40 años Watt realizó muchos y diferentes experimentos en su búsqueda por entender mejor el funcionamiento de la máquina.

En torno a 1790 ya existían indicadores de presión o manómetros que podían medir valores aproximados de presión al interior de los cilindros en las máquinas. El problema era hacer lecturas exactas en los indicadores pues los valores de presión sufrían muchas variaciones mientras la máquina

4 [Baird, 2004, p. 180].

estaba operando, por lo que solo valores máximos y mínimos de presión podían ser registrados.⁵ Los análisis de las máquinas que pudieran realizarse con estas lecturas resultaban en estimados poco aproximados pues no se tenían valores exactos de presión durante el funcionamiento continuo de la máquina.

Fue en 1796 cuando John Southern, gerente de operaciones de Boulton & Watt en Birmingham, tuvo una brillante idea: a partir de un indicador que era accionado por un arreglo de resortes comprimidos, sustituyó el apuntador por un lápiz que descansaba sobre una hoja de papel que a su vez se movía junto con el pistón del cilindro. El resultado fue que el lápiz trazaba un diagrama cerrado que mostraba al mismo tiempo los valores de presión y el desplazamiento del pistón, obteniendo un registro exacto de lo que sucedía en todo momento durante cada embolada: un indicador de diagrama (ver figura 1).⁶ Con la información del indicador, Watt pensó que podría encontrar aquella relación oculta entre calor y eficiencia, pero debido a que su análisis partía de la teoría calórica no le fue posible descifrar el misterio y nunca consiguió entender dicha relación satisfactoriamente.

Paralela a esta historia, el mismo año de la invención del indicador de diagrama, nació en París, Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), ingeniero militar y padre de la termodinámica. Al considerar el comportamiento de una máquina de vapor idealizada, Carnot estableció las bases de la teoría termodinámica y sugirió una nueva manera de entender el calor. Lo anterior sumado a otras consideraciones le permitieron a Carnot divisar aquello que Watt buscó fervorosamente a través de los años: la relación entre calor y trabajo. En 1824 publicó *Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, pero no recibió la atención merecida.

5 [Hills, 1959, pp. 91-94].

6 [Hills, 1959, p. 92], [Dickinson, 1938, p. 85].

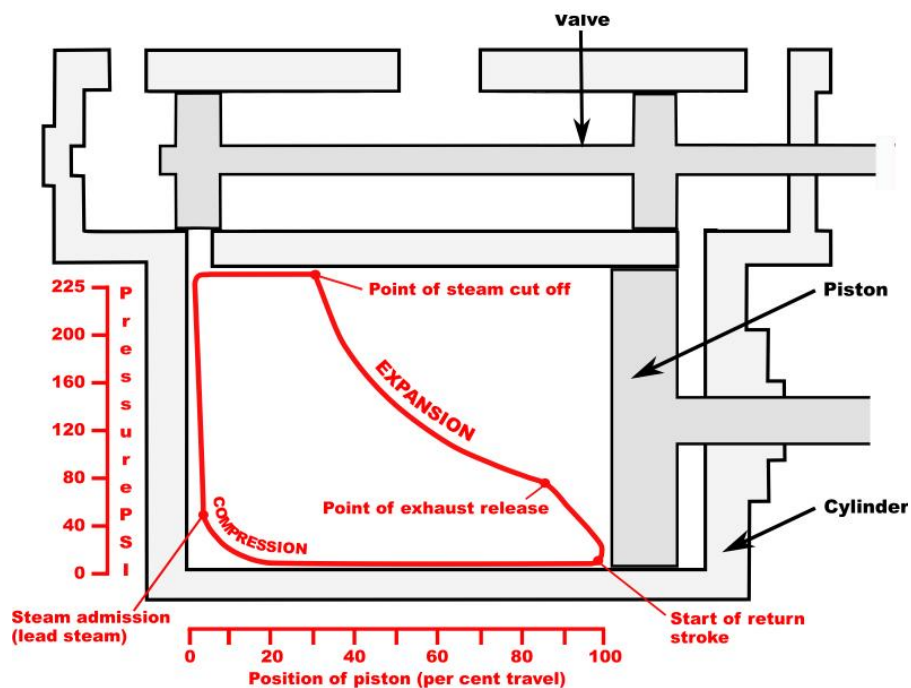


Figura 1. Figura que ilustra un diagrama de presión y volumen.⁷

Tuvieron que pasar 10 años para que Benoît Paul Émile Clapeyron (1799-1864), ingeniero francés, rescatara la teoría termodinámica de Carnot. Clapeyron, a diferencia de Carnot, estaba familiarizado con el indicador ideado por Southern y los diagramas que producía. Su gran acierto fue idealizar el diagrama promedio para poder establecer relaciones entre la teoría termodinámica y el comportamiento de la presión y el volumen del vapor en la máquina, identificando procesos adiabáticos e isotérmicos (procesos que en la época apenas comenzaban a comprenderse) con algunas secciones del diagrama.⁸

La preocupación de Watt por comprender el funcionamiento de las máquinas implicaba la necesidad de establecer su eficiencia así como las condiciones ideales del vapor para realizar trabajo. Estos factores eventualmente derivaron en el desarrollo del indicador de diagrama. El problema fue que Watt no tenía las herramientas teóricas necesarias para poder interpretar el diagrama del indicador; para Watt, la información del indicador era útil en la medida que permitía obtener los cambios del calor latente y sensible en función de la presión, para así poder entender la fuerza motriz producida por el vapor. En

7 Autor de la imagen: Old Moonraker en *English Wikipedia*, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3412447>

8 [Baird, 2004, p. 186].

este sentido su principal preocupación fue utilizar esa información con el fin de *economizar* el vapor suministrado a la máquina.

Lo que me interesa destacar es que fue debido a la cualidad informativa del indicador y a la carencia de una teoría científica adecuada que Watt formuló un concepto embrionario que él originalmente llamó “labor” (que estaba en función de la fuerza motriz de la máquina, el vapor, los calores latentes y sensibles) que posteriormente derivaría en lo que actualmente conocemos en física como *trabajo*. Aunque tuvieron que pasar décadas para que conceptos como *potencia*, *trabajo* y *energía* fueran establecidos, de lo que no cabe la menor duda es que el diagrama del indicador resultó ser una representación gráfica *perfecta* del trabajo realizado por la máquina. El trabajo realizado por el pistón en movimiento es la suma integral de la presión dado un cambio en el volumen.

Aquellos que utilizaban el indicador fueron capaces de mejorar el desempeño de sus motores incluso sin una base teórica sólida que explicara el significado de la medición del indicador. Para ellos la relación entre la eficiencia de los motores y el área encerrada del diagrama era fácilmente reconocida y aplicada. Podemos afirmar entonces que el indicador de diagrama exhibió un fenómeno que era independiente de las teorías disponibles de la época para su comprensión, sobrevivió a ellas y estableció un marco explicativo que permitió pensar en mejoras para la máquina de vapor, favoreciendo un desarrollo material y el refinamiento de nociones fundamentales para la física que posteriormente derivarían en el surgimiento de una nueva ciencia: la termodinámica.⁹

El indicador de diagrama era una tecnología muy efectiva, era estable y reproducible, podía registrar el funcionamiento de prácticamente cualquier motor de vapor de la época. Esto implica una escala espaciotemporal alta, y en consecuencia, la capacidad de funcionar frente a una cantidad de interacciones medio ambientales considerable. Fue esta capacidad sumada a las virtudes del diagrama lo que le permitió establecer un marco explicativo que se le escapaba a cualquier esfuerzo científico por comprender la relación entre calor y lo que en ese momento Watt llamó “labor”.

9 [Baird, 2004, p. 171].

El hecho que el indicador de diagrama funcionara en prácticamente cualquier máquina de vapor de la época implicó una ventaja respecto a los posibles experimentos científicos que se realizaran en laboratorios: la cantidad de variables o interacciones a las que se tuvo que enfrentar el indicador rebasaban por mucho cualquier intento por experimentar con el motor de vapor en un ambiente controlado, como lo es un laboratorio. Fue la capacidad funcional del indicador y que exhibía propiedades relevantes de los gases cuando se comprimen y expanden, al calentarse y enfriarse, a medida que realizan y absorben trabajo,¹⁰ de manera autónoma a la ciencia de la época, lo que estableció ciertas directrices que jugaron un papel epistémico fundamental en la posterior consolidación de la termodinámica. La teoría termodinámica se ajustó a esas directrices, tal como ejemplifica la incorporación a la teoría de los procesos adiabáticos e isotérmicos.

A continuación desarrollaré el contexto tecnológico del telégrafo en el siglo XVIII para enfatizar las aportaciones que realizó Oliver Heaviside. Ello con el fin de dar un lugar a la tecnología en el desarrollo y conformación del conocimiento científico y matemático. De nueva cuenta mostraré que la escala espaciotemporal y las interacciones medioambientales de la mano de la experimentación significaron una distinción entre la ciencia y la tecnología pues, como veremos, los ingenieros y científicos del siglo XIX tuvieron que conseguir la estabilidad y reproducibilidad del telégrafo en ambientes novedosos, donde la correcta funcionalidad de la tecnología se confrontó con una mayor cantidad de interacciones desconocidas para la ciencia. Enfatizaré entonces que la tecnología tiene un carácter normativo que muchas veces es utilizado por la indagación científica y las matemáticas como guía para poder realizar propuestas e incluso modificaciones de ciertos aspectos de su estructura conceptual y formal.

10 [Baird, 2004, p. 186].

1.2 Telégrafo

En el siglo XIX la industria del telégrafo fue una importantísima impulsora del desarrollo tecnológico y científico. Los dos elementos fundamentales para el telégrafo fueron la batería voltaica como generadora de corriente y el conocimiento de que dicha corriente podía ser utilizada para generar movimiento mecánico. La batería fue un descubrimiento de Alessandro Volta en 1799. Dos décadas después, en 1820, Hans Christian Ørsted observó la modificación en la orientación de la aguja de una brújula al encender la corriente de un circuito eléctrico que se encontraba próximo a dicha brújula, es decir, identificó que existía una relación, hasta entonces ignorada, entre la electricidad y el magnetismo. Relación que, dicho sea de paso, es uno de los pilares en el funcionamiento de la inmensa mayoría de la tecnología en la actualidad.

Pocos años después del descubrimiento de Ørsted, algunos comenzaron a tener la sospecha de poder utilizar a la electricidad como transportadora de información. Seguramente una idea completamente disparatada para el común denominador de la población en esa época. A mediados de la década de 1820 Pavel von Schilling dio los primeros pasos en esta empresa, pero no logró despertar un interés serio en la comunidad ingenieril, científica y empresarial de la época. Fue hasta 1836 que William Fothergill Cooke, un oficial de la Compañía Británica de las Indias Orientales, retomaría el proyecto durante una conferencia sobre electricidad que incluía la demostración de un sistema desarrollado por Schilling.

Cooke lo intentó desarrollar por sus propios medios pero pronto se dio cuenta que necesitaría el apoyo de alguien con experiencia y conocimiento en electromagnetismo. Para ello recurrió a Charles Wheatstone, con quien diseñaría su primer patente en 1837. En 1845 Cooke fundaría la *Electric Telegraph Company*, para 1848 la compañía contaba con casi 3000 kilómetros en líneas telegráficas instaladas y con muchas patentes en el ramo: Cooke identificó que utilizar cables de hierro

galvanizados sostenidos por postes de madera permitía la correcta transmisión de mensajes y además abarataba significativamente los precios.

La industria del telégrafo se desarrollaba de manera acelerada y sin mayores contratiempos, comunicando vía terrestre localidades relativamente próximas. El aire funcionaba como un buen aislante y los mayores problemas eran propiciados por las lluvias, pero sin ocasionar grandes estragos. El siguiente gran obstáculo al que se enfrentó la industria del telégrafo fue poder extender la red telegráfica a través de los océanos: el agua significó una serie de adversidades que no se encontraban presentes en el aire. El cable debía ser rediseñado de tal forma que se pudieran mandar mensajes a través del mar de manera eficiente.

Parte de la respuesta se encontró con la *gutapercha*: un tipo de goma con propiedades aislantes superiores a las del caucho; toneladas de este material fueron importadas a Inglaterra desde Malasia en el siglo XIX. La gutapercha posibilitó hasta cierto punto el telégrafo transoceánico, pero no fue suficiente para resolver otras adversidades que aparecieron en escena. Las señales que viajaban por cables submarinos perdían su nitidez y se deformaban, lo que ocasionaba, entre otras cosas, que la parte última de una señal se extendiera y se fusionara con la señal que la precedía, generando distorsión. Para tener una idea de la diferencia entre la transferencia de mensajes, en tierra era posible mandar más de cien palabras por minuto, mientras que a través del mar, en el mejor de los escenarios, se llegaba a escasas treinta palabras por minuto.¹¹

Fue William Thomson (1824-1907), mejor conocido como Lord Kelvin, el que en 1854 desarrolló, con el apoyo de George Gabriel Stokes (1819-1903), una teoría física que contribuyó a la mejora tecnológica telegráfica transoceánica de la época. Kelvin identificó que el retardo en la recepción de la señal estaba en función del largo del cable o línea de transmisión y aunque en un principio se pensaba que el retardo era directamente proporcional a la longitud, en realidad la relación era proporcional al cuadrado de la longitud. La teoría de Kelvin se basó directamente en la teoría de la transferencia de

11 [Mahon, 2009, p. 20].

calor desarrollada por Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830): las matemáticas que modelaban el paso de la electricidad a través de un cable eran las mismas que las del flujo de calor a través de un material dado. El valioso análisis de Kelvin era una simplificación fundamentalmente teórica que resultó ser apropiada para líneas de transmisión muy largas y con una tasa de transferencia de señales baja: el cable transatlántico era un excelente candidato; no así las líneas cortas con tasas de transferencia altas.¹²

En la actualidad es difícil imaginar que los ingenieros del telégrafo del siglo XIX carecieran de herramientas conceptuales básicas, en particular matemáticas y físicas, cuando hemos apuntado que la industria del telégrafo en el siglo XIX era un eje importante de investigación científica y desarrollo tecnológico; sin embargo este era el caso. Era común que los ingenieros del telégrafo vieran con malos ojos a las teorías científicas pues pensaban que su uso tendría resultados adversos.

Muestra de esto fue el debate histórico, sostenido en el congreso de la *British Association for the Advancement of Science*¹³ organizado en 1888 en Bath, Inglaterra, entre William Preece, ingeniero en jefe del *Post Office Telephone and Telegraph* y reconocido como una autoridad en la materia (con el cual Heaviside tuvo no pocas y muy serias diferencias) y Oliver Lodge (1851-1940), físico inglés en la *University College* y amigo de Heaviside. Originalmente se tenía planeado que Lodge hablara de pararrayos, pero el debate rápidamente se tornó hacia defender la teoría sobre la práctica y viceversa. Preece defendió la superioridad de la ingeniería sobre las matemáticas, incluso llegó a afirmar que él había “... hecho a la matemática su esclava...”.¹⁴ Oliver Lodge en cambio, defendió la importancia de la teoría para el estudio, aplicación y resolución de problemas prácticos.¹⁵ Es importante tener presente que Heaviside fue uno de los precursores en el uso de las matemáticas y la física, a diferencia de muchos de sus contemporáneos relacionados con la industria del telégrafo, con su experiencia como

12 [Nahin, 2002, p. 20].

13 A veces llamada B.A., Heaviside la reinterpretaría como “*British Asses*”, [Nahin, 2002, p. 26].

14 “... *made mathematics his slave...*” en el original *The Electrician*, vol. 21, p. 645, September 21, 1888, [Nahin, 2002, p. 64].

15 Para más información sobre este debate [Mahon, 2009], [Nahin, 2002], [Yavetz, 1995].

operador de telégrafos y su indiscutible genio, identificó las virtudes que la aplicación de la teoría acarrea en la resolución de problemas tecnológicos de índole electromagnética con el telégrafo.

La teoría de Kelvin reinaría en la industria telegráfica, en muchas ocasiones de manera equivocada pues fue ampliamente utilizada para líneas terrestres que no cumplían con los requisitos de líneas de transmisión largas y tasas de transferencia bajas. Oliver Heaviside décadas más tarde y con el apoyo del *Treatise on Electricity and Magnetism* de James Clerk Maxwell, propondría una teoría mucho más robusta para el telégrafo y el electromagnetismo.

1.3 Oliver Heaviside

Heaviside, nació en 1850 en Camden Town, Londres, fue uno de los precursores de la ingeniería eléctrica. Tuvo la fortuna de recibir una educación escolar hasta 1866 cuando, por limitaciones económicas, no pudo seguir financiando sus estudios universitarios y decidió continuar de manera autodidacta.

Desde muy joven, Heaviside observaba con recelo la manera como se enseñaba geometría, gramática y química. En lo que se refiere a la geometría, el método de enseñanza era el tradicional enfoque axiomático, originalmente desarrollado por Euclides. Años más tarde en sus estudios sobre el electromagnetismo, Heaviside llegó a afirmar “Euclides es lo peor”¹⁶. Consideraba que la geometría es esencialmente una ciencia experimental, como cualquier otra, y en ese sentido debía ser impartida a jóvenes por observación, de manera descriptiva y experimentalmente. Asimismo, consideraba que debía ser cuantitativa: un niño que utiliza apoyos prácticos como regla, compás, modelos, etc., que se le pide calcular el valor aproximado de π , verá por sí mismo la verdad de este concepto y lo entenderá

16 “*Euclid is the worst*” en el original, [Heaviside, 1912, p. 513].

mucho mejor que con el uso de cualquier demostración lógica carente de un conocimiento experimental.¹⁷

I also feel quite certain about the experiential and experimental basis of space geometry [...] it is generally believed by mathematicians that geometry is pre-existent in the human mind, and that all we do is to look at nature and observe an approximate resemblance to the properties of the ideal space. You might assert the same pre-existence of dynamics or chemistry. I think it is a complete reversal of the natural order of ideas [...] The experience of past generations makes the acquisition of present experience easier [...] it is all experience, after all. [Heaviside, 1912, p. 514]

Es importante tener presente la postura empirista de Heaviside pues fue uno de los ejes rectores en su actividad profesional como ingeniero.

Una situación familiar contribuyó a definir el curso de la vida de Heaviside, la de sus tres hermanos y en menor medida la de toda la familia. Emma Wheatstone, hermana de la madre de Heaviside, se casó con Charles Wheatstone,¹⁸ inventor, ingeniero y profesor de física experimental en el *King's College* que fue mentor de Oliver y sus hermanos. Fue Wheatstone quien introdujo a los hermanos Heaviside al mundo de la ciencia, la experimentación, la ingeniería y en particular al telégrafo. A los 18 años, Oliver Heaviside, con apoyo de su tío, pero sin duda alguna debido a sus sobresalientes aptitudes, consiguió el puesto de operador de telégrafos en la *Danish–Norwegian–English Telegraph Company*. Su paso por la industria del telégrafo sólo duraría 6 años.

Posteriormente Heaviside inició un proceso de 51 años donde de manera completamente autodidacta logró establecer las bases de la ingeniería eléctrica, de las telecomunicaciones, realizó diversas contribuciones en áreas de conocimiento como las matemáticas y predijo la existencia de la ionosfera. Fue un hombre de inmenso genio, pero por su espíritu libre y poco convencional es prácticamente imposible asignarle una etiqueta pues replanteó las fronteras entre diversas disciplinas y oficios:

17 [Heaviside, 1912, pp. 513-514].

18 Wheatstone es mejor conocido por sus contribuciones en el desarrollo del *Puente de Wheatstone*, el cual es un circuito eléctrico que permite medir el valor de una resistencia desconocida.

The practical men didn't understand [his] mathematics, the physicists admired his mastery of electricity but were perplexed by his emphasis on engineering aspects, and the mathematicians were horrified at the liberties he took with their subject. [Mahon, 2009, p. 143]

Por su importancia para este trabajo, son tres las aportaciones de Heaviside que revisaré a continuación: la primera es el cálculo operacional, que es una técnica para la resolución de ecuaciones diferenciales; la segunda es la función escalón y la tercera es el álgebra vectorial y la correspondiente reformulación de la teoría electromagnética de Maxwell. Las tres están motivadas por la misma razón: la experiencia y la experimentación deben guiar el quehacer matemático y científico. La ciencia y las matemáticas deben permitirse ser llevadas de la mano por la experiencia y la experimentación.

Heaviside experimentó libremente con el telégrafo del siglo XIX, pero también con las matemáticas y la física de la época. Fue un fiel defensor del cálculo operacional pues este significaba resolver problemas prácticos electromagnéticos de manera más eficiente y comprensible. La justificación teórica matemática no le preocupaba, de ella podrían encargarse los puristas matemáticos de la época; lo mismo con la función escalón que es un análogo matemático de apretar un botón para mandar una señal eléctrica. El álgebra vectorial le permitió reformular la teoría original de Maxwell de veinte ecuaciones a solo cuatro simples y elegantes ecuaciones. Esta nueva formulación se basa en una notación vectorial y además elimina el uso de los vectores potenciales de corriente y electrostático, originalmente propuestos por Maxwell como fundamentales para el electromagnetismo y que Heaviside llegó a catalogar como una *physical inanity* y como *metaphysical*.¹⁹

Así como con el indicador de diagrama, la diferencia en la escala espaciotemporal del telégrafo ante los posibles experimentos que pudieran llevarse a cabo en laboratorios, es notable, ¿cómo reproducir en un laboratorio las interacciones presentes en una línea de transmisión transoceánica? Heaviside supo aprovechar todas las ventajas que la tecnología telegráfica de la época manifestaba en diferentes ambientes, ya fuera uniendo ciudades vía terrestre, o en el caso de las líneas de transmisión submarinas,

¹⁹ [Heaviside, 1894, pp. 483, 511].

a través de océanos. Asimismo tuvo la capacidad de identificar los requerimientos que la tecnología necesitaba de la ciencia y las matemáticas. Lo siguiente que hizo fue experimentar libremente con las matemáticas y con la teoría electromagnética de Maxwell para apegarse en la medida de lo posible a esos requerimientos.

1.3.1 Heaviside y sus aportaciones

El modelado matemático del comportamiento de las líneas de transmisión transoceánicas que Kelvin propuso era limitado. Debido a su origen esencialmente teórico, simplemente consideraba la resistencia y la capacitancia del cable, es decir, la oposición del cable al libre flujo de corriente dado por un voltaje y la capacidad del cable para almacenar energía eléctrica, respectivamente. Propiedades como la inductancia fueron obviadas ya que en líneas de transmisión largas y con bajas tasas de transferencia, los efectos de la capacitancia dominaban a los de la inductancia. Asimismo, aspectos como fugas no fueron considerados en el modelo. Su teoría fue conocida popularmente entre los ingenieros como “La ley KR”: ella establecía que el tiempo de retardo en la señal recibida a través de cables submarinos era proporcional al producto de la capacitancia (K^{20}) por la resistencia (R) del cable (es decir: KR).

El hecho era que los análisis teóricos de la época eran, en cierto sentido, superficiales simplificaciones de los fenómenos electromagnéticos que ocurrían en el telégrafo. No sólo se olvidaban de propiedades tan relevantes como la inductancia y de importantes cuestiones en las líneas de transmisión como las fugas, sino que solamente consideraban circuitos en estado estable.²¹ La ley de Ohm por ejemplo (el voltaje de un circuito es igual al producto de su resistencia por la corriente que lo atraviesa), no puede dar cuenta de estados transitorios. Kelvin fue uno de los primeros en abocarse a

20 En aquella época se utilizaba la K para representar a la capacitancia. Actualmente se utiliza una c , y esta será la que utilizaré en desarrollos matemáticos posteriores.

21 Un sistema se encuentra en estado estable una vez que ha logrado una cierta estabilidad más o menos constante. Por ejemplo, si encendemos una máquina esta no tendrá un comportamiento estable inmediato, tendrá que atravesar un estado transitorio irregular por un cierto periodo de tiempo hasta poder alcanzar un estado estable de funcionamiento.

esta empresa, pero sería de la mano de Heaviside que el análisis transitorio establecería sus bases.

Heaviside era consciente de que sólo determinando el correcto análisis tanto del estado estable como del transitorio en las líneas de transmisión sería posible obtener un entendimiento completo del envío y recepción de señales del telégrafo. La diferencia entre la propuesta de Kelvin y la de Heaviside estuvo determinada por el lugar que cada uno le dio a la tecnología y la manera como utilizaron a la ciencia y a las matemáticas.

Para un análisis más íntegro, Heaviside, a diferencia de Kelvin, tuvo que considerar a la inductancia. La inductancia es la propiedad de un conductor eléctrico de almacenar energía electromagnética dada una variación en la corriente eléctrica que lo atraviesa, situación común en el envío de señales en las líneas de transmisión telegráficas. Heaviside realizó su análisis con el fin de predecir el comportamiento del voltaje (y por lo tanto el de la corriente) *en cualquier punto de la línea de transmisión en cualquier instante dado*. Para Heaviside, el *cálculo operacional* surgiría naturalmente como una herramienta indispensable en los desarrollos matemáticos de dicho análisis. Veremos hasta qué punto el cálculo operacional, la función escalón y el álgebra vectorial, son muestra de una matemática guiada y modificada por el funcionamiento de la tecnología.

1.3.1.1 Cálculo operacional

Existen registros sobre el uso del cálculo operacional desde Leibniz, pasando por Lagrange, Laplace, Fourier (con su propuesta de las series de Fourier dio un paso importantísimo en el cálculo operacional, estableciendo las bases para futuros desarrollos), Cauchy (quien fue el primero en proponer de manera más sistemática el cálculo operacional, pues desarrolló los métodos convencionales del cálculo operacional moderno) y Boole (que contribuyó a definir el concepto de operador y del inverso de un

operador)²²; lo que significa que Oliver Heaviside no fue el primero en hacer uso de esta valiosa herramienta formal, lo que sí lo diferencia es la manera como decidió utilizarla.

El cálculo operacional es la sustitución del operador diferencial por un coeficiente algebraico, o en otras palabras, el transformar una ecuación diferencial lineal en una ecuación algebraica. Para aquellos más o menos familiarizados con nociones matemáticas esto suena muy atractivo pues implica una alternativa a la resolución de ecuaciones diferenciales vía métodos tradicionales, los cuales pueden derivar en complejos desarrollos matemáticos susceptibles a errores humanos. En su lugar, el sustituir los operadores diferenciales por algebraicos (en palabras de Heaviside “*algebraize*”²³) nos permite operar algebraicamente las ecuaciones y, de esta forma, llegar de manera mucho más efectiva y breve a la solución del problema.

Históricamente, y concretamente con Cauchy y hasta Boole, el cálculo operacional había probado ser una herramienta muy efectiva en la teoría de ecuaciones diferenciales,²⁴ pero no fue sino con Heaviside que las fronteras del cálculo operacional fueron modificadas debido a su increíble utilidad en la resolución de problemas prácticos, particularmente aplicados al análisis de transferencia de señales en el telégrafo.

Cuando menciono la utilidad del cálculo operacional en problemas prácticos, me estoy refiriendo específicamente a la resolución de problemas en circuitos eléctricos. Vale la pena realizar un repaso superficial sobre ciertos conceptos físico matemáticos en lo que respecta al análisis de circuitos porque es necesario para comprender la relación entre las aportaciones que Heaviside realizó en el área del cálculo operacional y la tecnología de circuitos en el telégrafo de la época.

Georg Ohm (1789-1854) fue un físico y matemático alemán que descubrió una relación fundamental en circuitos eléctricos conocida como la Ley de Ohm, que para un circuito en estado estable cumple la relación:

22 Para una revisión histórica más completa: [Cooper, 1952].

23 [Heaviside, 1899, p. 41].

24 [Petrova, 1987, p. 2].

$$V = Ri \text{_____} (1)$$

Es decir, el voltaje (V) aplicado a un circuito eléctrico será igual al valor de la corriente (i) multiplicada por el valor de la resistencia (R). Incluso para los menos aptos en matemáticas esta fórmula se presenta amigable.

Si pensamos en la Ley de Ohm, un circuito eléctrico en estado estable significará que, después de un cierto tiempo, tanto la corriente como el voltaje (la resistencia es constante) se encontrarán sin variaciones, es decir, serán constantes también. Si recordamos que a Heaviside le interesaba poder establecer los valores de corriente y voltaje *en cualquier momento dado y en cualquier punto de la línea de transmisión*, esto evidentemente no sería suficiente, pues estaríamos perdiendo de vista el comportamiento de los circuitos eléctricos en estado transitorio. Heaviside consideró que un cable tiene ciertas propiedades eléctricas distribuidas homogéneamente: resistencia, capacitancia (c), inductancia (L) y resistencia a fugas (r).²⁵ El condensador eléctrico y el inductor almacenan energía electrostática y electromagnética respectivamente, por lo tanto, un circuito eléctrico que contempla éstos cinco elementos tiene una ecuación del siguiente tipo:

$$V = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{c} \int idt \text{_____} (2)$$

Como podemos observar, la nueva ecuación involucra elementos diferenciales e integrales. Podemos decir que el inductor está relacionado con la tasa de cambio de la corriente con respecto al tiempo; mientras que el condensador está relacionado con la cantidad de carga eléctrica almacenada para una diferencia de voltaje.

Ahora bien, analizando un segmento infinitesimal de una línea de transmisión y aplicando la ley de Ohm, la ley de Faraday y la ley de corrientes de Kirchhoff, Heaviside obtuvo las ecuaciones básicas de una línea de transmisión:

$$\frac{-\partial V}{\partial x} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t}$$

25 [Yavetz, 1995, p. 48].

$$\frac{-\partial i}{\partial x} = \frac{V}{r} + c \frac{\partial V}{\partial t}$$

De estas dos ecuaciones podemos llegar a una ecuación general:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = Lc \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + \left(Rc + \frac{L}{r} \right) \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{RV}{r} \text{-----} \quad (3)$$

Si lo que se busca es conocer el voltaje en estado estable, la solución matemática al problema no significará mayores contratiempos. Sin embargo, llegar a la solución en estado transitorio es algo más complicado. Para conseguirla, Heaviside en "*On the Self-Induction of Wires*"²⁶ propuso la siguiente igualdad:

$$p = \frac{d}{dt}$$

Estableció que *el componente diferencial podía ser entendido como un coeficiente algebraico (p)*.

Este es el fundamento del cálculo operacional propuesto por Heaviside. Utilizó este método para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias con coeficientes constantes así como algunos tipos de ecuaciones diferenciales parciales.²⁷ No le fue difícil asumir que la división, es decir *I/p*, sería la operación inversa a la derivada:²⁸

$$\frac{1}{p} = \int dt$$

Aquí interviene necesariamente otra de las aportaciones de Heaviside de la que hablaré con mayor extensión un poco más adelante: la *función escalón de Heaviside (H(t))*. Heaviside invariablemente consideraba que para tiempos menores a cero (*t < 0*) el voltaje es igual a cero (*V = 0*). Dentro de sus desarrollos utilizaba un *I* para referirse a esta función. Es esta función la que le permite a Heaviside establecer una igualdad entre *I/p* y la integral de 0 a *t*.

26 [Heaviside, 1894, pp. 168-323].

27 [Petrova, 1987, p. 1].

28 Existen diferentes análisis sobre este supuesto en Heaviside, se puede consultar [Yavetz, 1995], H. Jeffreys. *Operational Methods in Mathematical Physics*. Cambridge : At the University Press, 1927.

Si retomamos la versión de la ley de Ohm en estado transitorio, Heaviside interpretó a la resistencia (R) como un *operador* que relaciona a la corriente (i) con el voltaje (V). Realizando las sustituciones pertinentes, podríamos reformular la ecuación (2) de la siguiente forma:

$$V = \left(R + Lp + \frac{1}{cp} \right) i$$

Heaviside observó que los elementos R , L y c se oponen al libre flujo de la corriente, y decidió establecer un operador al que llamó *operador resistivo*, conocido en la actualidad como *impedancia*, donde el mérito es entender a los tres elementos como resistores:

$$Z(p) = R + Lp + \frac{1}{cp}$$

La impedancia es un concepto de muchísima utilidad pues contiene toda la información eléctrica respecto a una línea de transmisión. Es una versión generalizada de la Ley de Ohm y nos permite analizar circuitos con corriente alterna. Esto es muestra de la visión de Heaviside pues, como sabemos, en la actualidad el uso de la corriente alterna es muy común pero sólo hasta finales del siglo XIX se empezaron a identificar las ventajas de este tipo de corriente.

Recordemos que la propuesta de Heaviside de utilizar el cálculo operacional, que derivó en el concepto de impedancia, fue el resultado de buscar una solución de la ecuación (3) para una línea de transmisión en estado transitorio. No me adentraré en el desarrollo de la solución ni detallaré cuáles son las condiciones que Heaviside siguió para poder sustituir el operador p por componentes diferenciales parciales, simplemente quiero enfatizar que si realizamos las sustituciones pertinentes obtendremos una ecuación algebraica que es mucho más tratable que la ecuación diferencial original:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \left(Lcp^2 + \left(Rc + \frac{L}{r} \right) p + \frac{R}{r} \right) V \text{_____} (4)$$

Y si aplicamos nuestro operador p a las dos ecuaciones que surgen del análisis de un segmento infinitesimal de una línea de transmisión obtendremos:

$$\frac{-\partial V}{\partial x} = (R + Lp)i$$

$$\frac{-\partial i}{\partial x} = \left(\frac{1}{r} + cp\right)V$$

Dividiendo la primera ecuación por la segunda e integrando, obtendremos²⁹:

$$V = \sqrt{\frac{R+Lp}{\frac{1}{r}+cp}} i \text{-----} (5)$$

De la cual podemos identificar una nueva relación para la impedancia ($Z(p)$).

Heaviside, partiendo de ecuaciones diferenciales, aplicó, a su juicio de manera intuitiva, el uso de operadores, pues ellos eran nociones físico matemáticas que facilitaban enormemente la resolución de problemas electromagnéticos. Es decir, el comportamiento del telégrafo estableció directrices que sugirieron a Heaviside las propuestas y modificaciones que realizó en matemáticas. Como hemos visto, Heaviside creía que debía experimentar libremente con las matemáticas, guiado por la experiencia, para poder aspirar a un progreso. La misma impedancia es un claro ejemplo de esto: diferentes elementos físicamente resistivos dieron pie a una conceptualización matemática verdaderamente fructífera.³⁰ Para Heaviside “La mejor prueba es ir y hacerlo”.³¹

Como consecuencia de los desarrollos matemáticos anteriores, el coeficiente algebraico p era elevado a alguna potencia, es decir, en general:

En el caso de derivadas: $p^{1/2}, p^2, \dots, p^n$; y en el de integrales: $p^{-1/2}, p^{-2}, \dots, p^{-n}$

Heaviside consideró esto como una consecuencia inevitable y necesaria, además de útil pues facilitaba enormemente el análisis;³² pero para muchos de sus contemporáneos el significado de una derivada, o de una integral, elevada a la n potencia fue motivo de alarma. Heaviside escribió que “*The square root of a differentiator occurs in the fundamentals of the physical subject, namely, the*

29 Estoy siguiendo el desarrollo de [Yavetz, 1995, pp. 306-320].

30 [Petrova, 1987, p. 3].

31 “*The best proof is to go and do it*” en el original, la traducción es mía. [Heaviside, 1899, p. 34].

32 [Heaviside, 1899, p. 286].

generation of a wave of diffusion.”³³ Sin adentrarnos en desarrollos matemáticos, Heaviside identificó experimentalmente y con el apoyo de series de Fourier que:

$$p^{1/2} \cdot 1 = 1/\sqrt{\pi t} \quad 34$$

Esta igualdad le permitió a Heaviside enfrentarse a ecuaciones que tuvieran el coeficiente algebraico elevado a cualquier potencia.³⁵

Heaviside publicó en febrero de 1893 la primer parte de su artículo titulado *On Operators in Physical Mathematics*, y en junio la segunda parte. En 1894 la *Royal Society* rechazó la publicación de la tercer parte. Existe mucha discusión en torno a este rechazo. La opinión generalizada es que fue debido a la falta de rigor matemático en la *justificación* del uso de operadores. Por otro lado, algunos autores atribuyen el rechazo a otros factores: Cooper, en *Heaviside and the Operational Calculus*,³⁶ defiende la idea de que en realidad la tercer parte fue rechazada por un uso *injustificado* de series divergentes.³⁷ Para nuestros fines cualquiera de las dos opciones funciona en la medida que la comunidad matemática de la época no aceptó la propuesta del cálculo operacional de Heaviside debido a que no estaba justificada matemáticamente. Tenían razón en esto último, el cálculo operacional de Heaviside estaba guiado por requerimientos tecnológicos del telégrafo del siglo XIX y por su alta eficiencia en la resolución de problemas prácticos, la justificación matemática lo tenía sin cuidado.

Heaviside afirmó:

I suppose all workers in mathematical physics have noticed how the mathematics seems made for the physics, the latter suggesting the former, and that practical ways of working arise naturally.

33 [Heaviside, 1899, p. 286].

34 Nótese el uso de la función escalón de Heaviside: **1**.

35 Una vez establecidos todos los componentes necesarios, Heaviside normalmente resolvía las ecuaciones algebraizadas vía el teorema de expansión utilizando series convergentes y/o divergentes, truncando su valor cuando fuera suficientemente aproximado. Para mayor información sobre el teorema de expansión: Jesper Lützen. *Heaviside's Operational Calculus and the Attempts to Rigorise It*, *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 21, No. 2 (20.XII.1979), pp. 161-200.

36 [Cooper, 1952]

37 Para tener una idea, en 1826 el matemático noruego Niels Henrik Abel escribió “*Divergent series are the invention of the devil, and it is a shame to base on them any demonstration whatsoever.*” *From letter (Jan 1828) to his former teacher Berndt Holmböe*. In Morris Kline, *Mathematics: The Loss of Certainty* (1982), 170.

This is really the case with resistance operators. It is a fact that their use frequently effects great simplifications, and the avoidance of complicated evaluations of definite integrals. But then the rigorous logic of the matter is not plain! Well, what of that? Shall I refuse my dinner because I do not fully understand the process of digestion? No, not if I am satisfied with the result.

[el énfasis es mío]. [Heaviside, 1899, p. 9]

El ejemplo indica que la teoría matemática para la solución de ecuaciones diferenciales fue modificada por un *requerimiento* de las líneas de transmisión del telégrafo. En un principio, el poder predecir el comportamiento de la corriente y el voltaje en cualquier momento dado y en cualquier punto de la línea de transmisión implicaban desarrollos matemáticos complejos que derivaban en la posibilidad de cometer errores. El cálculo operacional resultó ser una herramienta muy efectiva en la simplificación de los desarrollos y en la obtención de resultados correctos. Además para Heaviside fue la manera más intuitiva de construir el concepto de impedancia a partir de los elementos resistivos en las líneas de transmisión. La experiencia le indicó cuál era la manera más práctica de proceder. La mayor escala espaciotemporal del telégrafo *sugirió* ciertos requerimientos formales que, aunque no se ajustaban a los criterios tradicionales de los matemáticos de la época, fueron de enorme utilidad.

Lo importante es reconocer que la tecnología guió y modificó a la teoría matemática y científica de la época. En ese sentido podríamos afirmar que un cierto carácter normativo tecnológico contribuyó al desarrollo del conocimiento científico y matemático. Es evidente del ejemplo que la *motivación* o *justificación* de Heaviside para proponer el cálculo operacional para la solución de problemas electromagnéticos en el telégrafo difería cualitativamente de lo que la comunidad matemática de la época esperaba de una justificación del cálculo operacional. Heaviside tenía de su lado la altísima efectividad mostrada con la sustitución del coeficiente algebraico. En una carta fechada el 7 de abril de 1919 Heaviside afirmó “... la lógica es lo último”,³⁸ y “Experiencia y experimentación deben preceder a

38 Es una cita de N. W. McLachlan, *Historical note on Heaviside's operational method*, *The Mathematical Gazette*, Vol. 22, página 257, Julio 1938.

la teoría”.³⁹ Lo que esperaban los matemáticos de la escuela de Cambridge era justamente lo contrario, una justificación matemática de su propuesta independientemente de que con ella se pudieran o no resolver problemas concretos y prácticos. Empero, lo que hay que reconocer es que las soluciones de Heaviside se conservan y se utilizan hasta la fecha, mientras que las objeciones de los matemáticos históricamente son de mucha menor importancia.

A continuación presentaré el caso de la función escalón y el álgebra vectorial para contribuir a la idea de matemáticas y ciencia guiadas y modificadas por la tecnología.

1.3.1.2 Función escalón de Heaviside ($H(t)$)

El análisis de señales a través de las líneas de transmisión del telégrafo le permitió a Heaviside establecer una analogía entre el mandar un pulso telegráfico y las características de una función particular de cada señal: obligar que las funciones comenzaran a partir de un tiempo cero. Esto facilitaba enormemente los cálculos y permitía la aplicación libre de sus métodos operacionales. La función escalón está definida como:

$$H(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$$

Si nos interesa que nuestra función comience en un tiempo t_0 distinto a cero, tendremos:

$$H(t - t_0) = \begin{cases} 1, & t \geq t_0 \\ 0, & t < t_0 \end{cases}$$

Heaviside también consideró la derivada de la función escalón, la cual actualmente es conocida como delta de Dirac ($\delta(t)$), y es igualmente útil en el cálculo y resolución de problemas:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases}$$

39 “*Experience and experiment must precede theory.*” en el original, la traducción es mía. [Heaviside, 1899, p. 250]

Utilizar la función escalón con cualquier función, por más complicada que sea, nos garantizará que antes de t_0 su valor será siempre cero, y después de t_0 serán siempre los valores normales de la función.

Lo que es fundamental es que la función escalón está motivada por un fenómeno puramente tecnológico: el envío de señales a través de las líneas de transmisión del telégrafo, y que además tiene un aspecto matemáticamente interesante pues valida el libre uso del cálculo operacional. La función escalón es un extraordinario análogo matemático de apretar un botón para mandar una señal. De nueva cuenta podemos ver que Heaviside hizo una aportación al conocimiento matemático de la época motivado por el funcionamiento del telégrafo que junto con el cálculo operacional son herramientas invaluableles en la actualidad.

Pero las aportaciones de Heaviside no terminan aquí. A continuación presentaré el contexto de la notación cuaterniónica en la teoría electromagnética de Maxwell y las motivaciones de Heaviside para reformular dicha teoría apoyándose en una nueva notación desarrollada por él: el álgebra vectorial.

1.3.1.3 Álgebra vectorial

James Clerk Maxwell (1831-1879) fue un físico escocés que es considerado uno de los científicos con mayor influencia en la historia de la física. En 1873 publicó el *Treatise on Electricity and Magnetism* en el cual postuló su teoría electromagnética que demuestra que la electricidad, el magnetismo y la luz son diferentes manifestaciones del mismo fenómeno: el campo electromagnético. Así como con otras teorías científicas que revolucionaron el entendimiento de sus respectivas áreas de conocimiento, la teoría electromagnética de Maxwell sólo fue reconocida gradualmente. Su proceso de aceptación e integración fue frenado por muchos y muy diversos factores: tomó casi un cuarto de siglo

para que la teoría comenzara a ser vista con diferentes ojos.⁴⁰ De todos los posibles factores que obstaculizaron su avance haré énfasis en uno muy específico: el uso de *cuaterniones* en la formulación de la teoría electromagnética y la correspondiente propuesta de Heaviside para subsanar esa deficiencia.

El *cuaternión* fue un invento del matemático irlandés William Rowan Hamilton (1805-1865) en 1843. En términos muy generales, un cuaternión es un número complejo de la forma:

$$w + xi + yj + zk$$

Donde w, x, y, z son números reales e i, j, k son unidades imaginarias que satisfacen ciertas condiciones. Podríamos decir que un cuaternión está compuesto por una parte escalar (w) y una vectorial ($xi+yj+zk$).

Desde su invención, Hamilton estuvo convencido de su gran importancia y pasó los últimos 20 años de su vida trabajando casi exclusivamente con cuaterniones.⁴² En 1851 escribió:

In general, although in one sense I hope that I am actually growing modest about the quaternions, from my seeing so many peeps and vistas into future expansions of their principles, I still must assert that this discovery appears to me to be as important for the middle of the nineteenth century as the discovery of fluxions was for the close of the seventeenth. [Graves, 1882, p. 445]

Después de leer en 1853 el *Lectures on Quaternions* de Hamilton, Peter Guthrie Tait (1831-1901), físico y matemático escocés, se convertiría en un adepto y fiel defensor de la causa cuaterniónica. En años posteriores intercambiaría una buena cantidad de correspondencia con Hamilton, resultando en una amistad esencialmente motivada por la mutua admiración de los cuaterniones. Después de la muerte de Hamilton, Tait se convertiría en el principal promotor y portavoz del uso y difusión del cuaternión. En 1867 publicaría su libro *An Elementary Treatise on Quaternions*.⁴³

40 Existe un debate interesante respecto a un aspecto de la reticencia de la comunidad científica por adoptar la nueva teoría electromagnética. La concepción generalizada que se tenía de la electricidad y el magnetismo como *fenómenos que actuaban a distancia* dificultaron el entendimiento y aceptación de las nociones desarrolladas por Maxwell. El mismo Kelvin, siendo un sobresaliente físico, matemático e ingeniero, nunca aceptó como correcta dicha teoría.

41 El papel que jugaron los resultados experimentales históricos de Heinrich Rudolf Hertz en 1888 fueron decisivos en este proceso. Dichos resultados confirmaron, entre otras cosas, una de las predicciones de la teoría electromagnética de Maxwell: que las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz.

42 [Crowe, 1985, p. 30].

43 [Nahin, 2002, pp. 193-194].

Tait fue amigo desde la infancia de Maxwell, y aunque ciertamente a mediados del siglo XIX los cuaterniones ya gozaban de una buena reputación, principalmente debido al prestigio que Hamilton tenía como matemático, es un hecho que en buena medida Maxwell escribió las ecuaciones más importantes de su *Treatise* apoyándose en una notación de cuaterniones por influencia de Tait. La teoría constaba de veinte ecuaciones que modelan el comportamiento electromagnético, expresadas en función de componentes cartesianos combinados con cuaterniones.⁴⁴

De acuerdo con Michael Crowe, para Maxwell el valor de los cuaterniones residía en la naturalidad con que podían representar entidades físicas y las abreviaturas que de ello derivaban, es decir, apreciaba las bondades del cuaternión como *concepto*. Por otro lado, reconocía las carencias del cuaternión como *método*: ciertos aspectos de su producto vectorial y, en particular, el hecho que el cuadrado de la parte vectorial del cuaternión es negativa (el caso de un *vector de velocidad* implicaría energía cinética negativa debido a que dicha energía se calcula multiplicando la masa por el cuadrado de la velocidad dividido entre dos). Para nuestro análisis, la contribución de Maxwell fue doble: primero, vinculó ideas vectoriales con fenómenos electromagnéticos; y segundo, delineó la forma que debería adoptar un análisis vectorial apropiado.⁴⁵

Años posteriores a la publicación del *Treatise on Electricity and Magnetism*, en la década de 1880, dos hombres en distintos continentes de manera completamente independiente y prácticamente simultánea, desarrollaron dos *análisis vectoriales*, que derivarían en la formalización de *álgebras vectoriales*, en esencia idénticos y motivados por la misma causa: cuidadosa y sistemáticamente reemplazaron el uso de cuaterniones en la teoría de Maxwell por una notación vectorial que facilitara el análisis y la comprensión del electromagnetismo. Uno de ellos fue Oliver Heaviside, el otro fue Josiah Willard Gibbs (1839-1903), científico estadounidense. En una carta a su colega matemático, Victor Schlegel, Gibbs escribió:

44 [Nahin, 2002, p. 109].

45 [Crowe, 1985, p. 139].

My first acquaintance with quaternions was in reading Maxwell's E. & M. [Electricity and Magnetism] where Quaternion notations are considerably used. I became convinced that to master those subjects, it was necessary for me to commence by mastering those methods. At the same time I saw, that although the methods were called quaternionic the idea of the quaternion was quite foreign to the subject. [Crowe, 1985, p. 153]

Anteriormente mencioné el lugar que Maxwell y su obra ocuparon en la vida de Heaviside, el valor que él le otorgaba a la experiencia, la manera en cómo debía hacerse ciencia así como sus preocupaciones en esencia pragmáticas. Heaviside consideró a los cuaterniones como conceptos matemáticos sumamente abstractos y complejos sin una representación física.⁴⁶ Ciertas propiedades de los cuaterniones le resultaban incomprensibles cuando se aplicaban en la teoría electromagnética, en particular tenía en mente algo que apuntamos más arriba: el valor negativo del cuadrado de un vector. En este sentido, pensaba que el uso de cuaterniones complicaba innecesariamente la teoría electromagnética de Maxwell, pero sobre todo, entorpecía su aplicación en la práctica:

Quaternionics was in its vectorial aspects antiphysical and unnatural, and did not harmonise with common scalar mathematics. So I dropped out the quaternion altogether, and kept to pure scalars and vectors, using a very simple vectorial algebra in my papers from 1883 onward.

[Heaviside, 1912, p. 136]

Para Heaviside:

It rarely occurs that any advantage is gained by the use of the quaternion, in saying which I merely repeat what Professor Willard Gibbs has been lately telling us; and I further believe the disadvantages usually far outweigh the advantages. Nevertheless, apart from practical application, and looking at it from the purely quaternionic point of view, I ought to also add that the invention of quaternions must be regarded as a most remarkable feat of human ingenuity. Vector analysis, without quaternions, could have been found by any mathematician by carefully examining the

46 [Heaviside, 1892, p. 136].

mechanics of the Cartesian mathematics, but to find out quaternions required a genius.

[Heaviside, 1894, p. 557]

Heaviside comenzó a introducir sus métodos vectoriales en una serie de artículos titulada “*The Relations between Magnetic Force and Electric Current*”.⁴⁷ El álgebra vectorial fue una novedosa forma de investigar y describir las fuerzas eléctricas y magnéticas y la manera como interactúan entre sí. Con su conocimiento y experiencia en fenómenos electromagnéticos, Heaviside fue capaz de reformular las veinte ecuaciones de la teoría de Maxwell en tan solo cuatro ecuaciones que utilizaban su notación vectorial, aplicándolas exitosamente en la práctica, principalmente en la transferencia de señales en la industria telegráfica, como muestran sus numerosas publicaciones.⁴⁸ Dicha reformulación no fue puramente formal, para Maxwell los vectores potenciales de corriente y electrostático desempeñaban un papel central en su teoría electromagnética. Heaviside propuso en cambio los campos vectoriales magnético y eléctrico como centrales de la teoría electromagnética, pues consideraba que eran mucho mejores representantes del comportamiento electromagnético. Llegó a afirmar “... *the two potentials, if given everywhere, are not sufficient to specify the state of the electromagnetic field. Try it; and fail*”.⁴⁹ Como mencioné anteriormente, considero que una diferencia importante entre Maxwell y Heaviside es que este último estuvo en contacto con fenómenos electromagnéticos a través del funcionamiento del telégrafo, trabajó como ingeniero de este y supo apreciar las ventajas de una teoría más sencilla y práctica para resolver problemas concretos.

Así como con el cálculo operacional, el álgebra vectorial de Heaviside tampoco fue bien recibida. El portavoz heredero de la causa cuaterniónica, Peter Guthrie Tait, de nueva cuenta aparecería en escena. Para Tait, el álgebra vectorial propuesta por Heaviside no solo era una aberración científica en la medida que dejaba de lado uno de los descubrimientos más importantes del siglo XIX, sino que además atentaba contra la teoría electromagnética de su gran amigo de la infancia, Maxwell. Tait era

47 [Heaviside, 1892, p. 195].

48 Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) derivó ecuaciones similares de manera independiente por los mismos años.

49 [Heaviside, 1894, p. 173].

reconocido como un hombre que en persona podía ser encantador, pero que en lo impreso podía llegar a ser tan agresivo y tan desagradable como un elefante macho con la trompa infectada.⁵⁰ Tait redactó el prefacio de la tercer edición del *Treatise on Electricity and Magnetism* de Maxwell en 1890, su tono fue claro:

*It is disappointing to find how little progress has recently been made with the development of Quaternions. One cause, which has been specially active in France, is that workers at the subject have been more intent on modifying notation, or the mode of presentation of the fundamental principles, than on extending the applications of the calculus... Even Prof. Willard Gibbs must be ranked as one of the retarders of Quaternion progress, in virtue of his pamphlet on Vector Analysis; a sort of hermaphrodite monster, compounded of the notations of Hamilton and of Grassmann.*⁵¹

En consecuencia los primeros años de la década de 1890 se caracterizaron por la publicación de artículos en defensa y ataque de cuaterniones y vectores.⁵² De acuerdo con Crowe, por un lado se encontraban los adeptos a la causa cuaterniónica que en resumidas cuentas defendían cierta elegancia algebraica, simplicidad y *naturalidad*. Tait en *On the Intrinsic Nature of the Quaternion Method* incluso llegó a afirmar “*Quaternions, in a word, exist in space, and we have only to recognize them: - but we have to invent or imagine co-ordinates of all kinds.*”⁵³ Por otro lado los adeptos del análisis vectorial, con una postura mucho más pragmática, defendían su expresividad, la correspondencia con relaciones físicas y su facilidad de comprensión, es decir, la conveniencia práctica en el uso y aplicación de este análisis en áreas como la física y la geometría.

Vale la pena abordar un aspecto puntual de la discusión: las implicaciones del resultado negativo al elevar al cuadrado la parte vectorial de un cuaternión y su relación con un álgebra vectorial no asociativa. Más allá de debatir la posible correspondencia entre el resultado y la adecuada

50 [Nahin, 2002, p. 189].

51 Heaviside lo parafrasea en [Heaviside, 1892, pp. 137-138] y [Nahin, 2002, p. 196] lo cita aunque sin referencia directa.

52 Para una reconstrucción histórica explícita de este proceso, consultar: [Crowe, 1985].

53 [Crowe, 1985, p. 213].

representación de una relación física (como el problemático caso anteriormente mencionado de la energía cinética), el resultado negativo del producto vectorial es en sí mismo una consecuencia de cómo se encuentra estructurado el sistema cuaterniónico, en particular, implica definir un producto que viola la ley de conmutatividad. Cuando Hamilton ideó el cuaternión y estableció sus reglas operativas, era consciente de la importancia de las leyes asociativa, conmutativa y distributiva; pero consideró que no existía nada algebraicamente erróneo en proponer un producto que no fuera conmutativo, aspecto duramente criticado en la década de 1840.

Medio siglo más tarde, en la década de 1890, el álgebra vectorial definió el resultado del producto vectorial como positivo, resolviendo así una preocupación latente en buena parte de la comunidad científica: por fin existía una adecuada representación matemática de un buen número de relaciones físicas; el precio que se tuvo que pagar fue interesante. Por un lado permitió que el producto vectorial recuperara la propiedad conmutativa, por otro, desembocó en un álgebra cuyas cantidades características no son asociativas, perdiendo así su asociatividad. Irónicamente, este fue un aspecto duramente criticado por los defensores del cuaternión, argumentando que un sistema que viola la ley de asociatividad tenía algo de *antinatural*. A lo que Alexander Macfarlane (1851-1913), científico escocés y promotor del álgebra vectorial, contestó que tanto el resultado negativo como el positivo del producto vectorial son *supuestos*, que dentro del sistema serían establecidos como una definición, y por lo tanto, completamente arbitrarios algebraicamente.⁵⁴

Lo anterior es pertinente para este escrito porque, aunque abordé la discusión del producto vectorial superficialmente, basta para mostrar un cierto nivel de arbitrariedad en las matemáticas en oposición a los compromisos metafísicos que han llegado a hacerse entre las matemáticas y el mundo. Esa arbitrariedad dota a las matemáticas de cierta flexibilidad o *plasticidad*. Como Macfarlane dijo, tanto el sistema cuaterniónico como el vectorial parten de supuestos que son completamente arbitrarios. Es ese nivel de arbitrariedad el que Heaviside aprovechó para moldear libremente la teoría matemática a los

54 [Crowe, 1985, p. 203].

requerimientos funcionales del telégrafo. Retomaré y profundizaré este aspecto en el siguiente capítulo, por ahora regresemos a la discusión de los cuaterniones y los vectores.

Es importante apuntar que buena parte del álgebra vectorial que tanto Heaviside como Gibbs desarrollaron, fue una derivación del sistema cuaterniónico de Hamilton. Apoyándose en las pautas embrionarias que Maxwell delineó para un análisis vectorial apropiado como consecuencia de sus brillantes asociaciones entre fenómenos electromagnéticos y nociones vectoriales, rescataron los aspectos valiosos del cuaternión y eliminaron aquellos que obstaculizaban el análisis y la comprensión del electromagnetismo. Heaviside afirmó respecto a su análisis vectorial “*It is simply the elements of Quaternions without the quaternions, with the notation simplified to the uttermost, and with the very inconvenient minus sign before scalar products done away with.*”⁵⁵

Mientras que el concepto del cuaternión fue el resultado de una metódica y cuidadosa cavilación de Hamilton respecto a los números complejos que culminó cuando atravesaba un puente en Dublín, el *Broom Bridge*, en un paseo que él y su esposa tomaban una tarde de octubre de 1843; el álgebra vectorial de Heaviside fue el resultado de analizar en la práctica reiterativa los fenómenos electromagnéticos que manifestaba el envío de señales a través de las líneas de transmisión. Es claro que las motivaciones son diferentes en Hamilton y en Heaviside. Este último escribió “*If our object be ultimately physical, rather than mathematical, then the more closely we can identify the symbols with their physical representatives the more usefully can we work, with avoidance of useless —though equally true— mathematical exercises.*”⁵⁶

La historia determinaría como ganadora y por amplio margen al álgebra vectorial. Ciertamente tanto Gibbs como Heaviside propusieron sus respectivas álgebras vectoriales, pero debemos ser cuidadosos en no cometer el error de reconocerles la victoria por igual. La asociación que Heaviside estableció entre el análisis vectorial y la teoría electromagnética de Maxwell así como la correspondiente

55 [Heaviside, 1894, p. 529].

56 [Heaviside, 1892, p. 136].

reformulación de esa teoría resultó ser un éxito porque representaba mejor los fenómenos electromagnéticos, lo que derivó en una mayor practicidad y utilidad. Crowe realiza un breve recorrido histórico de doce publicaciones entre 1894 y 1910 que son evidencia del proceso de aceptación y validación del álgebra vectorial propuesta por Heaviside dentro de la comunidad científica.⁵⁷ No es casualidad entonces que las principales publicaciones de estos años en Inglaterra, Alemania e Italia, que presentaban el análisis vectorial moderno, formaran parte de libros sobre electricidad que abordaban la teoría de Maxwell partiendo de la reformulación de Heaviside.⁵⁸ En este sentido los principales promotores del nuevo análisis vectorial fueron ingenieros y físicos.

En la actualidad el álgebra vectorial es un lenguaje estándar para físicos e ingenieros no sólo en el análisis de campos electromagnéticos, sino también en otras áreas de estudio como mecánica, óptica, transferencia de calor, dinámica de fluidos, por nombrar algunas.⁵⁹ El análisis vectorial es una herramienta necesaria por su practicidad, aplicabilidad y accesibilidad para estudiantes y profesionistas, lo cual es muestra de los beneficios que se pueden obtener cuando la tecnología toma la batuta para la solución de problemas.

57 [Crowe, 1985, p. 226].

58 [Crowe, 1985, p. 228].

59 [Mahon, 2009, p. 48].

Capítulo 2

Plasticidad científica y matemática

Los ejemplos anteriores son evidencia de limitaciones cognitivas de la ciencia y de las matemáticas en relación con fenómenos tecnológicos concretos.

En el caso del motor de vapor la teoría del calórico significó un obstáculo en la mejor comprensión de la relación entre el vapor y el funcionamiento del motor. La ley de Boyle ofrecía valores aproximados que no correspondían con los valores reales de presión y volumen en las máquinas. Para Watt el indicador de diagrama resolvió el problema que implicaba la ley de Boyle: con él pudo obtener un registro continuo de los valores de presión y volumen en la máquina. Esto le permitió indagar en la relación entre el calor latente/sensible y la presión del motor de vapor; el problema es que esa indagación partía de presupuestos fundamentales de la teoría del calórico.

Carnot identificó aspectos significativos de la operación de las máquinas de vapor idealizando su funcionamiento, pero incluso en su propuesta original se puede identificar la influencia de la teoría del calórico: la entropía y el calor no eran claramente diferenciados, además de preservar la equívoca idea de que el calor se conserva. Tuvieron que pasar algunos años hasta que Clapeyron logró confluir las valiosas aportaciones de Carnot y el marco explicativo del indicador para que la termodinámica comenzara a tomar forma. Lo relevante ahora es apuntar que la teoría fue insuficiente y deficiente para entender y resolver problemas concretos. Fue la tecnología la que guió parte de esa modificación estableciendo directivas pertinentes a las que la ciencia se adaptó.

El indicador estableció un marco explicativo empírico el cual le indicó a la ciencia el camino a tomar para superar nociones deficientes del calórico e identificar y rescatar aquellas que fueran de utilidad. La relevancia del indicador es tan significativa en este proceso que la noción de trabajo derivó del diagrama trazado por el indicador, siendo el área bajo su curva, además de mejorar la comprensión de los procesos adiabáticos e isotérmicos con el estudio de secciones del diagrama. Es decir, la teoría del calórico tuvo la suficiente plasticidad para abandonar nociones deficientes apoyada en las guías tecnológicas, reformular algunos de sus conceptos y posteriormente dar pie a la teoría termodinámica.

En el caso de la teoría electromagnética de Maxwell, la teoría fue reformulada debido a consideraciones fundamentalmente pragmáticas. La obra de Maxwell era inaccesible para el común denominador de la comunidad científica (a Heaviside le tomó alrededor de 10 años comprender cabalmente el tratado). Los ejemplos de las contribuciones de Heaviside son evidencia de una plasticidad en la teoría científica y matemática. Por supuesto alguien podría pensar, con justa razón, que las cuatro ecuaciones propuestas por Heaviside únicamente simplificaron complejas relaciones formales de las veinte ecuaciones originales respetando la interpretación electromagnética de Maxwell; este no es el caso. Heaviside eliminó de sus cuatro ecuaciones nociones fundamentales para la teoría maxwelliana como los vectores potenciales de corriente y electrostático, considerándolos nociones innecesarias y metafísicas, dándole un lugar protagónico a los campos magnéticos y eléctricos.

El caso de la teoría matemática para la solución de ecuaciones diferenciales es parecido a los anteriores. El cuerpo teórico matemático fue modificado debido a motivaciones fundamentalmente pragmáticas, sin contar con una justificación formal aceptada por la comunidad matemática del siglo XIX. El comportamiento del envío de señales a través de las líneas de transmisión estableció un marco de posibilidades y guió el desarrollo del conocimiento matemático. Las aportaciones matemáticas de Heaviside tuvieron un impacto enorme en el análisis electromagnético, las necesidades tecnológicas concretas establecieron directrices que fueron identificadas y eventualmente cubiertas, los cálculos matemáticos tenían una alta correspondencia con los resultados experimentales.

Ya fuera porque la ciencia no permitía tener una mejor comprensión entre diferentes variables como el vapor y la eficiencia (que posteriormente resultó ser el calor y el trabajo), o porque la ciencia era una manera poco práctica y poco asequible de analizar y comprender fenómenos electromagnéticos (que promovió la reformulación de la teoría electromagnética de Maxwell), o porque el análisis matemático de fenómenos electromagnéticos en líneas de transmisión telegráficas significaban engorrosos desarrollos matemáticos con tendencia a errores humanos, poco prácticos y deficientes (que resultó en la propuesta del cálculo operacional), así como pobres modelos formales para describir o representar variables electromagnéticas de las líneas de transmisión (que resultó en la impedancia); lo cierto es que no fue la tecnología la que tuvo que adaptarse a aquellas limitaciones científicas y matemáticas, por el contrario, fueron la ciencia y las matemáticas las que, guiadas por las diversas directivas tecnológicas correctamente interpretadas, se modificaron debido a su cualidad plástica siguiendo esos criterios tecnológicos, e incluso, llegaron a ser abandonadas porque la tecnología sugirió maneras más eficientes de establecer la teoría que permitiría comprender mejor los fenómenos estudiados.

No quiero afirmar que las teorías son irrestrictamente maleables y que cualquier modificación puede ser válida. Las modificaciones propuestas y el abandono de ciencias teóricas particulares se hicieron siguiendo criterios tecnológicos. Tampoco estoy afirmando que esta sea la única manera en la que dichas modificaciones puedan tener lugar, lo que quiero afirmar en este trabajo es que la tecnología jugó un papel relevante en el desarrollo del conocimiento científico y matemático. Considero que ese papel relevante es el resultado de una diferencia epistémica entre ciencia, tecnología y matemáticas que le otorga cierta autonomía a la tecnología y que muchas veces le permite guiar y establecer restricciones en el quehacer científico. Una manera de interpretar esto es con la idea de *normatividad tecnológica*; de ella hablaré a continuación.

Capítulo 3

Normatividad tecnológica

En diferentes autores existe una idea de normatividad en la tecnología en la medida que los ingenieros, tecnólogos y diseñadores se ocupan del *cómo deben ser las cosas* para que logren funcionar en vista de ciertos objetivos. El carácter normativo que yo estoy proponiendo es uno más fuerte donde la tecnología nos indica de qué manera deberían ser las teorías científicas y las matemáticas para que los fenómenos puedan ser descritos de una mejor manera. Es decir, la ciencia y las matemáticas se ajustan a los requerimientos tecnológicos para resolver problemas concretos y se modifican en función de mejores soluciones.

Considero que la ciencia y las matemáticas son instrumentos plásticos que pueden ajustarse a los requerimientos tecnológicos particulares, siendo la justificación de dicho ajuste o modificación la solución de problemas. Los ejemplos de Heaviside me parecen muy ilustrativos porque él supo identificar las directivas tecnológicas y apegándose a ellas propuso sus formalismos matemáticos, así como el replanteamiento de la teoría electromagnética de Maxwell.

La desconfianza de la comunidad matemática de la época (principalmente la escuela de Cambridge) del cálculo operacional y la función escalón implicaba más que sensibilidades estéticas y envidias profesionales. Ciertamente la obra de Heaviside adolece de claridad conceptual y rigor: hacía uso de términos y procedimientos que raramente definía. Era común que partiera de convenciones personales

sin una adecuada introducción y su trabajo carecía de una sistemática y estructurada organización.⁶⁰ Lo que hacía falta era una *justificación matemática rigurosa* de sus aportaciones. Pero sabemos que para Heaviside esa no era una prioridad, la ciencia y las matemáticas debían ser guiadas por la experiencia y la experimentación.

El caso de Heaviside es muestra de un desarrollo del conocimiento científico y matemático que es consecuencia de la normatividad tecnológica. El hecho de que los métodos operacionales de Heaviside tuvieran un éxito tan alto con los resultados experimentales era suficiente para que él continuara utilizándolos. Desde su perspectiva, los puristas matemáticos podrían pasar sus vidas buscando la justificación. Para hacernos una idea de la eficiencia que implicaba utilizar el cálculo operacional, podía llegarse a los resultados vía métodos operacionales en una página mientras que utilizando métodos tradicionales requería cinco. Esto implicaba mayor simplicidad, elegancia y practicidad que además derivaba en menores errores humanos. Los métodos operacionales en resumen eran eficientes, prácticos y útiles.

El álgebra vectorial propuesta por Heaviside está motivada por las mismas razones que los métodos operacionales: describir los fenómenos electromagnéticos de la manera más práctica y útil posibles. Así como con el cálculo operacional y la función escalón, la resistencia de la comunidad científica para aceptar la notación vectorial de Heaviside no sólo dependía de aspectos estéticos y de orgullos personales, también involucraba compromisos metafísicos que la comunidad científica había establecido con el mundo. Como mencioné más arriba, la *existencia* del cuaternión fue afirmada por el mayor representante y defensor de la causa cuaterniónica: Tait.

Por supuesto debo ser cuidadoso en señalar que la normatividad tecnológica no implica un flujo unidireccional que guía y modifica a la ciencia, en donde la ciencia es un recipiente epistémico de la tecnología. Lo cierto es que existe una suerte de equilibrio reflexivo en donde esa normatividad tecnológica es acompañada por diferentes aspectos del pensamiento científico y matemático,

60 [Yavetz, 1995, pp. 318-319].

estableciéndose un balance. Como ejemplo el indicador de diagrama. Ciertamente este instrumento *poseía* una clase de conocimiento particular que en palabras de Davis Baird, *encapsulaba* conocimiento. Un tipo de conocimiento que no necesariamente era enunciable. Para Baird, el indicador es una clase de conocimiento que logra exhibir una representación y además actúa de manera regular y fiable (algo muy aproximado a la estabilidad y reproducibilidad de la que hablé en la introducción).

Para que esa clase de conocimiento pudiera culminar en lo que actualmente conocemos como termodinámica tuvieron que intervenir muchos factores y personajes. El rastrear ese desarrollo no es un proceso lineal y uniforme. Diferentes personas en diferentes momentos y con diferentes objetivos en mente contribuyeron a establecer los principios de la termodinámica. Más arriba mencioné a Clapeyron como un personaje importante de ese desarrollo. Clapeyron fue un hombre muy capaz que tuvo la sensibilidad de identificar las bondades de una teoría embrionaria como la propuesta por Carnot y supo relacionarla con el marco explicativo del indicador de diagrama. Esto es muestra de un círculo virtuoso en donde las cualidades normativas del indicador y el razonamiento científico se encuentran en equilibrio.

Lo cierto es que en principio parece complicado defender que la ciencia y las matemáticas puedan llegar a normar al *mismo nivel* en que la tecnología las norma a ellas. Y es ahora donde recupero la noción de la diferencia en la escala espaciotemporal entre ciencia y tecnología. El funcionamiento de la tecnología depende de muchísimas interacciones medioambientales que se le escapan al quehacer científico. Por más que los científicos experimenten en laboratorios con el comportamiento de las líneas telegráficas bajo el agua, nunca podrá homologarse a una línea telegráfica que de hecho atraviesa el océano atlántico. Decía más arriba que cuando Kelvin propuso su Ley KR lo hizo partiendo de simplificaciones e idealizaciones. Heaviside se enfrentó a problemas concretos en el envío de señales a través del océano.

Los requerimientos tecnológicos no eran los mismos mandando señales telegráficas en localidades próximas que a través del mar del Norte. La cantidad de variables que podemos simular y controlar en

un laboratorio científico necesariamente son finitas y no pueden equipararse con las innumerables interacciones que participan cuando una tecnología se encuentra funcionando en un medioambiente determinado. Por supuesto, cuando una tecnología debe funcionar en ambientes tan diferentes, con condiciones medioambientales tan diversas, no debe sorprendernos que nuevas e incluso desconocidas interacciones afecten el funcionamiento de la tecnología.

Es en este sentido que considero que la normatividad tecnológica es más fuerte que la normatividad científica. Ciertamente la ciencia determina muchos de los aspectos técnicos de los dispositivos tecnológicos. Pero esa determinación siempre estará mediada y supeditada a cómo se comporte la tecnología en la realidad. Este es un círculo virtuoso que le permite a la ciencia aprender, identificar qué caminos tomar, cómo modificarse, y en casos extremos si debe abandonar una empresa científica porque la realidad, el mundo, a través del funcionamiento de la tecnología, se resiste a comportarse como ella lo prescribe.

Reflexiones finales

Podemos ver que las aportaciones matemáticas de Heaviside aproximan las matemáticas al mundo, porque desde ciertos requerimientos tecnológicos fueron motivadas diferentes nociones matemáticas. Los casos parecen sugerir que las matemáticas pueden ser un intermediario entre la tecnología y la ciencia. Fue con la libre experimentación de las matemáticas que se desarrolló conocimiento científico. Las aportaciones matemáticas de Heaviside tuvieron un impacto directo en la teoría electromagnética.

Otro punto importante es la *justificación* que se encuentra detrás de los ejemplos. El desarrollo del conocimiento científico y matemático estuvo justificado por la solución de problemas concretos tecnológicos. Motivaciones como la utilidad y la practicidad, tan distantes de corrientes filosóficas tradicionales, bastaron para que nociones matemáticas y científicas fueran propuestas. Esto es interesante pues sugiere que la tecnología no es relevante únicamente como un medio en el descubrimiento de conocimiento científico, sino que es relevante incluso como un agente protagónico en la justificación que posteriormente se traduce en conocimiento científico y también matemático.

A lo largo de esta tesis he querido defender la idea de que la tecnología juega un papel epistémico relevante en el desarrollo del conocimiento científico y matemático. En particular, que parte de ese papel epistémico está en función de un carácter normativo en la tecnología, que deriva de una alta escala espaciotemporal y en consecuencia de un alto número de interacciones medioambientales, el cual establece directivas a las que la ciencia muchas veces *debe ajustarse* para la solución de problemas concretos.

Presenté dos casos para ilustrar que la normatividad tecnológica es capaz de dirigir, cambiar o modificar los postulados de una teoría científica.

En el caso de la máquina de vapor, vimos cómo la representación gráfica que arrojaba el indicador promovió la gestación de una nueva teoría científica (la termodinámica) y el abandono de otra (la calorífica). Con las aportaciones de Heaviside expuse cómo los problemas prácticos relacionados con el telégrafo no solo modificaron los fundamentos formales de la teoría electromagnética de Maxwell, sino que también derivaron en un replanteamiento de conceptos fundamentales para dicha teoría. Todo esto contribuyó en el desarrollo del conocimiento científico y matemático.

También propuse la idea de que las teorías científicas tienen una plasticidad tal que se amoldan a los requerimientos tecnológicos. Esto es interesante, porque de alguna manera permite que la ciencia, las matemáticas y la tecnología se retroalimenten una a la otra y no que se confronten. La tecnología manifiesta una clase de conocimiento capaz de señalarle a la ciencia sus puntos ciegos, sus errores de interpretación, sus exageraciones o sus faltantes sin que normalmente la ciencia entre en conflicto, salvo por prejuicios o modas infundadas, como los que vimos en el caso de Heaviside.

Lo cierto es que la interacción entre la ciencia, las matemáticas y la tecnología es mucho más rica y complicada de lo que nos ha hecho creer la tradición. El que la tecnología tenga un papel epistémico relevante en el desarrollo del conocimiento científico y matemático obliga a cuestionar aspectos metodológicos y epistemológicos de estos quehaceres. Aquí sólo marqué algunos aspectos dignos de consideración que creo se deben seguir profundizando en trabajos posteriores.

Bibliografía

- [Baird, 2004] Davis Baird. *Thing Knowledge: A Philosophy of Scientific Instruments*. University of California Press, Berkeley. 2004.
- [Bunge, 1966] Mario Bunge. Technology as Applied Science. *Technology and Culture*, Volume 7, No. 3, páginas 329-347, 1966.
- [Cooper, 1952] J. L. B. Cooper. Heaviside and the operational calculus. *The Mathematical Gazette*, Vol. 36, No. 315, páginas 5-19, 1952.
- [Crowe, 1985] Michael J. Crowe. *A history of vector analysis. The Evolution of the Idea of a Vectorial System*. University of Notre Dame. 1985
- [de Vries, 2005] Marc J. De Vries. *Teaching about technology: An Introduction to the Philosophy of Technology for Non-philosophers*. Springer, 2005
- [Dickinson, 1938] H. W. Dickinson, *A Short History of the Steam Engine*. Cambridge, 1938.
- [Graves, 1882] Robert Perceval Graves. *The Life of Sir William Rowan Hamilton*. Volume II. Dublin University Press Series, 1882.
- [Hills, 1959] Richard L. Hills. *Power from steam. A history of the Stationary Steam Engine*. Cambridge University Press, 1959.
- [Heaviside, 1892'] Oliver Heaviside. *Electrical Papers*, Volume I. Macmillan, 1892.
- [Heaviside, 1894] Oliver Heaviside. *Electrical Papers*, Volume II. Macmillan and co, 1894.
- [Heaviside, 1892] Oliver Heaviside. *Electromagnetic Theory*, Volume I. The Electrician, 1892.
- [Heaviside, 1899] Oliver Heaviside. *Electromagnetic Theory*, Volume II. The Electrician, 1899.
- [Heaviside, 1912] Oliver Heaviside. *Electromagnetic Theory*, Volume III. The Electrician, 1912.
- [Houkes, 2009] Wybo Houkes. The Nature of Technological Knowledge. *Philosophy of Technology and Engineering Sciences*, Volume 9. Elsevier B.V., páginas 309-350, 2009.

- [Mahon, 2009] Basil Mahon. *Oliver Heaviside Maverick mastermind of electricity*. The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [Nahin, 2002] Paul J. Nahin. *Oliver Heaviside, The Life, Work, and Times of an Electrical Genius of the Victorian Age*. The Johns Hopkins University Press, 2002.
- [Petrova, 1987] Svetlana S. Petrova. Heaviside and the Development of the Symbolic Calculus. *Archive for History of Exact Sciences*, Vol. 37, No. 1, páginas 1-23, 1987.
- [Pitt, 2000] Joseph C. Pitt. *Thinking about technology: Foundations of the Philosophy of Technology*. Seven Bridges Press, 2000.
- [Pitt, 2011] Joseph C. Pitt. *Doing Philosophy of Technology. Essays in a Pragmatist Spirit*. Springer, 2011.
- [Quallenber, 2012] Ian Quallenberg. La diferencia entre tecnología y ciencia. *Iberoforum*, año VII, No. 14, Dossier. 2012.
- [Radder, 2009] Hans Radder. Science, Technology and the Science-Technology Relationship. *Philosophy of Technology and Engineering Sciences*, Volume 9, Elsevier B.V., páginas 65-92, 2009.
- [Yavetz, 1995] Ido Yavetz. *From Obscurity to Enigma, The Work of Oliver Heaviside, 1872-1889*. Birkhäuser, 1995.