

El rol de la historia de las ciencias en la enseñanza del Cálculo Vectorial en carreras de Ingeniería

Viviana Angélica Costa, Marcelo Arlego

Fecha de recepción: 23/02/2012

Fecha de aceptación: 4/04/2013

Resumen	<p>En este trabajo presentamos una posible estrategia didáctica para la enseñanza del Cálculo Vectorial en carreras de Ingeniería. La misma aborda una perspectiva histórica, contextualizando los conceptos matemáticos con el conjunto de fenómenos físicos que motivaron su origen. Para ello, exponemos una reseña de los orígenes del Cálculo Vectorial durante los siglos XVIII y XIX. Se consideran reflexiones de investigadores enfatizando la importancia de incorporar aspectos epistemológicos e historiográficos, en la enseñanza de las ciencias.</p> <p>Palabras clave: cálculo vectorial, ingeniería, epistemología.</p>
Abstract	<p>In this work we present a possible didactic strategy for teaching vector calculus in engineering careers. It addresses a historical perspective, contextualizing mathematical concepts with physical phenomena that led to its origin. To this end, we present an overview of the origin of vector calculus during the eighteenth and nineteenth centuries. We consider reflections of researchers emphasizing the importance of incorporating epistemological and historiographical aspects in science education.</p> <p>Keywords: vector calculus, engineering, epistemological.</p>
Resumo	<p>Neste trabalho apresentamos uma possível estratégia didática para o ensino de cálculo vetorial em carreiras de engenharia. Ele aborda uma perspectiva histórica, contextualizando os conceitos matemáticos com fenômenos físicos que levaram à sua origem. Para este fim, apresentamos uma visão geral da origem do cálculo vetorial, durante os séculos XVIII e XIX. Finalmente, consideramos as reflexões de pesquisadores, enfatizando a importância de incorporar aspectos epistemológicos e historiográficos em educação científica.</p> <p>Palavras-chave: cálculo vetorial, engenharia, epistemológicos.</p>

1. El rol de la historia de la ciencia en la enseñanza de las ciencias

Algunos investigadores dan cuenta de la importancia de incorporar discusiones epistemológicas e historiográficas de las *ciencias* en la *enseñanza de las ciencias*. En general consideran que ésta inclusión en los procesos de enseñanza puede contribuir a desarrollar en los estudiantes un pensamiento crítico y ser un estímulo para la reflexión. Otros, como Thomas Khun (1959, 1977) y Martin Klein (1972), presentan objeciones, manifiestan lo contrario y argumentan sus posturas.

A continuación se destacan algunos de los argumentos a favor de una perspectiva histórica en la *enseñanza de las ciencias*. Martínez – Sierra (2008), afirma que:

“... un análisis histórico-epistemológico tiene por objetivo entender su naturaleza, su significado y sentido al determinar las causas que posibilitaron su aparición, de identificar las diferentes etapas de su construcción en el ámbito científico, así como las condiciones de sus transformaciones sucesivas hasta llegar en el aula como objeto de enseñanza...”

Además, se pregunta, sobre los procesos de construcción de conocimiento: ¿Cómo y por qué surge históricamente un conocimiento? ¿Cómo se vincula con los saberes ya existentes? ¿Cómo se integra en una estructura más amplia para a su vez propiciar nuevos descubrimientos?

Según Lombardi (1997),

“en la actualidad existe un consenso casi unánime entre los investigadores en educación acerca de la relevancia de la perspectiva histórica en la formación científica”.....“introducir la dimensión histórica en la enseñanza de las ciencias puede contribuir a desarrollar en los estudiantes el pensamiento crítico...la historia de la ciencia pasa a ser para el alumno un poderoso estímulo para la reflexión”.

Gil Pérez (*et al*, 1993), por su parte, exponen varias razones para afirmar el importante papel de la historia en el proceso de formación del matemático y sobre la utilización de la historia en la *educación matemática*. Expresan que la historia debería ser un potente auxiliar en la enseñanza de la matemática, para lograr objetivos tales como:

- hacer patente la forma peculiar de aparecer las ideas en matemáticas,
- enmarcar temporalmente y espacialmente las grandes ideas, problemas, junto con su motivación, precedentes,
- señalar los problemas abiertos de cada época, su evolución, la situación en la que se encuentran actualmente,
- apuntar las conexiones históricas de la matemática con otras ciencias, en cuya interacción han surgido tradicionalmente gran cantidad de ideas importantes.

Además exponen:

“Desde el punto de vista del conocimiento más profundo de la propia matemática la historia nos proporciona un cuadro en el que los elementos aparecen en su verdadera perspectiva, lo que redundaría en un gran enriquecimiento tanto para el matemático técnico, como para el que enseña...” “La historia se puede y se debe utilizar, por ejemplo, para entender y hacer comprender una idea difícil del modo más adecuado [...]. Los diferentes métodos del pensamiento matemático, tales como la inducción, el pensamiento algebraico, la geometría analítica, el cálculo infinitesimal, la topología, la probabilidad, han surgido en circunstancias históricas muy interesantes y muy peculiares, frecuentemente en la mente de pensadores muy singulares, cuyos méritos, no ya por justicia, sino por ejemplaridad, es muy útil resaltar”.

Según Matthews (1994) la introducción de tópicos correspondientes a la *historia de la ciencia* en la enseñanza de las disciplinas científicas puede favorecer el desarrollo de habilidades de razonamiento y de pensamiento crítico, así como contribuir a una mejor comprensión de los conceptos científicos. Además defiende

la enseñanza de la Historia y Filosofía de las Ciencias, como asignatura en Carreras de Profesorados de Ciencias y Carreras de Ciencias. Argumenta para ello que la *historia de la ciencia* mejora la *enseñanza de las ciencias* porque:

- motiva e interesa a los alumnos;
- humaniza los contenidos;
- proporciona una mejor comprensión de los conceptos científicos mostrando su desarrollo y perfeccionamiento;
- tiene un valor intrínseco la comprensión de ciertos episodios cruciales en la historia de la ciencia: revolución científica, darwinismo, etc;
- demuestra que la ciencia es mutable y cambiante y que, en consecuencia, el conocimiento científico actual es susceptible de ser transformado;
- combate la ideología científicista;
- permite un conocimiento más rico del método científico y muestra las pautas del cambio de la metodología aceptada.

Por otro lado, la no incorporación de la *historia de la ciencia* en la *enseñanza de las ciencias*, vinculada generalmente al desconocimiento y a la imagen ingenua que transmiten algunos profesores de ciencia a sus alumnos, produce las llamadas visiones deformadas de la ciencia que se registran en alumnos y en docentes. Entre varias de las visiones deformadas, Fernández (*et al.*, 2002) describe, entre otras, la que proporciona *una concepción aproblemática y ahistórica de la ciencia*. Se transmiten conocimientos ya elaborados, sin mostrar cuáles fueron los problemas que generaron su construcción, cuál ha sido su evolución, las dificultades, etc., ni mucho menos aún, las limitaciones del conocimiento científico actual o las perspectivas abiertas. Se pierde así de vista que, como afirma Bachelard (1938), *“todo conocimiento es la respuesta a una cuestión, a un problema”*, lo que dificulta captar la racionalidad del proceso científico.

En particular, en la enseñanza de la matemática para alumnos de carreras de ingeniería, Christiane Dujet¹, directora del programa internacional Matemáticas para los ingenieros (INSA de Lyon), expresa en la conferencia pronunciada en México y Monterrey en mayo de 2005, la necesidad de integrar la epistemología y/o la historia de las matemáticas en la enseñanza de la matemática para los ingenieros y científicos. Expone:

“el punto de vista epistemológico e histórico le permite al alumno percibir de antemano las dificultades que precedieron (a menudo durante un siglo o más) la elaboración de los conceptos, algunos de los cuales han llegado a ser considerados casi como evidencias hoy día (funciones, límites, series, etc.) y aprender mejor las sutilezas que contienen. El estudiante puede asimismo relativizar sus propias dificultades y desmitificar a las matemáticas”.

En suma, el uso de la historia de la ciencia debería mostrar que el conocimiento actual es el resultado de un largo proceso, en donde la interrelación teoría - empírica es constante y sobre el cual los factores filosóficos, culturales, sociales e incluso estéticos, tienen un peso importante. Sin embargo, es relevante

¹ <http://www.m2real.org/spip.php?article2&lang=fr>

aclarar que el uso de la historia de ciencia como recurso didáctico para estructurar la presentación de un tema complejo, tanto en libros de texto como en clase, no debería derivar en simplificaciones extremas que distorsionen el sentido de la historia de la ciencia, y de la propia ciencia, en la enseñanza (Matthews, 1994), (Lombardi, 1997).

2. El Cálculo Vectorial en el contexto de la Ingeniería

Durante finales del siglo XVIII y el XIX se dan las llamadas Primera y Segunda Revolución Industrial, las revoluciones sociales e intelectuales asociadas a ellas y la creación de las primeras escuelas técnicas, dando esto surgimiento a la Ingeniería².

La Ingeniería actual se enfrenta a nuevos desafíos, relacionados con temas claves, como son: la sostenibilidad, la salud, la reducción de la vulnerabilidad y la calidad de vida (National Academy of Engineering, NAE³). Hay un acuerdo unánime en afirmar que para ello es necesario el soporte y avance de la investigación científica y, particularmente, de la inventiva, la creatividad, y la investigación y desarrollo tecnológico propios de la Ingeniería. Algunos de esos retos, son: conseguir que la energía solar sea accesible, suministrar energía a partir de la fusión nuclear, desarrollar métodos de secuestro del carbono, gestionar el ciclo del nitrógeno, suministrar acceso al agua potable, y otros⁴. Se señala que los ingenieros han marcado los avances de la civilización a lo largo de toda la historia, y que su presencia e influencia se ha acrecentado a partir de la Revolución Industrial, que supuso la sustitución del trabajo humano por el de las máquinas en incontables facetas. Por otro lado, en las últimas décadas se han generado avances procedentes de la ingeniería (automóviles, aviones, radio, televisión, naves espaciales, láseres, ordenadores, entre otros) que han mejorado cada aspecto de la vida humana.

En relación a la educación en carreras de ingeniería, en el Congreso Mundial de Ingeniería⁵, realizado en el año 2010 en la ciudad de Buenos Aires, se redactó un informe final, en el que se destaca que:

“la sociedad mundial atraviesa un momento histórico, de profundos cambios en todos los aspectos del quehacer social, político, económico, científico, tecnológico y ambiental y que la ingeniería tiene la obligación no sólo de acompañar, sino de liderar los cambios necesarios que aseguren el desarrollo sostenible de todas y cada una de las regiones del mundo. Para ello se requiere de un ingeniero provisto de sólidos conocimientos y competencias técnicas y tecnológicas, sino que además debe estar provisto de una sólida cultura general, conocer en primer lugar las características y necesidades de su región, y estar asimismo dotado de una cosmovisión sistémica que le permita aplicar sus conocimientos en el lugar del mundo en que se los requiera”.

² Ingeniería² es la profesión en la que el conocimiento de las ciencias matemáticas y naturales adquiridas mediante el estudio, la experiencia y la práctica, se emplea con buen juicio a fin de desarrollar modos en que se puedan utilizar, de manera óptima los materiales y las fuerzas de la naturaleza en beneficio de la humanidad, en el contexto de restricciones éticas, físicas, económicas, ambientales, humanas, políticas, legales y culturales. Sus inicios, como campo de conocimiento, están ligados al comienzo de la *revolución industrial* (Consejo Federal de Decanos de Ingeniería de la República Argentina).

³ <http://www.nae.edu/nae/naehome.nsf>

⁴ <http://www.engineeringchallenges.org/>

⁵ <http://ingenieria2010.com.ar/es.html>

En carreras de Ingeniería el Cálculo Vectorial es una de las asignaturas básicas del área matemática. Es una rama de la matemática referida al análisis real multivariable de vectores en dos o más dimensiones. El dominio de los conceptos que involucra es esencial para alumnos de estas carreras. Será importante para su correcta aplicación en la resolución de problemas de su especialidad, establecer leyes y reglas, que expliquen el comportamiento de los cuerpos sometidos a la interacción de diversas fuerzas. Además, para abordar los conceptos del Área de física como son Electromagnetismo Clásico, Mecánica de los Fluidos, Aerodinámica, Mecánica de Sólidos, Transferencia de Calor, Mecánica del Medio Continuo, Campos y Ondas, entre otras.

Uno de los conceptos fundamentales del cálculo vectorial, es el de concepto de *campo vectorial*. Un *campo vectorial* (o función vectorial) es una función que asocia un vector a cada punto de su dominio. Por ejemplo “...para analizar las características de vuelo de un avión, los ingenieros realizan pruebas en el túnel de viento, las cuales proporcionan información vital acerca del flujo de aire sobre las alas y alrededor del fuselaje de la nave. Para modelar tal situación es necesario describir la velocidad del aire en varios puntos del túnel, utilizando para esto una función que es un campo vectorial” (Marsden et al, 2005).

Además, el estudio de las *variaciones de un campo vectorial* y de un campo escalar, calculadas al aplicar el operador nabla ∇ mediante el producto punto o producto cruz a campos escalares f o vectoriales F , obteniendo magnitudes vectoriales o escalares (*gradiente* ($\nabla \cdot f$), *rotor* ($\nabla \times F$), *divergencia* ($\nabla \cdot F$) y *laplaciano* ($\nabla \cdot (\nabla \cdot f)$) son importante para describir el comportamiento cualitativo de diversos fenómenos físicos. También, existen dos propiedades matemáticas importantes de los *campos vectoriales* que pueden utilizarse para describir fenómenos y leyes de la física. Estas propiedades son el “*flujo*” y la “*circulación*” (Feynman, 1987).



Figura 1: Fenómenos físicos descritos matemáticamente por campos vectoriales

En este marco, es importante que el profesor busque e implemente diversas estrategias didácticas en el proceso de enseñanza y aprendizaje del *Cálculo Vectorial*, que ayuden al estudiante en la comprensión de los conceptos. Una de las posibles estrategias, es la de contextualizar sus contenidos con la historia que dio origen a los mismos. Como menciona Matthews (1994), introducir tópicos correspondientes a la historia de la ciencia en la enseñanza de las disciplinas científicas podría favorecer el desarrollo de habilidades de razonamiento y de pensamiento crítico, así como contribuir a una mejor comprensión de los conceptos científicos.

Nos preguntamos entonces: ¿Cómo surgió el concepto de *campo vectorial*? ¿Cuáles fueron los inicios del *Cálculo Vectorial*? ¿Cuáles son los conceptos que subyacen a esta rama de la matemática? ¿Qué importancia tuvieron esos conceptos en el desarrollo de las ciencias físicas y matemáticas? ¿Cuáles eran los problemas sociales, o tecnológicos, que dieron origen al descubrimiento de estos conceptos? ¿Quiénes fueron sus actores? ¿Qué los motivó a dar con sus hallazgos?

3. Las instituciones y avances científicos en Francia e Inglaterra durante finales del siglo XVIII y el siglo XIX

Durante los siglos XVIII y XIX, los filósofos naturales de Francia y Gran Bretaña fueron los más destacados del mundo científico. Pero, para finales de ese último siglo, Alemania superó a Inglaterra y a Francia, por lo que a la ciencia se refiere (Mason, 1986). Por esa época se vio que los problemas técnicos de la sociedad podían ser resueltos por la ciencia, de ahí que se crean varias instituciones y escuelas técnicas, cuyos profesores eran destacados científicos, entre ellos Laplace y Lagrange. Además de la creación de escuelas técnicas, bajo Napoleón, se crearon también escuelas militares (médicas y técnicas), volviéndose la ciencia francesa más práctica y experimental (ibid).

Los científicos franceses en esa época desarrollaban su actividad de acuerdo a las necesidades e intereses prácticos de la sociedad. El primer problema que plantearon los revolucionarios a los científicos fue el de la normalización de los pesos y medidas en todo el país. Para ello la Academia de Ciencias, convoca a una asamblea en favor del Sistema Métrico Internacional, "*Discours à l'Assemblée nationale, au nom de l'Académie des Sciences (12 juin 1790)*". Esto mostraba la gran importancia de la Academia en la época, su intervención en la vida política y como intentaba resolver los problemas que se planteaban en la sociedad y su puesta en práctica (ibid).

La revolución francesa y las guerras napoleónicas trajeron turbulencia en la actividad científica. Esto promovió en Inglaterra el surgimiento de ésta actividad. En la década de 1850 se reformaban las universidades de Cambridge y Oxford, para dar también lugar al surgimiento de nuevas universidades. Se crea el primer laboratorio químico para la enseñanza, por obra de Thomas Thomson, y William Thomson (primer barón Kelvin). Este último funda el primer laboratorio para la enseñanza de la física en Glasgow. Es Kelvin quien dio forma a la *moderna estructura de la enseñanza de la ciencia*, introduciendo el trabajo experimental como parte integrante de la formación del científico.

William Thomson (1824-1907). Físico y matemático británico. Se destacó por sus importantes trabajos en el campo de la *termodinámica*. Es uno de los científicos que más hizo por llevar la física a su forma moderna. Famoso por haber desarrollado la escala de temperatura Kelvin. Recibió el título de barón Kelvin en honor a los logros alcanzados a lo largo de su carrera.

La matemática que se enseñaba en Gran Bretaña durante los primeros años del siglo XIX no iba mucho más allá del nivel que se podía encontrar en la época de Newton. Continuaban utilizando su notación en el cálculo, un tanto engorrosa, desestimando el simbolismo más elegante introducido por Leibniz. Se inicia

entonces un movimiento tendiente a remediar tal situación con el objeto de introducir en Inglaterra las matemáticas continentales.

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 - 1716). Filósofo, matemático, jurista, bibliotecario y político alemán. Fue uno de los grandes pensadores del siglo XVII y XVIII. Realizó profundas e importantes contribuciones en las áreas de metafísica, epistemología, lógica, filosofía de la religión, así como a la matemática, física, geología, jurisprudencia e historia. Su mayor contribución a la matemática consistió en la de enumerar en 1675 los principios fundamentales del *cálculo infinitesimal*. Esta contribución fue independientemente del método de Newton. Empleó por primera vez el cálculo integral para encontrar el área bajo la curva de una función $y=f(x)$. Introdujo varias notaciones usadas en la actualidad, como por ejemplo, el signo “*integra*” \int , y la letra “*d*” para referirse a los “*diferenciales*”. También creó el sistema binario. Junto con René Descartes y Baruch Spinoza, es uno de los tres grandes racionalistas del siglo XVII. Su filosofía se enlaza también con la tradición escolástica y anticipa la lógica moderna y la filosofía analítica. Leibniz hizo asimismo contribuciones a la tecnología y anticipó nociones que aparecieron mucho más tarde en biología, medicina, geología, teoría de la probabilidad, psicología, ingeniería y ciencias de la información.

La Asociación Británica para el desarrollo de la ciencia, creada en 1831, ante los avances industriales que prometían y suministraban las aplicaciones más importantes a la sociedad, es que destinó durante su primer siglo de existencia los mayores montos, a las ciencias físicas. Así, la máquina de vapor dio lugar al nacimiento de la *termodinámica*, y a su vez la ciencia de la electricidad produjo gran parte del equipo de la industria eléctrica (Mason, 1986).

4. El desarrollo de la electricidad y el magnetismo

Las investigaciones en las áreas de *electricidad* y *magnetismo* se desarrollaron rápidamente durante finales del siglo XVIII y XIX a raíz de diversos descubrimientos como el telescopio, el microscopio, el choque eléctrico y la identificación del rayo con la descarga eléctrica.

Benjamín Franklin (1706-1790) en 1749, demostró la naturaleza eléctrica de los rayos. Desarrolló la teoría donde la electricidad es un fluido que existe en la materia y su flujo se debe al exceso o defecto del mismo en ella.

En 1766, el químico Joseph Priestley (1733-1804) prueba que la fuerza que se ejerce entre las cargas eléctricas varía inversamente proporcional a la distancia que las separan y demuestra que la carga eléctrica se distribuye uniformemente en la superficie de una esfera hueca, y que en el interior de la misma, no hay un campo eléctrico, ni una fuerza eléctrica. Newton había mostrado que si la fuerza gravitatoria disminuía con el cuadrado de la distancia a su fuente, una capa esférica de materia no ejercería ninguna tracción gravitatoria sobre los cuerpos de su interior, de donde concluía Priestley que, por analogía, también la fuerza eléctrica ejercía una *ley del inverso del cuadrado*⁶.

En 1776, Charles Agustín de Coulomb (1736-1806) inventó la balanza de torsión, con la que midió de forma cuantitativa la fuerza entre las cargas eléctricas y corroboró que dicha fuerza era proporcional al producto de las cargas

⁶ La ley del inverso del cuadrado refiere a algunos fenómenos físicos cuya intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia al centro (o fuente) donde se originan.

individuales e inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia que las separa, conocida como *ley de Coulomb*⁷.

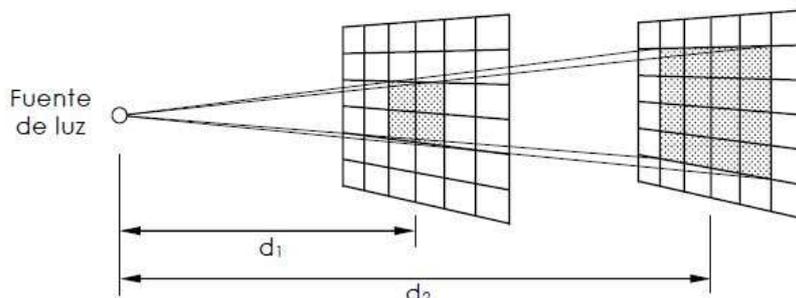


Figura 2: Ley del inverso del cuadrado

Al menos, a los físicos franceses les parecía que estos descubrimientos mostraban que las fuerzas eléctricas y magnéticas eran de la misma especie que la gravedad, operando a distancia a través del espacio vacío y obedeciendo la *ley del inverso del cuadrado*.

A principios del siglo XIX, se realizaron varios descubrimientos. En 1800, Alejandro Volta (1745-1827) construye la primera celda electrostática y la batería capaz de producir corriente eléctrica. Desde 1801 a 1815, sir Humphry Davy (1778-1829) desarrolla la electroquímica, explorando el uso de la pila de Volta o batería, y tratando de entender cómo ésta funciona. Durante el año 1807, conoce al joven Michael Faraday al cual toma como asistente.

En 1831, Michael Faraday (1791-1867) da un paso fundamental en el desarrollo de la electricidad al establecer que el magnetismo produce electricidad a través del movimiento. En el caso de la inducción electromagnética, sugería que la cantidad de electricidad inducida en un conductor dependía del número de *líneas de fuerza* magnética que cruzaba, mientras que la *fuerza electromotriz generada era proporcional a la tasa en que dichas líneas eran cortadas*.

Michael Faraday (1791 - 1867). Físico y químico británico, investigó en las áreas del *electromagnetismo* y la *electroquímica*. Fue discípulo del químico Humphry Davy, y ha sido conocido principalmente por su descubrimiento de la inducción electromagnética, que ha permitido la construcción de generadores y motores eléctricos, y de las leyes de la electrólisis, por lo que es considerado como el verdadero fundador del electromagnetismo y de la electroquímica. En 1831 trazó el campo magnético alrededor de un conductor por el que circula una corriente eléctrica (ya descubierto por Oersted), y ese mismo año descubrió la inducción electromagnética, demostró la inducción de una corriente eléctrica por otra, e introdujo el *concepto de líneas de fuerza*, para representar los *campos magnéticos*. Durante este mismo período, investigó sobre la electrólisis y descubrió las dos leyes fundamentales que llevan su nombre.

Faraday fue el primer científico en usar la noción de *líneas de fuerza* para representar geoméricamente la disposición de las *fuerzas eléctricas y magnéticas* en el espacio. En 1845, durante el transcurso de sus investigaciones sobre el efecto magneto-óptico, llamó por primera vez *campo* a la región del espacio que

⁷ La ley de Coulomb es válida sólo en condiciones estacionarias, es decir, cuando no hay movimiento de las cargas o como aproximación cuando el movimiento se realiza a velocidades bajas y en trayectorias rectilíneas uniformes. Es por ello que es llamada fuerza electrostática. En términos matemáticos, la magnitud F de la fuerza que cada una de las dos cargas puntuales q_1 y q_2 ejerce sobre la otra separadas por una distancia d se expresa como: $F = k * |q_1 * q_2| / d^2$.

hay entre los polos magnéticos, la cual está llena de líneas de fuerza. Faraday entendió el *campo* como un espacio lleno de líneas de fuerzas eléctricas o magnéticas. Así, alrededor de 1850 el *concepto de campo* estaba bien establecido en la física británica, pero faltaba una explicación de su constitución física.

Maxwell señaló en “*On Faraday’s Lines of Force*” (1855-56), que las líneas de fuerza del espacio que rodea a un imán (las curvas magnéticas de Faraday) dan cuenta de la dirección de la fuerza del campo, pero no de su intensidad en cualquier punto. Para resolver esta cuestión, Maxwell elaboró un modelo geométrico del campo en el que imaginaba un fluido incompresible moviéndose por tubos formados por líneas de fuerza; de otra forma, consideró que las curvas magnéticas no eran líneas simples, sino tubos muy finos de sección variable que transportaban un fluido incompresible. De este modo, *la dirección y la intensidad de la fuerza quedaban respectivamente representadas en cualquier punto del campo por la dirección e intensidad del fluido imaginario* (Berkson, 1974). No obstante, también subrayó que semejante modelo geométrico no podía considerarse como una representación física verdadera del campo, puesto que el fluido incompresible ni siquiera era hipotético; tan sólo se trataba de presentar las ideas matemáticas de una forma más tangible. Maxwell trató de poner en forma cuantitativa y matemática las explicaciones en gran medida cualitativas que Faraday había sugerido para los fenómenos eléctricos y magnéticos (Mason, 1986).

James Clerk Maxwell (1831 – 1879). Físico escocés conocido principalmente por haber desarrollado la *teoría electromagnética clásica*, sintetizando todas las anteriores observaciones, experimentos y leyes sobre electricidad, magnetismo y aun sobre óptica, en una teoría consistente. Las ecuaciones de Maxwell demostraron que la electricidad, el magnetismo y la luz, son manifestaciones del mismo fenómeno: el *campo electromagnético*. Desde ese momento, todas las otras leyes y ecuaciones clásicas de estas disciplinas se convirtieron en casos simplificados de las *ecuaciones de Maxwell*⁸. Su trabajo sobre electromagnetismo ha sido llamado la “segunda gran unificación en física”, después de la primera llevada a cabo por Newton. Fue una de las mentes matemáticas más preclaras de su tiempo, y muchos físicos lo consideran el científico del siglo XIX que más influencia tuvo sobre la física del siglo XX.

Cabe mencionar que el empleo de *analogías físicas*, en las que una forma matemática común permitía relacionar fenómenos físicos dispares, también contribuyó a resaltar la unificación de estos fenómenos, lo que resultó de gran importancia para el avance de la física del siglo XIX.

Maxwell introdujo una analogía *hidrodinámica*, en la cual la carga eléctrica positiva se consideraba como una *fuentes* o *manantial* que vierte continuamente una cantidad de fluido que depende de su intensidad. En contraposición, la carga eléctrica negativa era como un *sumidero*, que absorbe todo el fluido de las proximidades de manera proporcional a su intensidad; de acuerdo con lo que indicaba Faraday (Acevedo, 2004).

La idea de *campo* en física no nace, en contra de lo que pudiera parecer, de un desarrollo tecnológico o de la necesidad de explicar un conjunto de fenómenos, sino de una metafísica de la naturaleza (del conjunto de principios que rigen nuestra

⁸ Las ecuaciones de Maxwell son un conjunto de cuatro ecuaciones (originalmente 20 ecuaciones) que describen por completo los fenómenos electromagnéticos.

representación del mundo), elaborada por Descartes, modificada por Newton y Kant, que influyeron en Oersted y Faraday.

La importancia del *concepto de campo* es indiscutible, tanto desde un punto de vista científico como técnico. Para la física, su introducción supuso poner en duda y superar el marco teórico mecanicista. Como expresa García Doncel (1994):

“sin esta idea básica de campo, la evolución posterior de la física relativista y cuántica resulta inconcebible. El impacto que el descubrimiento de las ondas electromagnéticas ha tenido sobre la física es muy profundo. Ellas le han impuesto una segunda revolución conceptual”.

Durante los primeros 50 años del siglo XIX continuaron importantes aportes en las áreas detalladas. El matemático francés Siméon-Denis Poisson (1781-1849), en 1812, publicó su trabajo más importante relacionado con la aplicación matemática a la Electricidad y Magnetismo, describiendo las leyes de la electrostática. Danés Hans Christian Oersted (1777-1851), en 1819 descubre el electromagnetismo, cuando en un experimento para sus estudiantes, la aguja de la brújula colocada accidentalmente cerca de un cable energizado por una pila voltaica, se movió. En 1823, Andre-Marie Ampere (1775-1836) establece los principios de la electrodinámica, cuando llega a la conclusión de que la Fuerza Electromotriz es producto de dos efectos: la tensión eléctrica y la corriente eléctrica. En 1826, el físico alemán Georg Simon Ohm (1789-1854) formuló con exactitud la ley de las corrientes eléctricas, definiendo la relación exacta entre la tensión y la corriente (Ley de Ohm). En 1828, el matemático inglés George Green (1793- 1841) publicó el trabajo *“An Essay on the Application of Mathematical Analysis to the Theories of Electricity and Magnetism”* en el cual amplió el trabajo de Poisson obteniendo una solución general para el cálculo de los potenciales. También aparecieron en este ensayo las funciones de Green y aplicaciones importantes del teorema de Green. En 1828, el americano Joseph Henry (1799-1878) perfeccionó los electroimanes, observó que la polaridad cambiaba al cambiar la dirección del flujo de corriente, y desarrolló el concepto de inductancia propia. James Prescott Joule (1818-1889) físico inglés, descubrió la equivalencia entre el trabajo mecánico y la caloría, e inventó la soldadura eléctrica de arco y demostró que el calor generado por la corriente eléctrica era proporcional al cuadrado de la corriente. El científico alemán Hermann Ludwig Ferdinand Helmholtz (1821-1894), definió la primera ley de la termodinámica demostrando que los circuitos eléctricos cumplían con la ley de la conservación de la energía y que la electricidad era una forma de energía. En 1845, Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) físico alemán, anunció las leyes que permiten calcular las corrientes, y tensiones en redes eléctricas, conocidas como las *Leyes de Kirchhoff*, estableciendo las técnicas para el análisis espectral, con la cual determinó la composición del sol. En 1854, William Thomson, con su trabajo sobre el análisis teórico sobre transmisión por cable hizo posible el desarrollo del cable trasatlántico y en 1858 inventó el cable flexible.

5. De las aplicaciones físicas a las abstracciones matemáticas

Desde mediados del siglo XVIII, los desarrollos del *Cálculo* tuvieron estrecha relación con el *análisis matemático de los fenómenos físicos* y en particular con el movimiento en la *termodinámica*, la *hidrodinámica* y las investigaciones sobre la *luz*, la *electricidad* y el *magnetismo*, abordadas mediante la formulación de

ecuaciones diferenciales para describir los fenómenos y el desarrollo de los métodos necesarios para resolver estas ecuaciones (Mankiewicz, 2005).

Uno de los objetivos de los matemáticos del siglo XVIII era el de descubrir un principio general del que fuera deducible la mecánica de Newton. En la búsqueda de sus claves llegaron a observar un cierto número de hechos curiosos de física elemental, que sugirieron a Euler, que la naturaleza persigue sus diversos fines por los medios más económicos y eficientes, y que esa simplicidad oculta, subyace al aparente caso de los fenómenos. Fue esta idea metafísica la que le indujo a crear el cálculo de variaciones como técnica para la investigación de tales cuestiones. El sueño de Euler, fue hecho realidad casi un siglo después por Hamilton (Simmons, 1993).

Leonhard Euler (1707-1783). Matemático y físico. Nació en Basilea (Suiza) y murió en San Petersburgo (Rusia). Se lo considera el principal matemático del siglo XVIII y uno de los más grandes de todos los tiempos. Vivió en Rusia y Alemania la mayor parte de su vida y realizó importantes descubrimientos en áreas tan diversas como el cálculo o la teoría de grafos. También introdujo gran parte de la moderna terminología y notación matemática, particularmente para el área del análisis matemático, como por ejemplo la noción de función matemática. Asimismo se le conoce por sus trabajos en los campos de la mecánica, óptica y astronomía.

Durante la mitad del siglo XIX en los principales centros industriales del mundo, se inició un período en el desarrollo de las matemáticas, en los que la revolución industrial, asignan a las matemáticas una dilatada función social, situándola en un lugar central en el proceso formativo de los ingenieros en las escuelas técnicas superiores. Es en este siglo cuando comienza a desarrollarse la *física matemática*, área de contacto entre matemáticas y física. Esta disciplina constituía las principales áreas de aplicación de las matemáticas en las que se podía comprobar la potencia de la matemática superior en las diferentes ramas de la física. Además, la física fue ganando una estructura casi deductiva, similar a la que en épocas anteriores había sido exclusiva de la mecánica de Newton. Esta disciplina, creció de a poco, y a principios del siglo XX, aun existía una brecha importante entre la matemática y el nivel matemático presente en la formación de ingenieros. En pocos casos, la *física matemática*, llegó a ser directamente eficaz en la aplicación a la producción. Klein fue uno de los pioneros en remediar este problema, aplicando la matemática a la producción y fundando un laboratorio aerodinámico en Gotinga.

Los trabajos de Kelvin, Jacobi, Kirchoff, Planck, Lagrange, entre otros, a mediados y finales del siglo XIX, aportaron importantes fundamentos teóricos que permitieron un tratamiento matemático que describiera diversas situaciones físicas que eran de particular interés en la mecánica y tecnología. Por otro lado, en las ecuaciones diferenciales de la elasticidad formuladas por Navier y posteriormente también en el trabajo de Hamilton, se hallan los puntos de partida del futuro *cálculo vectorial y tensorial* (Wussing, 1998).

El *Cálculo Vectorial*, evoluciona a partir del desarrollo del *Algebra Vectorial*. El concepto de *vector* surge a partir del descubrimiento de los números complejos a través de los sistemas de números hipercomplejos creado por Hamilton (Crowe, 1994). El *algebra vectorial* define conceptos tales como vectores, su notación, operaciones básicas y propiedades de las operaciones entre vectores.

William Rowan Hamilton (1805 – 1865). Matemático, físico y astrónomo irlandés, que hizo importantes contribuciones al desarrollo de la óptica, la dinámica, y el álgebra. Su primera obra importante la produjo en óptica geométrica. Su descubrimiento del *cuaternión* junto con sus trabajos en dinámica y el *principio de Hamilton*, son los más conocidos. Este último trabajo fue después decisivo en el desarrollo de la *mecánica cuántica*, donde un concepto fundamental llamado *hamiltoniano* lleva su nombre.

El producto vectorial, surge de la invención de los cuaterniones, atribuido a Hamilton; siendo éstos, en primera instancia, el intento por dotar a los vectores en el espacio de tres dimensiones de estructura multiplicativa (Martínez et. al., 2008).

Las operaciones vectoriales se consideran por primera vez, explícitamente, aunque sin que se defina aún el concepto de vector, a propósito de la representación geométrica de los números complejos proporcionada por Wessel, Argand y Gauss, así como es también la base de los trabajos de Bellavitis, iniciados en 1832, los cuales le llevarán a su “Teoría de las equipolencias”, primera representación de conjunto de un cálculo de magnitudes dirigidas y orientadas (Gongora, 2009).

No obstante, la utilidad de los números complejos es limitada pues si varias fuerzas actúan sobre un cuerpo, estas no tienen por que estar en el mismo plano, por consiguiente se hace necesaria una versión tridimensional de los números complejos.

Wessel, Servois, Möebius lo intentaron. El propio Gauss intentó construir un álgebra de números de tres componentes, en la que la tercera componente represente un desplazamiento en una dirección perpendicular al plano $a+bi$. Así se llega a un álgebra no conmutativa, pero no era el álgebra requerida por los físicos. Además tuvo apenas influencia pues no se publicó.

Johann Carl Friedrich Gauss (1777 – 1855). Matemático, astrónomo y físico alemán que contribuyó significativamente en muchos campos, incluida la teoría de números, el análisis matemático, la geometría diferencial, la geodesia, el magnetismo y la óptica. Fue de los primeros en extender el concepto de divisibilidad a otros conjuntos. Riemann trabajó junto a Gauss y fue éste su director de tesis de doctorado. Según E.T Bell (1985), y opinión compartida por la mayoría de los historiadores de la ciencia, Gauss junto a Arquímedes y Newton ocuparían el podium de los grandes genios de las matemáticas a lo largo de la Historia

Los números complejos proporcionan un álgebra para representar los vectores y las operaciones con ellos, así, no es necesario realizar las operaciones geoméricamente pero es posible trabajar con ellos algebraicamente. Con esta teoría de parejas, Hamilton estaba preparado para descubrir y aceptar los números complejos de cuatro dimensiones sin necesidad de interpretaciones geométricas. La versión final de su trabajo la presento en sus *Lectures on Quaternions* (Lecturas sobre Cuaterniones, 1853). En ese mismo trabajo presenta el *operador nabla*, con el símbolo definido por la fórmula $\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}$ que se concibe actuando sobre escalares, vectores o cuaterniones considerados como funciones de las tres variables independientes x, y, z .

Si bien el inicio del algebra vectorial, del concepto de vector, de las operaciones entre vectores (producto escalar y vectorial) se inician con los cuaterniones, mas adelante se da un debate entre cuaterninistas (defensor fue

Tait) y vectorialistas, que defienden una u otra notación. Luego por diversas cuestiones se dejará de utilizar la notación que le dio inicio. La polémica se decidió finalmente del lado de los vectores.

Gibbs, primer doctor en ingeniería de USA (1839-1903), es quien da la notación actual del *Cálculo Vectorial*, al elaborar una *versión exclusivamente vectorial*, independientemente de los cuaterniones, desarrollada en un inicio para un curso que impartía a sus estudiantes. Es allí cuando se concibe el establecimiento del *cálculo vectorial* como disciplina autónoma.

Los teoremas relativos al cálculo vectorial, los llamados Teorema de Green⁹, Teorema de Gauss¹⁰ y Teorema de Stokes¹¹, vinculan el *cálculo diferencial vectorial* con el *cálculo integral vectorial*, y tienen aplicaciones físicas al estudio de *electricidad y magnetismo, hidrodinámica, conducción del calor* y en la *resolución de ecuaciones diferenciales* mediante el llamado *teoría del potencial*¹² (Marsden, 2004), (Simmons, 1993).

Además, el teorema de Gauss puede utilizarse en diferentes problemas de física gobernados por la ley del inverso del cuadrado, como la gravitación, la intensidad de la radiación. En particular para campos eléctricos se deduce la conocida *ley de Gauss* que constituye la primera de las *ecuaciones de Maxwell*.

Muchos de estos teoremas tuvieron su origen en la física. El Teorema de Green, descubierto cerca de 1828, surgió en relación con la *teoría del potencial*; y el teorema de Gauss surgió en relación con la *electrostática*. El teorema de Green tiene aplicación en la resolución de ecuaciones en derivadas parciales, en particular de las soluciones a la ecuación de Laplace.

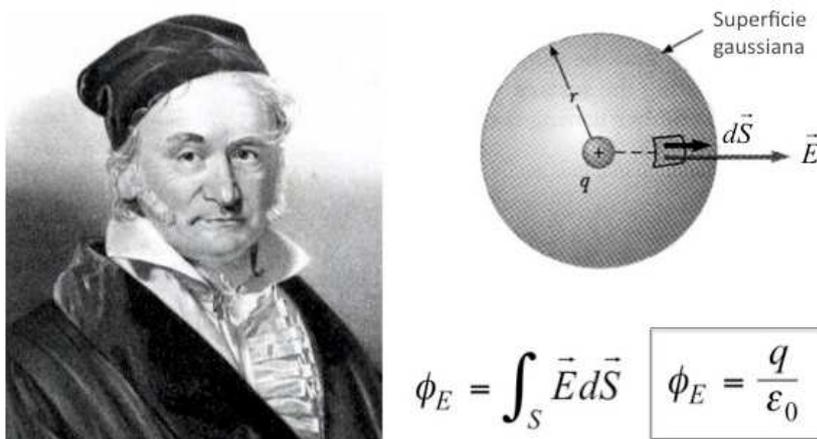


Figura 3: C. F. Gauss. Ley de Gauss

⁹ Relaciona una integral de línea alrededor de una curva cerrada simple C (*circulación*) y una integral doble sobre la región plana D limitada por C . Es un caso especial del más general teorema de Stokes

¹⁰ También llamado de Gauss-Ostrogradsky, enunciado por el matemático alemán Carl Friedrich Gauss en 1835, pero no fue publicado hasta 1867, relaciona el *flujo de un campo vectorial* a través de una superficie cerrada con la integral de su divergencia en el volumen delimitado por dicha superficie. Es un resultado importante en física, sobre todo en electrostática y en dinámica de fluidos.

¹¹ Establece que la integral de superficie del rotacional de un campo vectorial sobre una superficie abierta es igual a la integral cerrada del Campo vectorial a lo largo del contorno que limita la superficie

¹² La teoría del potencial es una rama de las matemáticas, que estudia la ecuación de Laplace $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$, sus soluciones y aplicaciones (por ejemplo en la teoría de la gravitación).

De los teoremas del Cálculo Vectorial, es posible la deducción de la ecuación en *mecánica de los fluidos*, de la ecuación de *conservación de la masa* y en *electromagnetismo* la ecuación de *conservación de la carga* (conocidas como ecuaciones de Euler). En particular, las ecuaciones que describen el movimiento de un fluido fueron deducidas por Leonhard Euler en 1775, en un artículo titulado, "*General Principles of the Motion of Fluids*".

A Euler se deben las ecuaciones de un cuerpo rígido y la formulación de varias ecuaciones básicas de la mecánica en términos de valores mínimos de funciones. Las ecuaciones de Euler para un fluido fueron finalmente modificadas por Navier y Stokes para incluir efectos de viscosidad; las ecuaciones resultantes de Navier-Stokes se describen virtualmente en casi todo libro de *mecánica de fluidos*.

George Gabriel Stokes (1819- 1903). Matemático y físico irlandés que realizó contribuciones importantes a la *dinámica de fluidos* (incluyendo las *ecuaciones de Navier-Stokes*), la óptica y la física matemática (incluyendo el *teorema de Stokes*). Fue secretario y luego presidente de la Royal Society de Inglaterra. Hijo menor del Reverendo Gabriel Stokes, rector de Skreen, en el condado de Sligo, en el seno de una familia protestante evangélica. Estudió en Skreen, Dublín y Bristol, se matriculó en 1837 en Pembroke College, en la Universidad de Cambridge, donde cuatro años más tarde, tras graduarse con los más altos honores (los de senior wrangler y el primer Premio Smith), fue elegido para ocupar una plaza de profesor, hasta el año 1857, cuando se ve obligado a renunciar por haber contraído matrimonio (ambas cosas eran incompatibles según los estatutos de su facultad universitaria). Sin embargo, doce años más tarde, tras haber sido modificados los estatutos, es reelegido. En 1849 le fue concedida la Cátedra Lucasiana de matemáticas de la Universidad de Cambridge. El 1 de junio de 1899 se celebró en Cambridge el jubileo de su nominación, en una ceremonia brillante a la que asistieron numerosos delegados de universidades europeas y americanas. Sir George Stokes, que fue nombrado baronet en 1889, también sirvió a su universidad representándola en el parlamento desde 1887 hasta 1892, como uno de los dos miembros de la Cambridge University Constituency. Durante parte de este período (1885-1890) fue presidente de la Royal Society, de la que había sido secretario desde 1854, y de esta manera, siendo a la vez Profesor Lucasiano, unió en sí mismo tres cargos que sólo en una ocasión habían estado en manos de un solo individuo, *Sir Isaac Newton*, quien, no obstante, no ocupó las tres simultáneamente. Stokes fue el mayor del trío de *filósofos naturales*, los otros dos fueron *James Clerk Maxwell* y *Lord Kelvin*, que contribuyeron especialmente a la fama de la escuela de Cambridge de física matemática a mediados del siglo XIX.

Los avances que se sucedieron en la ciencia para mediados del siglo XIX, fueron importantísimos, dieron lugar a nuevas teorías y avances en nuevas ramas en las ciencias. En el siglo XX, se refina el conocimiento adquirido y el desarrollo tecnológico, acelerado desde la aparición del método científico. En física, se desarrolló en el siglo XX la *teoría cuántica* y la *relatividad*. En matemática, encuentran su desarrollo ramas, como la *geometría algebraica*, la *topología* y la *geometría diferencial*, en particular las *formas diferenciales*, que proporcionan una manera elegante de generalizar los teoremas de Green, Gauss y Stokes, mostrando que éstos son manifestaciones de una sola teoría matemática subyacente y proporcionan el lenguaje necesario para generalizarlos a n dimensiones.

6. Comentarios finales

Durante los siglos XVIII y XIX se realizaron importantes avances en las ciencias, en particular en la física y la matemática, que surgieron en repuesta a las necesidades del momento. Las leyes, principios y teorías desarrolladas en esas áreas dieron origen a nuevas teorías. Las situaciones físicas que dieron lugar al origen del concepto de *campo vectorial*, los avances realizados en las áreas de *electricidad y magnetismo*, la *teoría del potencial*, los *cuaterniones*, el *principio de Hamilton* y la *Ecuación de Laplace*, ligados en un mismo *contexto*, contribuyeron al origen del *cálculo vectorial* que actualmente conocemos.

En carreras de ingeniería, las herramientas de las ciencias físicas y matemáticas son fundamentales. Ambas contribuirán en la formación de los alumnos. Una posible *estrategia didáctica* para la enseñanza del *Cálculo Vectorial* en estas carreras, dada la fuerte vinculación de esta rama de las matemáticas con los fenómenos físicos relativos al Electromagnetismo y a la Mecánica de los Fluidos entre otros, sería dar una perspectiva histórica a los conceptos involucrados, poner en contexto las herramientas matemáticas en relación con el conjunto de fenómenos que las rodearon y del conjunto de situaciones físicas que se combinaron de manera única para darle origen.

Como lo sostienen diversos investigadores, antes mencionados, este tipo de estrategia ayudaría a los estudiantes a desarrollar un pensamiento crítico, ser un estímulo para la reflexión, mejorar la comprensión de la naturaleza de la ciencia, el trabajo científico y los procedimientos metodológicos relacionados.

Bibliografía

- Acevedo Díaz, J. A. (2004). El papel de las analogías en la creatividad de los científicos: la teoría del campo electromagnético de Maxwell como caso paradigmático de la historia de las ciencias. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias*. Vol. 1. Nro. 3. p. 188-205.
- Bachelard, G. (1938). *La Formation de l'esprit scientifique*. Vrin. París.
- Bell, E. T. (1995). *Historia de las Matemáticas*. Fondo de Cultura económica. México DF.
- Fernandez, I., Gil, D., Carrascosa, J., Cachapuz, A. y Praia, J. (2002). Visiones deformadas de la ciencia transmitidas por la enseñanza. *Revista Enseñanza de las Ciencias*. Vol 20. Nro 3. pp 477 – 484.
- Feynman, R. (1987). *Física*, Vol II (Electromagnetismo y materia). Addison-Wesley Iberoamericana.
- García Doncel, M. (1994). Heinrich Hertz, *Investigación y Ciencia*. 208. pp. 72-79.
- Gil Pérez, D., Guzmán Ozámiz, M. (1993). *Enseñanza de las Ciencias y la Matemática-Tendencias e Innovaciones*. Organización de Estados Iberoamericanos. Para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Editorial Popular. Disponible en: Biblioteca Digital OEI, www.oei.es/oeivirt/ciencias.pdf.
- Góngora, A. (2009). Desarrollo histórico del álgebra vectorial. *Revista Unión*. Número 19. pp 63-76.
- Klein, M. J. (1972). Use and Abuse of Historical Teaching in Physics, en Brush S G y King A L. *History in the Teaching of Physics*. Hanover, University Press of New England.
- Klein, F. (2006). Lecciones sobre el desarrollo de la matemática en el siglo XIX. *Editorial Crítica*. p 768.
- Kuhn, T. S. (1959). *The Essential Tension: Tradition and Innovation in Scientific Research*. The Third University of Utah Research, Conference on the Identification of Scientific Talent. University of Utah Press. Salt Lake City. Reimpreso en *The Essential Tension*. pp 225-239. (University of Chicago Press: Chicago).

- Kuhn, T. S. (1977). Concepts of Cause in the Development of Physics, en The Essential Tension. pp 21-30. University of Chicago. Press: Chicago.
- Lombardi, O. (1997). La pertinencia de la Historia en la enseñanza de ciencias: argumentos y contraargumentos. Revista Enseñanza de las Ciencias. Vol 15. Nro 3. pp 342-349.
- Mankiewicz, R. (2005). Historia de las Matemáticas, del cálculo al caos. Editorial Paidós. Colección Orígenes, en rústica. p 141-147.
- Mason, S. (1986). Historia de las Ciencias. Vol 4. Alianza Editorial.
- Marsden, J., Tromba, A. J. (2004). Cálculo Vectorial. Editorial Pearson Educación. Edición Número 5. p 696.
- Martínez Sierra, G., Benoit Poirier, P. F. (2008). Una epistemología histórica del producto vectorial: Del cuaternión al análisis vectorial. Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol 2. Nro 2. pp 201-208. <http://www.journal.lapen.org.mx> .
- Matthews, M. R. (1994). Historia, Filosofía y Enseñanza de las Ciencias: La aproximación actual. Enseñanza de las Ciencias. Vol 12. Nro 2. pp 255-277.
- Simmons, G. F. (1993). Ecuaciones diferenciales, Con aplicaciones y notas históricas. Mc Graw-Hill. Segunda Edición. Impreso en España.
- Wussing, H. (1998). Lecciones de historia de las matemáticas. Siglo XXI de España Editores. pp 226-229. p 345.

Viviana Angélica Costa. Licenciada en Matemática (1989), Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Magister en Simulación Numérica y Control de la Universidad Nacional de Buenos Aires (2002). Profesor del Departamento de Ciencias Básicas de la Facultad de Ingeniería de la UNLP. Argentina .Coordinador de la Unidad de Investigación y Desarrollo IMApEC, Investigación en Metodologías Alternativas para la Enseñanza de las Ciencias <http://www.ing.unlp.edu.ar/fismat/imapec>. NIECyT. Núcleo de Investigación en Educación en Ciencia y Tecnología. <http://niecyt.exa.unicen.edu.ar/es/index.html> vacosta@ing.unlp.edu.ar

Marcelo Arlego. Doctor en Física UNLP. (2004). Post-doc: Braunschweig (Alemania) (2005-2007). Investigador del CONICET. Argentina. Temas de investigación: Física: Materia condensada, área de sistemas de electrones fuertemente correlacionados, en particular magnetismo cuántico en bajas dimensiones. Enseñanza de las ciencias: Temas de articulación matemática – ciencias. básicas en carreras de ingeniería. Enseñanza de conceptos de mecánica cuántica en escuela secundaria, mediante métodos no tradicionales. NIECyT - Núcleo de Investigación en Educación en Ciencia y Tecnología. <http://niecyt.exa.unicen.edu.ar/es/index.html> arlego@fisica.edu.ar