

Física e industria en Colombia

*Gabriel Poveda Ramos**

(Recibido el 27 de noviembre de 2002)

Resumen

Este artículo indica numerosos temas que son de importancia e interés en las industrias colombianas y cuyo tratamiento requiere conocimientos que son propios de los físicos. Por tanto propende a que en la preparación universitaria de estos profesionales se les den conocimientos y experiencias adecuados para actuar eficazmente en muchas áreas industriales donde pueden llegar a ser muy útiles; y a que los empresarios industriales entiendan la importancia de la ciencia física avanzada en la vida de sus empresas.

----- *Palabras clave:* física-educación, tecnología industrial, desarrollo e investigación, Colombia-industria.

Abstract

This paper points out several issues which are important and interesting in colombian industrial plants and whose treatment requires the knowledge of physicists. Therefore the paper emphasizes the necessity that university curricula in Physics include training and experiences which enable the students to participate in industrial activities. Thus, physicists may become very useful in industrial development. The paper also intends to explain to industrial managers the potential importance of Physics for the advancement of industry.

----- *Key words:* physics-education, industrial technology, research and development, Colombia-industry.

* Ingeniero químico. Ingeniero electricista. Doctor en Ingeniería. Profesor emérito. Escuela de Formación Avanzada. Universidad Pontificia Bolivariana. mgt@logos.upb.edu.co.

Introducción

En Colombia hay ya un buen número de escuelas universitarias que imparten enseñanza de la física como carrera profesional, en pregrado y de postgrado, con buenos niveles académicos. Pero los físicos que así se forman no reciben instrucciones ni experiencias en áreas de la vida del país en las cuales podrían llegar a ser sumamente útiles, como lo son en países avanzados donde los físicos trabajan activa y provechosamente en campos tan diversos e importantes como la hidrología, la metalurgia, la mecánica de materiales, la electrónica, la electroquímica, la geofísica y otros, que son altamente útiles en la industria, la minería, los transportes, las telecomunicaciones y más actividades importantes para la nación. De esa manera el país deja de aprovechar los saberes de una profesión que podría hacer avanzar notablemente esas actividades económicas y cuyo ejercicio podría dar lugar a desarrollos importantes del conocimiento científico de los físicos.

Física y técnica

Desde que el hombre paleolítico empezó a comprender y a dominar el mundo físico que lo rodeaba, comenzó también a servirse de sus nuevas herramientas y recursos para construir productos destinados a alimentarse, a guarecerse o transportarse. Cuando descubre el fuego, lo usa para preparar sus alimentos y para elaborar canoas. Cuando inventa la rueda, la usa para fabricar sus carros primitivos. Durante la revolución agrícola del período neolítico, sus inventos físicos y sus industrias se multiplican.

Aparecen el bronce y el hierro producidos en hornos recién inventados. Los hombres de las primeras civilizaciones aplican la vela a la propulsión de embarcaciones. Descubren la fuerza de los ríos y la usan para el transporte. Usan sus nuevas herramientas metálicas para excavar minas y construir caminos. Las industrias de las civilizaciones antiguas, que progresaron y supervivieron hasta la caída de Roma, implicaron un notable dominio del hombre sobre su me-

dio físico, basado en el conocimiento empírico. Transcurridos los mil años de la larga noche de la Edad Media, la humanidad vuelve a comprender que necesita conocer mejor su entorno material para progresar en la producción de los bienes que requiere para su supervivencia y su bienestar.

En el siglo XVIII comienza la revolución industrial. Ésta supuso una nueva capacidad inventiva mecánica y unas nuevas aptitudes para controlar y manejar las fuerzas de la naturaleza. Con toda razón, se señala el invento de la máquina de vapor de Newcomen como una de las marcas distintivas del comienzo de la revolución industrial. Así mismo, podría asociarse con este proceso la constitución de las sociedades científicas como la Académie de Sciences en Francia y la Royal Society en Inglaterra, que se constituyeron precisamente para hacer avanzar el conocimiento del mundo físico y el aprovechamiento de sus leyes. En el siglo XVIII aparecen los grandes físicos que desarrollan conocimientos que ya desde ese tiempo fueron importantes para mejorar los métodos productivos en distintas industrias. Los trabajos de Roberval, de los tres Bernoulli, de Euler, Clairaut, Poinsot, Chézy y D'Alembert atrajeron el interés de sus contemporáneos que se dedicaban a construir balanzas, navíos, máquinas o canales, por las posibles implicaciones de aquellos descubrimientos en la construcción de obras utilitarias. No fue pues ninguna coincidencia que el final del siglo XVIII y los comienzos del siglo XIX, cuando la revolución industrial inicia su carrera expansiva en Europa, coincidiera con los períodos de rapidísimo avance de la mecánica, la hidráulica, la teoría del calor, el estudio de los gases y la química.

El caso de la Ecole Polytechnique es especialmente interesante. La gran cantidad de ciencia que allí se forjó, en aquellos años, fue indudablemente la base de muchísimas aplicaciones que enriquecerían a continuación todas las actividades fabriles y constructoras a lo largo del siglo XIX. Es incalculable el aporte que industriales e ingenieros heredaron de los conocimientos debidos a Lagrange, Laplace, Poisson, Navier, Clapeyron,

Berthollet, Cauchy y Poncelet, que fueron profesores en la Ecole Polytechnique.

Cuando Colombia intentó establecer sus primeras industrias “a la moderna”, hacia 1830, lo hizo valiéndose de los rudimentarios conocimientos prácticos de unos pocos inmigrantes y unos pocos colombianos, prácticamente sin formación científica. Habría que esperar hasta 1848, cuando se fundó el Colegio Militar de Ingeniería, y hasta 1867, cuando se fundó la Universidad Nacional, para poder aclimatar en el país los estudios académicos de las ciencias físicas y de sus aplicaciones.

Sin embargo, en el siglo XIX se desarrollaron actividades industriales que desde su comienzo exigían conocimientos técnicos relativamente avanzados. Ese fue el caso de la minería de oro que utilizaba aplicaciones hidráulicas, mecánicas y químicas. Así ocurría también con los ferrocarriles, que empezaron entre 1870 y 1880, en los que ingenieros y prácticos se familiarizaron con el trabajo mecánico de materiales, la aplicación del calor, las bajas corrientes eléctricas y la hidráulica. En las ferrerías era indispensable recurrir a conocimientos físicos, aplicados en la teoría del calor, en metalurgia y en diseño de máquinas. Las primeras máquinas de vidrio y cerámica, de mediados y fines del siglo XIX, demandaban conocimientos de física para el diseño de hornos, para el manejo de materiales sólidos y para el control de la combustión. Lo mismo exigían las primeras fundiciones para hacer máquinas, que aparecieron a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. Terminando el siglo XIX, algunas ciudades comenzaron a conocer la iluminación eléctrica, que era un campo de aplicación de los nuevos conocimientos de la electricidad teórica y aplicada. Sus demandas de conocimiento físico explican que todas estas industrias constituyeran uno de los principales campos de trabajo para los ingenieros que se formaron en las primeras escuelas.

Es común decir que las fábricas de hoy son en muchos sentidos verdaderos talleres y gabinetes

de física aplicada. Pero es necesario precisar mejor el sentido de esta aseveración.

En efecto, el técnico industrial tiene que aplicar la ciencia de la mecánica de sólidos a muchas tareas: a diseñar y construir máquinas, a manejar y tratar materias primas sólidas, a calcular estructuras portantes, a analizar la cinemática de mecanismos, a diseñar y operar transmisiones de potencia y de movimiento, y a prevenir vibraciones, entre otras labores. Ejemplos de estos problemas se encuentran en la producción en todo tipo de fábricas, especialmente en las fundiciones y el mecanizado de metales, en los textiles, en las plantas químicas, en el procesamiento de minerales no metálicos, en los petróleos y su refinación, en la industria automotriz y en muchos más.

La teoría de la mecánica de fluidos es la herramienta básica en el mundo industrial para diseñar tuberías y conducciones, para calcular y operar bombas, para instalar controles hidráulicos, para establecer sistemas de ventilación forzada, para optimizar el transporte de fluidos y para diseñar grandes tanques y recipientes. Multitud de ejemplos de estas aplicaciones se encuentran en cervecerías, ingenios azucareros, plantas de gaseosas, licoreras, industrias químicas, refinería de petróleo o industrias de alimentos, por sólo hablar de unos tipos de fábrica.

Es bien sabido que el aristocrático y aventurero conde Rumford concibió su teoría cinética del calor al estudiar el mecanizado de cañones en las fábricas de armamento del reino de Baviera, ya terminando el siglo XVIII. Desde entonces hasta hoy —y así será siempre en el futuro— la teoría del calor y la termodinámica han estado estrechamente asociadas en su desarrollo conceptual y experimental con las aplicaciones industriales. Recuérdese para apoyarlo, cómo el trabajo pionero de Sadi Carnot se inspiró en el estudio de las máquinas de vapor y en su utilización práctica. Hoy en día se siguen requiriendo esos conocimientos en la industria para construir y operar hornos y crisoles, para economizar ener-

gía, para aprovechar y controlar la combustión en todas sus formas, para instalar sistemas de refrigeración, para diseñar reactores químicos, para montar equipos intercambiadores de calor, para utilizar instrumentos pirométricos, para regular el caldeo de hornos y equipos eléctricos, para establecer sistemas de enfriamiento fluido, para hacer pirometalurgia, y más recientemente, para entrar en el campo de la criogenia industrial. Abundan en particular esas aplicaciones de la física y el calor en las fábricas de cerámica, de cemento y de vidrio, en la siderúrgica, en los ingenios azucareros, en las plantas químicas de todo tipo, en las refinerías de petróleo, en las fundiciones, en las cervecerías y en las fábricas de alimentos de muchas clases.

La segunda revolución industrial

En 1835, el primer Ministro de Inglaterra, Lord Gladstone, visitaba el laboratorio de Faraday y conoció los primeros aparatos experimentales con que este gran físico demostraba su descubrimiento de la inducción electromagnética. Cuando Gladstone preguntó a Faraday para qué podían servir sus curiosidades, este último replicó: "Sir: algún día estos inventos generarán grandes cantidades de energía y cuantiosos impuestos a las arcas de Inglaterra". Esta respuesta muestra claramente cómo Faraday imaginaba los grandes desarrollos técnicos e industriales que se lograrían gracias a las aplicaciones prácticas del electromagnetismo. Efectivamente, a lo largo del siglo XIX, por la labor acumulada de varios físicos, inventores, electricistas y técnicos, se llegó a tener en el motor eléctrico una de las herramientas industriales más universalmente utilizadas, y cuando Edison, Westinghouse y Siemens industrializaron y comercializaron la energía eléctrica, en todas partes del mundo ésta se convirtió en el caballo de batalla de la producción industrial. Los circuitos de corriente alterna, los motores monofásicos y trifásicos, la electrólisis y la electroquímica, y la electrometría invadieron las fábricas de todo el mundo. En nuestro país, esa pequeña revolución electroindustrial se dio entre 1925 y 1935, y aún hoy en día sigue progresan-

do. Por eso, todas las industrias necesitan físicos muy competentes en la física de la electricidad, la electrónica y el electromagnetismo.

Después de la Segunda Guerra Mundial vinieron otras muchas nuevas innovaciones fabriles, basadas en la teoría de la electricidad y el magnetismo, y acompañadas de los nuevos desarrollos de su rama más reciente, la electrónica. Fue así como llegaron a las fábricas los instrumentos de medición y de control eléctricos y electrónicos, los equipos siderúrgicos electromagnéticos, el caldeo de metales por inducción, el caldeo dieléctrico y muchas aplicaciones del electromagnetismo. Más recientemente han llegado los microprocesadores, en infinidad de usos industriales, el calibrador electrónico de metales, la inspección metalúrgica por rayos X y la gammagrafía. El escenario de esta multitud de realizaciones han sido todas las fábricas y talleres del país, particularmente abundantes en plantas químicas, en refinerías de petróleo, en fábricas metalúrgicas, en plantas petroquímicas, en plantas siderúrgicas, en talleres de fundición, en fábricas de automotores y, obviamente, en las industrias eléctricas y electrónicas.

El conocimiento de la física de los sólidos es la base para las variadísimas aplicaciones industriales en que se trabaja con problemas de conducción de calor, de conductividad y resistencia eléctrica, en ensayos destructivos y no destructivos, en aplicaciones de la cristalografía, la metalurgia y la metalografía. Equipos de control y de laboratorio tan necesarios para el análisis industrial de sólidos como el microscopio metalográfico, los instrumentos piezométricos, la fotoelasticidad y el analizador térmico diferencial, son creaciones de la física de los últimos cincuenta años, que trabajan ya rutinariamente en la producción y en los laboratorios de fábricas de cementos, fábricas de cerámicas, fundiciones de metales, empresas siderúrgicas, trefilerías, grandes talleres metalmeccánicos y otras industrias.

Después de la Segunda Guerra Mundial los desarrollos de la física atómica y nuclear han dado lugar a aplicaciones industriales de enorme utili-

dad, que ya se usan corrientemente en la industria colombiana. Ése es el caso del espectrómetro de absorción atómica, del espectrómetro metalúrgico, de la espectrofotometría de luz visible, infrarroja y ultravioleta, de la resonancia magnética nuclear, de los isótopos trazadores radiactivos y de la radiación de neutrones térmicos. Estas herramientas sirven ya en Colombia en fábricas de alimentos, de bebidas, de equipos metálicos y de materiales plásticos, así como en agroindustrias, refinerías y plantas químicas.

Es pues un hecho bien probado que, aún en un país pobre y subdesarrollado, la industria en todas sus formas ya constituye uno de los campos de trabajo más amplio, más variados y más prometedores para la ciencia física. El hecho de que no haya mucha conciencia de la importancia de estas conexiones es atribuible a otros fenómenos más complejos que son de tipo económico y cultural. Pero como el autor es un admirador aceptablemente informado de la ciencia física, y un conocedor de la industria colombiana, le corresponde mostrar y hacer énfasis en el estrecho parentesco que hay entre las aplicaciones de la física, por un lado, y los problemas reales de la industria, por el otro.

Más aún, las necesidades y las posibilidades de la tecnología industrial están planteando numerosos problemas que atañen a los físicos, en los cuales se debería hacer investigación, no sólo de tipo aplicado sino también de carácter fundamental. Si en ello se trabajara con seriedad, habría no solamente la posibilidad de ayudar a resolver importantes problemas técnicos industriales, sino también de dar un aporte auténticamente colombiano, de importancia pequeña o grande, al conocimiento científico.

Tribología, elasticidad y calor

Hay que destacar por ejemplo, que más del 20% de la energía que gastan las fábricas en Colombia se disipa en forma de rozamiento y fricción. Pero pese a esto, los ingenieros de la industria se contentan con conocer en esta materia la clásica

ca y elemental forma de Amontons y Coulomb. Ésta es una situación típica donde los físicos deberían tomar la iniciativa. Son ellos quienes, mediante la investigación, pueden contribuir a ampliar el escaso conocimiento de la micromecánica del rozamiento, del rozamiento no lineal, de la hidromecánica de los lubricantes, de la tribología de materiales no convencionales, de las relaciones entre coeficiente de rozamiento, propiedades elásticas y propiedades microscópicas de la estructura de sólidos. En los últimos veinte años, el rozamiento y la tribología se han convertido en un amplio campo de investigación en países desarrollados, pero en Colombia no se ha dado ni un solo paso en este terreno, relativamente virgen y tan prometedor en resultados aprovechables y en conocimientos físico de gran interés.

Siempre se ha sabido que los metales sometidos a altas tensiones presentan un comportamiento plástico cuando ya no rige la ley de Hooke. Por estas circunstancias y por la enorme proliferación de los materiales plásticos en la industria, cada vez es más necesario que se emprendan trabajos de investigación sobre mecánica no lineal de materiales. Los altos polímeros, la sencilla madera, el cuero, las fibras artificiales y los minerales cerámicos están por conocerse en su comportamiento ante la tensión y la deformación, no sólo en Colombia sino también en países avanzados.

Con respecto a la conducción del calor en sólidos, los físicos y los ingenieros se contentan, aún hoy en día, con la ley lineal que Fourier descubrió en 1801. Poco caso se hace a que muchos materiales de la naturaleza no cumplen en rigor esa ley ni que, cuando la cumplen, son pocas las herramientas analíticas que se han podido deducir de la ecuación de Fourier que sean útiles en las aplicaciones industriales. Aun en los países industrializados se diseñan hornos, calderas, revestimientos refractarios y aislamientos de refrigeración, usando más que todo la experiencia tradicional, la intuición técnica y los modelos a escala. Mucho es lo que los físicos tienen que

hacer para mejorar el conocimiento de la conducción de calor en materiales orgánicos, en estructuras sólidas anisotrópicas, con altas temperaturas, en estado de intensa deformación, para formas geométricas complejas, con el uso de computadoras, con análisis dimensional, empleando elementos finitos y bajo muchas otras condiciones que la ley de Fourier no prevé pero que son de frecuente ocurrencia en la naturaleza y en la industria.

Los minerales granulados y pulverulentos constituyen una clase de materiales que son ampliamente utilizados en fábricas y talleres. Es el caso del maíz y el trigo, como granos en molinos, del cemento para hacer hormigón, de la arena y las arcillas en fábricas de vidrio y cerámica, de la harina de trigo y de maíz. Casi nada se sabe de las leyes que rigen la mecánica de estas masas pulverulentas o sólidas. En Colombia se ocupó un poco de este problema el gran ingeniero y matemático don Julio Garavito Armero. Pero aún desconocemos la "hidrostática" de estos materiales, su comportamiento viscoso, la dinámica de sus flujos, su compresibilidad, la fluodinámica de sus lodos, los efectos en sus propiedades del aire incorporado, de su conductividad térmica, de su deformabilidad, de los efectos de distintas granulometrías y de los efectos macroscópicos de la estructura y de la forma microscópica de las partículas.

El campo de la electroquímica y de la electrofísica es otro territorio rico en promesas de resultados para los físicos que se decidan a investigar en ellos. Multitud de problemas hay allí que esperan ser aclarados para beneficio de la ciencia y para resolver problemas industriales: la conductividad de soluciones (donde sólo por excepción vale la ley de Kohlrausch), la separación electroforética y electroosmótica de iones tóxicos, la conducción en grafito y en otros sólidos a alta temperatura, el coeficiente termorresistente de los óxidos metálicos, la electroluminiscencia, el efecto de campos eléctricos y magnéticos en el movimiento de partículas, el conocimiento detallado de los fenómenos piroeléctricos y piezoeléctricos, el

comportamiento magnético de materiales no convencionales, la estructura iónica y electromecánica de los silicatos complejos y de los altos polímeros.

En gracia a la brevedad, solamente se menciona esa área en donde es necesario y es posible que los físicos colombianos amplíen el conocimiento que se tiene de la naturaleza. La creencia común de que nada se puede hacer en investigación sustantiva dizque porque Colombia es un país subdesarrollado y pobre, es más bien el resultado de un escaso conocimiento objetivo y cercano de la realidad (cuando no se trata de un puro eslogan que riñe con la realidad). Precisamente, lo que la realidad pone de presente son muchos problemas relevantes e interesantes para la ciencia física y cuyo esclarecimiento puede contribuir a la solución de problemas nacionales importantes para la industria y para otras actividades. A pesar de la pobreza del país, ya hay en algunas universidades e institutos los recursos técnicos y experimentales que permitirían hacer una buena investigación física en diversos campos.

Las necesidades técnicas que se mencionan, así como las posibilidades de investigación existentes abren, teóricamente, amplias posibilidades para el trabajo de los físicos en fábricas y talleres. Ellos podrían ser, por ejemplo, quienes ayudan a diseñar y optimizar muchísimos procesos mecánicos, hidráulicos, térmicos y electromagnéticos. Podrían ocuparse también en la investigación experimental y en la caracterización rigurosa de toda clase de materiales, como productos, combustibles, metales y materias primas. Compete también a los físicos trabajar al lado de los ingenieros en el diseño de equipos y aparatos de alta tecnología, máxime cuando estos implican conocimientos profundos y diversos, como es tan frecuente en la industria moderna. Otra área de trabajo sería la monitoría y optimización de sistemas energéticos integrados, así como el planeamiento y el mejoramiento de sistemas de transporte de sólidos y de fluidos. El vasto mundo de los instrumentos electrónicos de medición y sus complejidades físicas se beneficiarían tam-

bién con el trabajo de los físicos, quienes deberían ayudar en la calibración y patronamiento de medidas e instrumentos y en el control y homologación de normas técnicas.

Lo que falta

Pero estas oportunidades teóricas casi no se dan como realidad práctica. Y hay tres razones principales para que así suceda. La primera es que los buenos ingenieros de las universidades colombianas reciben una formación bastante satisfactoria en las áreas de la física que más se aplican en la industria. La segunda está en la tradicional dependencia, todavía muy generalizada, de la tecnología industrial respecto de los manuales, las normas y los laboratorios del exterior. Pero la tercera atañe a los físicos. Porque, como profesionales de la física, pocos se han preocupado por conocer la industria del país, por identificar sus problemas y por señalar lo que allí podrían hacer. Esta situación es inconveniente para la industria, porque la priva de muchísimos mejoramientos que podría recibir del trabajo profesional de los físicos. Desde luego, también es inconveniente para éstos mismos, porque aún encuentran prácticamente cerrado un vasto campo de oportunidades para lo que podría ser una forma fructífera de ejercicio profesional. Pero a quien más perjudica este divorcio entre la física y la industria en el país, es a esa misma ciencia, porque mientras esta no se enfrente con los desafíos y realidades atinentes a los problemas tecnológicos y científicos que suscita por todas partes el mundo de la experiencia inmediata, es muy poco lo que avanzará la física en el país, tanto en el sentido experimental como en el sentido teórico. En cambio, si científicos competentes se enfrentan a tales problemas, tendrían muy buenas posibilidades no sólo de ayudar a resolverlos sino, más aún, de crear nuevos conocimientos que se puedan mostrar como un verdadero aporte nacional al desarrollo científico. Recuérdese que no hay problemas del mundo físico, por modestos que parezcan, que no puedan ser ocasión de avances trascendentales. La teoría cinética del calor de Rumford, las ecuaciones

de Maxwell del electromagnetismo y las teorías de Einstein sobre el movimiento browniano y sobre el efecto fotoeléctrico son ejemplos obvios y elocuentes de lo que se dice.

Mucho habría que hacer para modificar este estado de cosas. Por ejemplo, hay que concienciar a los directivos y técnicos industriales de la necesidad de recurrir a los físicos profesionales con mayor amplitud. Hay que organizar medios para identificar problemas generalizados en fábricas y talleres, y para llevarlos al conocimiento y a la investigación de los físicos. Pero mucho hay que hacer en las mismas universidades y en las escuelas que preparan a los físicos profesionales. Por ejemplo, debe intensificarse muchísimo más el trabajo experimental como parte del currículo. Es indispensable que los jóvenes graduados en esta profesión tengan hoy muy buena formación en computadoras. Deberían incluirse en el programa de la carrera varias materias, si se quiere opcionales, estrechamente relacionadas con la física y sumamente útiles en el mundo de lo real, como serían la hidráulica, la elasticidad, la resistencia avanzada de materiales, la electroquímica, la metalografía, la termotecnia, el análisis dimensional, la electrónica aplicada, la aerodinámica, la ciencia de los materiales, la teoría de vibraciones y el diseño de máquinas.

Es fascinante ocuparse de lo que ocurrió en el primer cuatrillonésimo de segundo del big bang, del tensor de gravitación en un hueco negro y de la densidad crítica para que la expansión del universo se invierta o continúe indefinidamente. Es de extraordinario interés profundizar en la cromodinámica cuántica, en las teorías del calibre y en la gran unificación de las tres fuerzas fundamentales del universo. Hay que conocer a fondo las propiedades del gravitino, del fotino, de los preones y de otras partículas ultrafundamentales. Pero hay que conocer también y detenerse a estudiar con profundidad y vigor los temas más mundanos de la biología, del medio ambiente y de la industria nacional. si se quiere llegar a hacer algo que pueda llamarse, con propiedad, verdadera física colombiana.

Conclusiones

- Los currículos de las escuelas universitarias de física deben ampliarse para incluir materias como hidráulica, meteorología, metalurgia, geofísica, aerodinámica, teoría de elasticidad, mecánica de materiales y otras de física aplicada que permitan el conocimiento más cercano del mundo y, especialmente, del mundo de la industria.
- Los estudiantes de esta profesión debieran pasar siquiera un semestre lectivo en un taller, fábrica, laboratorio industrial, central eléctrica, para exponerlos al desafío de problemas técnicos complejos donde puedan poner en juego sus conocimientos.
- Los ingenieros jefes de producción de las industrias deberían comunicarse permanentemente con las escuelas de física del país para consultar sus problemas de alta complejidad, para que sean estudiados por profesores y alumnos.
- Las escuelas de física debieran dar en sus currículos mucha mayor importancia al trabajo experimental de lo que hoy hacen.

Bibliografía

1. Alba Andrade, Fernando. *El Desarrollo de la tecnología. La Aportación de la física*. México. Fondo de Cultura Económica. 1995. p. 159.
2. Atherton, W. A. *From compass to computer*. San Francisco. San Francisco Press. 1984. p. 336.
3. Bernal, John D. *Ciencia e industria en el siglo XIX*. Barcelona. Ediciones Martínez Roca. 1969. p. 191.
4. Dugas, Rene. *A History of Mechanics*. New York. Dover Publications Inc. 1988. p. 662.
5. Gille, Bertrand. *Histoire de la Métallurgie*. Paris. Presses Universitaires de France. 1966. p. 126.
6. Jäger, Hans. *Physikalische Grundlagen der Moderne Industrietechnologie*. Berlin. Springer Verlag. 1988. p. 485.
7. Kranzberg, Melvin et al. *Historia de la tecnología. La técnica en occidente de la prehistoria a 1900*. Vol. 2. Barcelona. Editorial Gustavo Gili. 1981. p. 355.
8. Motz, Lloyd et al. *The story of physics*. New York. Avon Books. 1992. p. 412.
9. Petroski, Henry. *Invention by Design by Design*. London. Harvard University Press. 1996. p. 242.
10. Plum, Werner. *Ciencias naturales y técnica en el camino de la revolución industrial*. Bonn. Hildesheimer Druck-und Verlags-GmbH. 1975. p. 154.
11. Poveda Ramos, Gabriel. *Dos siglos de electroquímica, 1800-2000*. Medellín. Documento en computadora inédito. 2001. p. 200.
12. Rey Pastor, Julio. "La técnica en la historia de la humanidad". Buenos Aires. Editorial Atlántida. 1957. p. 326.
13. Varchmin, Jochim un Radkaw et al. *Kraft, Energie und Arbeit. Energie und Gesellschaft*. Hamburg. Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH. 1981. p. 325.