

La física y la formación de los ingenieros mexicanos que colaboraron en el magno proyecto hidroeléctrico de Necaxa

E.A. Martínez Miranda

Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México

M. de la Paz Ramos Lara

Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades de la UNAM

Recibido el 29 de septiembre de 2004; aceptado el 17 de diciembre de 2004

Los avances que experimentaron la electricidad y el magnetismo durante los siglos XVIII y XIX propiciaron una serie de aplicaciones que transformaron no sólo los sectores productivos, sino la vida del mundo entero. En particular, la generación de energía eléctrica hizo posible la construcción de las primeras plantas hidroeléctricas en el mundo a fines del siglo XIX. En México, el proyecto del complejo hidroeléctrico de Necaxa se convirtió en uno de los más importantes de América Latina en los primeros años del siglo XX. En este proyecto trabajaron tanto ingenieros extranjeros como mexicanos. Los extranjeros fueron contratados por la compañía canadiense encargada del proyecto, The Mexican Light and Power Company, Limited, la cual llegó a contratar ingenieros mexicanos, pero muy pocos y ocupando puestos técnicos secundarios. La mayoría de los ingenieros mexicanos trabajaron para el gobierno mexicano, en la Secretaría de Fomento, Colonización e Industria, como Ingenieros Inspectores encargados de evaluar los proyectos, supervisar las obras, garantizar la seguridad de la población y vigilar el estricto cumplimiento de los contratos-concesiones que otorgaba el Gobierno Federal para este tipo de obras. En este trabajo, se analiza la formación que en física llegaron a adquirir los ingenieros mexicanos que colaboraron en el proyecto, con ello se espera estimar la importancia que pudieron haber tenido los cursos de física que acreditaron los ingenieros durante sus estudios y el soporte que pudo haberles brindado en sus funciones de Ingenieros Inspectores.

Descriptor: Historia de la energía eléctrica; historia de la física.

The advances achieved in electricity and magnetism during the XVIII and XIX centuries, prompted a series of applications that transformed not only the productive sectors, but also the people's lives in the whole world. The generation of electric power, in particular, made possible the construction of the first hydroelectric plants in the world by the end of the XIX century. In Mexico, the project of the hydroelectric complex of Necaxa became one of the most important in Latin America during the first years of the XX century. This project comprised both foreign and Mexican engineers. The former were contracted by a Canadian company in charge of the project: The Mexican Light and Power Company, Limited, which also came to hire a small number of Mexican engineers, but assigning to them secondary technical positions. Most of the Mexican engineers worked for the Mexican government –in the Secretariat of Development, Colonization, and Industry of the Mexican Republic-, like inspector engineers in charge of evaluating projects, supervising works, guarantying security to the population, and watching the strict and entire fulfillment of all the concessions granted by the Federal Government for these kind of works. Herein, the education of the Mexican engineers that collaborated in the hydroelectric project of Necaxa will be analyzed, with the objective to assess the importance of Physics courses in their professional development and in the basis for their functions as inspector engineers.

Keywords: History of electric energy; history of physics.

PACS: 01.65.+g; 01.78.+p

1. Breve historia del electromagnetismo y sus primeros usos

Los estudios formales de magnetismo se inician con los trabajos del médico inglés William Gilbert de Colchester (1544-1603), quién realizó cuidadosos estudios de las interacciones magnéticas. Sus resultados los publicó en 1600 en un libro al que tituló *De Magnete magneticisque Corporibus et de magno Magnete Tellure (Sobre el imán y los cuerpos magnéticos, y sobre el gran imán que es la Tierra)*. En esta obra, Gilbert describe varios fenómenos y experimentos de electricidad (especialmente de estática) y magnetismo, e introduce por primera vez el término “electricidad”. El magnetismo fue el campo al que le dedicó mayor atención y encontró que las fuerzas eléctricas y magnéticas eran de carácter distinto, estas últimas producían en los objetos una orientación con dirección específica, mientras que los eléctricos no la presentaban [1].

Después de la publicación de los trabajos de Gilbert los estudios de electricidad y magnetismo no presentaron importantes progresos sino hasta al final del siglo XVIII [2]. El ingeniero francés Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806) para medir las fuerzas electromagnéticas muy débiles diseñó un dispositivo llamado “balanza de torsión”, con el cual descubrió la ley que lleva su nombre, la cual hace referencia a que las fuerzas de atracción y repulsión eléctricas son proporcionales al producto de las dos cargas y proporcional al inverso del cuadrado de la distancia que las separa. A diferencia de Franklin, Coulomb consideraba que las fuerzas eléctricas y magnéticas operaban a distancia como lo hacía la fuerza de la gravedad [3].

En 1820 el físico danés Hans Christian Oersted (1777-1851) afirmó que la electricidad y el magnetismo no son fenómenos separados, al descubrir que una aguja magnética en equilibrio sobre un pivote o colgada de un hilo se apartaba de su posición inicial cuando pasaba próxima a

ella una corriente eléctrica. Esta observación permitió medir la intensidad de una corriente eléctrica por medio del instrumento llamado “galvanómetro”. Así entonces, el *electromagnetismo*, según lo llamó Oersted, llegó a ser una realidad [1].

Los descubrimientos de Oersted se difundieron rápidamente, atrayendo la atención del físico francés André-Marie Ampère (1775-1836), quien tan sólo unas semanas después de dichos hallazgos, demostró experimentalmente que no sólo una corriente eléctrica actúa sobre una aguja magnética, sino que igualmente dos corrientes interactúan una con la otra, es decir, demostraba experimentalmente que al circular corrientes de igual sentido en dos alambres paralelos, éstos se atraían, y en el caso de que los sentidos fueran opuestos, se repelían [1].

En 1827, el físico alemán Georg Simon Ohm (1789-1854), publicó un artículo titulado “El circuito galvánico investigado matemáticamente” donde reportaba que la corriente eléctrica que pasa por un alambre (conectado a una pila de Volta) es proporcional al voltaje aplicado y proporcional al inverso de la resistencia del alambre. De esta manera, Ohm introdujo el concepto de resistencia eléctrica de los alambres, hallando que ésta depende del material del que están hechos, y que además, es proporcional a su longitud y proporcional al inverso de su sección transversal. La publicación de este artículo, sentó las bases para los estudios posteriores de los circuitos eléctricos [4].

Casi una década después de los hallazgos de Oersted, en 1831, el inglés Michael Faraday (1791-1867) descubrió la inducción electromagnética y representaba el efecto inverso al descubierto por Oersted, es decir, un fenómeno que relaciona en general los movimientos mecánicos y el magnetismo con la generación de corriente eléctrica. Con este importante descubrimiento, Faraday demostró cómo podía ser transformado el trabajo mecánico en electricidad, de hecho hizo un generador eléctrico que suministraba una corriente considerable, pero que a nadie le interesó. Finalmente Faraday descubrió el principio básico de la dinamo, al igual que Oersted había descubierto el principio del motor eléctrico. Ambas aportaciones tendrían importantes aplicaciones durante el siglo XIX [5].

El descubrimiento del efecto magnético de una corriente (electromagnetismo) hecho por Oersted en 1820, pronto se tradujo en la primera aplicación ampliamente difundida de la electricidad: la telegrafía. También la contribución de Faraday de la inducción electromagnética tuvo aplicaciones inmediatas como la del generador eléctrico (dínamo y alternador). Sin duda, la inducción electromagnética y el electromagnetismo constituyen principios fundamentales en los que se ha basado la tecnología. Así como el electromagnetismo proporciona el medio por el cual puede convertirse en trabajo mecánico la energía eléctrica, la inducción electromagnética proporciona el medio por el cual se puede convertir trabajo mecánico en energía eléctrica [6].

Entre 1840 y 1865 se desarrollaron varias máquinas basadas en el principio de Faraday, de esta manera, las máquinas constaban de una bobina de cable aislado que podía girar mecánicamente en el campo de un imán de acero per-

manente. No resultaban muy efectivas, dado que los mejores imanes de acero proporcionaban tan sólo un pequeño campo magnético; mas en 1866 el ingeniero alemán Werner Von Siemens (1816-1892) sustituyó el imán de acero por un poderoso electroimán (un imán accionado por electricidad) que recibía la energía de una parte de la electricidad producida por la propia máquina. Todos los generadores (dínamos) de electricidad siguientes se basaron en el modelo de Siemens, utilizando electroimanes alimentados por una parte de la corriente que producían y, al ser más eficientes que las primeras máquinas electromagnéticas, abrieron el camino a posteriores desarrollos en el campo de la ingeniería eléctrica. La dinamo definitiva la creó en 1872 el francés Zénobe-Théophile Gramme (1826-1901). En 1873, en la exposición de electricidad de Viena, una gran dinamo Gramme era movida por una máquina de vapor. La corriente eléctrica producida movía otra máquina Gramme que actuaba como motor, esto permitiría sustituir el motor de vapor por el motor eléctrico [4].

La industria eléctrica dependió de los avances en el desarrollo de la lámpara de filamento. Humphry Davy (1778-1829) había descubierto que la electricidad que pasa entre dos barras de carbono producía una luz brillante, y a partir de mediados de siglo se obtuvieron alumbrados intensos para uso de faros, teatros y demás mediante lámparas de arco de carbono que funcionaban inicialmente con máquinas electromagnéticas y luego con dínamos. Davy había hallado también que se producía una luz menos intensa cuando pasaba una corriente por un fino cable de platino, aunque éste pronto se quemaba en el aire. En 1879, Joseph Swan (1828-1914), en Inglaterra, y Thomas Alva Edison (1847-1931), en Estados Unidos, desarrollaron simultánea e independientemente una lámpara basada en este principio, consistente en un filamento de carbono encerrado en una ampolla de vidrio en la que se había hecho el vacío y que podía arder durante muchas horas. Edison hizo mayor uso del descubrimiento que Swan, desarrollando el equipo adicional requerido para la amplia adopción de la iluminación eléctrica. Esto sería un gran avance para la masificación del uso de la energía eléctrica [4].

En 1881 en la ciudad de Nueva York, Edison instaló una planta en la que se generaba electricidad y de allí se distribuía a diferentes partes de la ciudad. Los primeros sistemas de transmisión de Edison utilizaban corriente directa, lo que limitaba su transmisión para largas distancias. En mayo de 1885, el ingeniero y empresario George Westinghouse (1846-1914), que conocía el sistema que instaló Edison en Nueva York y del cual no era partidario, compró las patentes del sistema polifásico de generadores, transformadores y motores de corriente alterna de Nikola Tesla (1856-1943). Así en 1886, la Westinghouse Electric Company instaló el primer sistema de corriente alterna en Buffalo (Nueva York) y en poco tiempo se impuso a la corriente directa, debido a que la tensión de una corriente alterna puede aumentarse o disminuirse fácilmente con un transformador, presentando la ventaja de poder ser transmitida a lugares relativamente lejanos [7].

Para sus proyectos, Westinghouse contrató en 1884 al ingeniero electricista William Stanley (1858-1916), quien trabajó en el diseño de transformadores para lograr transmitir energía eléctrica a grandes distancias. En 1890, Stanley había fundado la Stanley Laboratory Company y la Stanley Electric Manufacturing Company en Pittsfield, Massachusetts, siendo esta última absorbida, más tarde, por la General Electric Company. Conviene para este trabajo mencionar que Frederick Stark Pearson (1861-1915), constructor de las obras hidroeléctricas de Necaxa, “mantuvo muy buenas relaciones con William Stanley, de la General Electric, ya que ambos habían trabajado juntos en el diseño de un transformador que permitiría el transporte de energía a grandes distancias” [8]. Con esto se podrá ver en secciones posteriores que la distancia de transmisión de la planta de Necaxa al mineral El Oro llegó a ser la más grande de su época, utilizando para ello transformadores de la marca General Electric Company, lo cual no era de extrañar pues Pearson conocía sobre el diseño y la funcionalidad de los mismos [9].

Gracias a los avances que experimentó el campo del electromagnetismo durante el siglo XIX fue posible inventar una serie de máquinas, aparatos, instrumentos y dispositivos que hicieron factible la producción de energía eléctrica en gran escala aprovechando los recursos hidráulicos de la naturaleza, y a través de la construcción de centrales hidroeléctricas. Por ejemplo, por medio de la turbina fue posible convertir en trabajo (en la forma de movimiento de rotación) la energía cinética presente en masas de agua, vapor o gas, y a través del generador eléctrico se pudo transformar el trabajo mecánico en energía eléctrica.

Las centrales hidroeléctricas aprovechan grandes cantidades de agua que se encuentran en ríos o lagos para producir electricidad. Algunas aprovechan el agua que fluye normalmente del cauce de un río, y otras, aprovechan el agua que les llega, convenientemente regulada, desde un lago o pantano. En una central hidroeléctrica se requiere conjugar el equipo técnico con las características geográficas de la zona para obtener un máximo aprovechamiento de los recursos naturales de la región para generar energía eléctrica, es por ello que las centrales se visualizan en términos de dos conjuntos: El primero de ellos está vinculado con el embalse, la presa y aliviaderos, las tomas y depósitos de carga, los canales, túneles y galerías, tuberías forzadas y chimeneas de equilibrio. El segundo considera las turbinas hidráulicas, los alternadores, los transformadores, los sistemas eléctricos de media, alta y muy alta tensión, el sistema eléctrico de baja tensión, el sistema eléctrico de corriente continua, los medios auxiliares y los cuadros de control [10].

Desde el siglo XIX, la potencia teórica en CV (caballos de vapor) del salto de agua para una hidroeléctrica se calculaba mediante la ecuación

$$P = \frac{1000QH}{75} \quad (CV), \quad (1)$$

Siendo Q el caudal o gasto en m^3/s , H la altura del salto bruto en metros, y 1000 la cantidad de litros de agua en un m^3 .

A su vez,

$$Q = Sv, \quad (2)$$

donde S es la sección en metros cuadrados (m^2) y v la velocidad del líquido en m/s a través de la sección considerada. El gasto Q es constante en toda conducción que no tenga derivaciones. En una tubería de sección variable, la velocidad del agua no es constante, sino que es mayor donde la sección es menor y menor donde la sección es mayor.

Si consideramos que

$$1CV = 75kgf \cdot m/s, \quad y \quad 1kW = 1,36CV,$$

la expresión de la potencia en kW es

$$P = \frac{1000QH}{1.36 * 75}. \quad (3)$$

Las Ecs. (1) y (2) fueron las que utilizó en 1895 el arquitecto italiano (después nacionalizado mexicano) Silvio Contri (1856-1933), quien sería la primera persona de quien se tiene noticia en hacer cálculos para estimar la cantidad de fuerza motriz que se podía obtener de los saltos del río de Necaxa [11]. En 1898 el ingeniero mexicano Gabriel M. Oropeza, empleó estas ecuaciones para el mismo propósito, es decir, para calcular la potencia teórica de los saltos del río de Necaxa [12].

2. Los inicios de las obras de la hidroeléctrica de Necaxa

La primera concesión que otorgó el gobierno mexicano a una persona para explotar las caídas de agua del río de Necaxa fue el 21 de junio de 1895 al médico francés Arnoldo Vaquié, quien se asociaría con el Arq. Silvio Contri y el ingeniero francés Víctor Fournier para realizar las obras en la cuenca de Necaxa. Pero como ninguno contaba con los recursos económicos suficientes no se concretaron las obras proyectadas. Después de que Contri dejó de ser su socio, Vaquié decidió formar una sociedad en París, la Société du Necaxa (Mexique), la cual quedó constituida el 17 de mayo de 1898, con un capital de 400 000 francos [13].

En el contrato de concesión quedaron establecidas las obligaciones tanto del concesionario como del gobierno mexicano. En el artículo 11 quedó asentado que la Secretaría de Fomento nombraría un *Ingeniero Inspector* para supervisar las obras, y aunque trabajara para esta Secretaría, su salario sería cubierto por la Société du Necaxa (Mexique) [14]. El primer Ingeniero Inspector que nombró la Secretaría de Fomento fue el ingeniero Adolfo Díaz Rugama.

Al paso de los años se hizo evidente que la Société du Necaxa (Mexique) no tenía la capacidad económica ni el personal técnico adecuado ni la visión necesaria como para desarrollar una hidroeléctrica en una zona geográfica tan compleja como lo era Necaxa, cuyas alturas de los saltos eran tan grandes que seducía a los empresarios. Después de varios intentos por construir un camino, un túnel, el trazo de

un ferrocarril y construir algunas casas para los trabajadores [15], la compañía francesa decidió traspasar la concesión el 7 de marzo de 1903 a *The Mexican Light and Power Company, Limited*, fundada en Toronto, Canadá unos meses antes (el 10 de septiembre de 1902) [16]. El capital con el que inició la compañía fue de 12 millones de dólares dividido en 120 mil acciones de 100 dólares cada una, y su objetivo era la generación, la distribución y la venta de energía eléctrica en la Ciudad de México y en otras ciudades de la zona centro del país [17].

El principal interesado por construir un complejo hidroeléctrico en Necaxa fue el eminente ingeniero norteamericano Frederick Stark Pearson (1861-1915), quien, desde 1900, había obtenido información sobre los recursos naturales de la zona de Necaxa, gracias a su amigo, el licenciado mexicano Luis Riba y Cervantes [18]. Para 1903, Pearson había adquirido reconocimiento mundial por sus trabajos de ingeniería realizados principalmente en Estados Unidos, Canadá y Brasil, sus empresas estuvieron dirigidas hacia la explotación de la industria eléctrica, de los transportes (ferroviaria y de tranvías), de las comunicaciones (especialmente en teléfonos), del gas, de la minería, de la química, de las maderas y de la agricultura [19].

Una vez adquirida la concesión el 24 de marzo de 1903, *The Mexican Light and Power Company, Limited*, procedió a comprar las pequeñas compañías que suministraban de energía eléctrica a la Ciudad de México y sus alrededores, como la Compañía Mexicana de Gas y Luz Eléctrica (*The Mexican Gas and Electric Light Company, Limited*), la Compañía Mexicana de Electricidad, S. A., y la Compañía Exploradora de las Fuerzas Hidroeléctricas de San Ildefonso, S.A. A diferencia de la *Société du Necaxa (Mexique)*, esta compañía canadiense inició rápidamente las obras y para finales de 1905 ya se encontraba generando energía eléctrica para la Ciudad de México [20]. El nombramiento de ingeniero inspector para recibir las obras hidroeléctricas de Necaxa, fue asignado en 1906 al ingeniero Rafael Ramos Arizpe, quien supervisó las obras y emitió un dictamen favorable, terminó por afirmar que la compañía estaba en condiciones de producir 15 000 HP como según se había estipulado en el artículo tercero de la concesión, un año después estaría en condiciones de producir el doble [21].

En 1906, en la planta hidroeléctrica de Necaxa se habían instalado seis generadores de 5 000 kW cada uno, con esto destacaba como una de las plantas hidroeléctricas más importantes del continente americano [15]. Sin embargo, no todo eran buenas noticias, ya que la compañía no estuvo a salvo de accidentes, como el ocurrido el 20 de mayo de 1909 donde se derrumbó una parte del talud interior de la Presa de Necaxa, produciéndose la inundación de algunos pueblos y la muerte de varias personas [22].

Del mismo modo, factores externos a la compañía empezaron a frenar sus actividades, la primera de ellas fue el inicio de la Revolución Mexicana que produjo cuantiosas pérdidas económicas y una gran incertidumbre en los inversionistas extranjeros. La segunda fue la inesperada muerte de Pearson

en 1915, al ser hundido por los alemanes el barco *Lusitania* en el que viajaba. Esta terrible pérdida causó conmoción en México y en otras partes del mundo [19].

Una vez terminada la guerra interna de México, la compañía *The Mexican Light and Power Company, Limited*, se recuperó y continuó con su objetivo de expansión por diversas partes del territorio mexicano. Para mediados del siglo XX suministraba el 55 % de toda la energía generada en el país, contaba con una producción anual de 1 200 000 $kW \cdot h$, y prestaba servicio a 357,000 suscriptores en la capital y en seis estados del país: en Puebla, en la Ciudad de México, en Tlaxcala, en Michoacán, en el Estado de México, en Hidalgo y en Morelos [23]. La planta hidroeléctrica de Necaxa (que pertenecía a Puebla) destacaba como una de las hidroeléctricas más grande de la nación [17].

Entre los ingenieros que se llevaron el crédito de las obras de Necaxa, destacan (según opinión del ingeniero Gabriel M. Oropesa): Walter Diem (ingeniero residente), Hugh L. Cooper y Albert Carr (superintendentes de la construcción), F. S. Hyde (ingeniero electricista), James D. Schuyler (ingeniero consultor en los asuntos hidráulicos) y Frederick Stark Pearson, quien estuvo a cargo de la parte eléctrica [24].

3. Formación en física de los Ingenieros Inspectores

Sin lugar a dudas, para poder desempeñar las funciones como Ingenieros Inspectores de las obras hidroeléctricas de Necaxa, los ingenieros mexicanos tuvieron que tener sólidos conocimientos de física, especialmente en mecánica, hidráulica y electromagnetismo. La mayor parte de los ingenieros mexicanos que participaron en las obras de Necaxa lo hicieron como Ingenieros Inspectores, o simplemente como ingenieros contratados para revisar planos, rehacer cálculos, o bien como ingenieros contratados por la compañía (como el caso de Federico Trigueros Glennie). La mayoría de estos ingenieros fueron egresados de la Escuela Nacional de Ingenieros (la más importante del país durante el siglo XIX) y en menor medida de la Escuela Nacional de Agricultura.

Para fines del siglo XIX y principios del siglo XX, la Escuela Nacional de Ingenieros ofrecía siete profesiones: Ingeniero de Minas y Metalurgista, Ensayador y Apartador de Metales, Ingeniero Topógrafo e Hidrógrafo, Ingeniero Geógrafo, Ingeniero Industrial (o mecánico), Ingeniero Civil e Ingeniero Electricista. La carrera de ingeniero electricista era la que más cursos de electricidad tenía incluidos en su plan de estudios (los ingenieros industriales también tenían que acreditar cursos de electricidad) y estaba estructurada para dos años [25]:

En el primer año (de 1891) se veían temas como: potencial eléctrico, capacidad eléctrica, condensadores, aparatos de medida electro-estática, máquinas eléctricas, pila eléctrica, corrientes eléctricas, termo-electricidad, magnetismo, magnetismo terrestre, electro-magnetismo, acciones electro-magnéticas, imantación por las corrientes, inducción,

galvanómetro, determinación del ohm, máquinas de corriente constante, máquinas de corrientes continuas, máquinas de corrientes alternativas, alumbrado eléctrico, galvanoplastia, telegrafía eléctrica, electricidad atmosférica, líneas eléctricas, conductores, canalizaciones eléctricas, telegrafía y telefonía, teoría de la transmisión de señales, aplicaciones de la electricidad a la ingeniería civil, etcétera [25].

En el segundo año se estudiaba alumbrado eléctrico, transporte eléctrico de la fuerza, tracción eléctrica, electro-metalurgia y aplicaciones industriales diversas. Además de los cursos de electricidad tenían que acreditar los de matemáticas, de mecánica analítica y aplicada, y algunas veces estudiaban temas de termodinámica y óptica. Los libros que utilizaron para impartir los cursos fueron *Leçons sur l'électricité* de Eric Gerard, y *Electricité Industrielle* de D. Monier [25].

Desafortunadamente fueron muy pocos los estudiantes que se inscribieron a la carrera de Ingeniero Electricista, y lo mismo sucedió con la de Ingeniero Mecánico, menos aún fueron los alumnos que se llegaron a graduar. Durante el siglo XIX sólo se graduaron tres ingenieros electricistas y representaron el 1 % del total de graduados de la Escuela en el periodo de 1858 a 1899; de los ingenieros industriales sólo se graduó uno, a diferencia de otras profesiones donde se graduaban cientos de alumnos, como era el caso de los ingenieros topógrafos e hidrógrafos. Algún motivo existía para que los estudiantes no eligieran estas carreras, algunos ingenieros de la época consideraban que no tenían donde ejercer su profesión [26]. Este hecho se reflejó totalmente en las formaciones que poseían los ingenieros que inspeccionaron las obras de la hidroeléctrica de Necaxa, ninguno de ellos tenía la profesión de Ingeniero Electricista, sólo uno llegó a terminar sus estudios de telegrafía como segunda carrera.

La mayor parte de los ingenieros que colaboraron en las obras fueron egresados de la Escuela Nacional de Ingenieros y procedían de diversas profesiones, como: Ingeniero Topógrafo e Hidrógrafo; Ingeniero Geógrafo; Ingeniero de Caminos, Puertos y Canales (o civil); e Ingeniero de Minas. Ninguna de estas profesiones tenía como curso obligatorio el de electricidad, algunas veces solo se les pedía que acreditaran cierto número de conferencias. Algunas profesiones veían el tema en un curso que se llamaba física matemática [25].

A excepción de la carrera de ingeniero topógrafo e hidrógrafo y de ensayador y apartador, todas las demás tenían la obligación de aprobar, al menos un curso de mecánica analítica, donde veían los principios fundamentales de la cinemática, la estática y la dinámica, y aplicaciones en hidráulica y diversos tipos de máquinas (como las de vapor). No en todas las profesiones era obligatorio el curso de física matemática, pero los que lo llevaban veían temas relacionados con la termodinámica, la acústica, la óptica, la física molecular y en algunas ocasiones se llegaban a ver temas de electricidad y magnetismo con aplicaciones [25].

En este punto del trabajo nos preguntamos ¿qué cursos de física acreditaron los ingenieros mexicanos que inspeccionaron las obras hidroeléctricas de Necaxa? Desafortunada-

mente no pudimos encontrar datos curriculares de todos los ingenieros que trabajaron en el proyecto, sin embargo logramos deducir esta información gracias a los planes de estudio que manejaba la Escuela Nacional de Ingenieros en esa época. Muy pocos fueron los ingenieros de quienes no pudimos obtener información alguna.

La compañía The Mexican Light and Power Company, Limited, contrató en 1903, desde que inició la construcción de las obras, al Ingeniero Topógrafo e Hidrógrafo mexicano Federico Trigueros Glennie (1872-1933), egresado de la Escuela de Ingenieros en 1902. Inicialmente Trigueros Glennie se incorporó a los trabajos que desarrollaba la compañía en el río Monte Alto (en Cuautitlán) y después se trasladó a Necaxa para trabajar en la construcción de las obras. En este lugar se desempeñó como ayudante de los ingenieros residentes Fritz Walti y Walter Diem. Salvo por cinco años que se separó de la compañía para atender problemas personales, trabajó hasta el año de su jubilación, en 1932, muriendo un año después [28].

La mayor parte de los ingenieros mexicanos que tuvieron alguna relación con la planta de Necaxa se desempeñaron como Ingenieros Inspectores, y trabajaban para la Secretaría de Fomento, Colonización e Industria de la República Mexicana. Algunos de ellos fueron: Adolfo Díaz Rugama en 1895-1897 y 1898-1902, Agustín del Río en 1904, Rafael Ramos Arizpe en 1906 y 1907, Leopoldo Villarreal en 1904 y 1909, Gabriel M. Oropesa en 1916 y 1917, y Carlos S. Chávez Solano en 1921. Otros nombres que localizamos firmando y autorizando planos en representación de la Secretaría de Fomento fueron: Lauro Pradas, Eduardo Martínez Baca, Andrés Aldasoro, Guillermo Beltrán y Puga, J. Guardiola, Javier Díaz Lombardo y Manuel R. Vera [29]. De Pradas y Guardiola no sabemos si eran ingenieros. En el Tabla I se encuentran los datos curriculares que encontramos de algunos de ellos.

El único Ingeniero Inspector que realizó una especialización en el extranjero en temas de electricidad, aunque más vinculados con la telegrafía, fue Rafael Ramos Arizpe, quien acompañado de Alberto Best y de Manuel Icaza ingresaron en 1888 a la Escuela Superior de Telegrafía (Escuela Superior de Electricidad) de París [39], los demás, quizá se interesaron por los temas de electricidad y magnetismo fuera de los planes de estudio programados.

La información que podemos extraer de la Tabla I es la siguiente:

1. La mayor parte de los ingenieros mexicanos que colaboraron en las obras de Necaxa estudiaron en México y fueron egresados de la Escuela Nacional de Ingenieros principalmente
2. La principal profesión que poseían era de Ingeniero Topógrafo e Hidrógrafo, Ingeniero de Caminos, Puertos y Canales (Ingeniero Civil) e Ingeniero de Minas.
3. La mayor parte de los ingenieros llevaron al menos un curso de mecánica durante sus estudios y muy pocos acreditaron el curso de física matemática
4. Muy pocos llevaron cursos de electricidad

TABLA I. Cursos acreditados por los Ingenieros Inspectores

NOMBRE	PROFESION	ESCUELA	CURSOS ACREDITADOS
Federico Trigueros Glennie	Ing. Topógrafo e Hidrógrafo	ENI (1902)	Trigonometría esférica, en la Escuela Nacional Preparatoria. Algebra superior, cálculo infinitesimal, dibujo lineal, 1ro y 2do año de ordenes clásicos, 1er año de copia de monumentos, cálculo y álgebra superior, <i>mecánica racional y mecánica racional aplicada</i> , en la Escuela Nacional de Bellas Artes. Geometría analítica, topografía y legislación de tierras y aguas, planos acotados, hidrografía y meteorología, hidromensura, astronomía práctica, economía política, 1ro y 2do año de dibujo topográfico, en la ENI [30].
Adolfo Díaz Rugama	Ing. Topógrafo e Hidrógrafo	ENI (1887)	Topografía e hidromensura, <i>física matemática</i> , cálculo de las probabilidades, teoría de los errores, hidrografía y meteorología, <i>mecánica analítica</i> , elementos de mecánica celeste, astronomía física, geodesia y astronomía practica y 1° y 2° año de dibujo topográfico [31].
Rafael Ramos Arizpe	Ing. Topógrafo e Hidrógrafo y telegrafista	ENI (1885)	<i>Telegrafía</i> en la ENI. Al término de sus estudios de ingeniería en México ingresó en la Escuela Superior de Telegrafía de París para especializarse en ese campo [32].
Gabriel M. Oropesa	Ing. de Caminos, Puertos y Canales	ENI (1895)	Topografía e hidromensura, geometría descriptiva, 1er año de dibujo topográfico, 1er año de dibujo arquitectónico, 2do año de dibujo arquitectónico, 1er año de dibujo de máquinas, <i>mecánica analítica y aplicada</i> , estereotomía y carpintería, meteorología e hidrografía, conocimiento de materiales de construcción, teoría mecánica de las construcciones, estática gráfica, caminos comunes y ferrocarriles, dibujo de composición, puentes, canales y obras en los puertos y economía política [33].
Carlos S. Chávez Solano	Ing. Civil	ENI (1905)	Matemáticas superiores y trigonometría esférica, topografía y legislación de tierras y aguas, geometría descriptiva, 1er año de dibujo topográfico, 2do año de dibujo topográfico, hidráulica y sus aplicaciones, 1er año de dibujo arquitectónico, 2do año de dibujo arquitectónico, 3er año de dibujo arquitectónico, 1er año de dibujo de máquinas, <i>mecánica analítica</i> , estereotomía, carpintería y estructuras de hierro, hidrografía y meteorología, <i>física matemática</i> , procedimientos de construcción, estabilidad de las construcciones, <i>segundo curso de mecánica (mecánica aplicada)</i> , caminos comunes y ferrocarriles. vías terrestres, dibujo de composición, puentes, canales y obras en los puertos. vías fluviales y economía política [34].
Eduardo Martínez Baca	Ing. de Minas	ENI (1885)	Al menos <i>mecánica analítica y aplicada</i> [35].
Guillermo Beltrán y Puga	Ing. Topógrafo e Hidrógrafo	ENI (1891)	Al menos <i>mecánica analítica y aplicada y física matemática</i> pues terminó los cursos de las carreras de ingeniero civil e ingeniero geógrafo [36].
Andrés Aldasoro	Ing. topógrafo e hidrógrafo, Ing. de minas	ENI (1878 y 1880)	Geometría analítica, álgebra superior y cálculo infinitesimal; geometría descriptiva; topografía; <i>mecánica analítica y aplicada</i> ; geodesia y astronomía práctica; estereotomía; química aplicada, análisis químico; mineralogía, geología y paleontología; dibujo topográfico; dibujo de máquinas [37].
Javier Díaz Lombardo	Ing. Topógrafo e Hidrógrafo	ENI (1902)	Algebra superior y cálculo infinitesimal, en la Escuela Nacional de Bellas Artes, geometría analítica de dos y tres dimensiones, topografía e hidromensura, geometría descriptiva, hidrografía y meteorología, economía política, 1er año de dibujo topográfico, 2do año de dibujo topográfico [38].

De la Tabla I tenemos conocimiento que Adolfo Díaz Ruz, Rafael Ramos Arizpe y Carlos S. Chávez Solano llegaron a ver temas de electricidad y magnetismo durante sus estudios en la Escuela Nacional de Ingenieros. En el caso de Gabriel M. Oropesa, que aparentemente no acreditó un curso donde la electricidad estuviera presente, hemos localizado un documento que data de 1898 donde realiza el cálculo de la cantidad de fuerza motriz que podría proveer una hidroeléctrica instalada en Necaxa, esto antes de que se iniciaran las obras en 1903. Por este documento sabemos que Oropesa manejaba muy bien el campo de la hidráulica y, al menos, tenía nociones de electricidad [12].

Otro ejemplo similar es el del Ingeniero Leopoldo Villarreal, de quien no hemos localizado su expediente, pero sabemos que trabajó como Ingeniero Inspector de las obras de Necaxa en 1904 y en 1909. En este último año fue enviado a Necaxa para estudiar un grave accidente que había ocurrido durante las obras, un deslave que produjo la inundación de

varios poblados y la muerte de algunas personas. En el detallado informe que envió Villarreal a la Secretaría de Fomento se observa que también manejaba conocimientos de física. Se debe mencionar que este informe fue traducido al inglés para ser consultado por los ingenieros norteamericanos, como fue el caso de James Dix Schuyler [40].

De esta investigación podemos concluir que los estudios de física de los ingenieros fueron importantes para desempeñar sus funciones en las obras de Necaxa, especialmente los cursos de mecánica, hidráulica y electromagnetismo. La mayoría no acreditaron cursos de electricidad en la Escuela de Ingenieros, lo que nos lleva a pensar que los conocimientos fueron adquiridos de manera autodidacta, o bien asistiendo a cursos que no pudieron acreditarse. Sin duda, aún queda mucho que investigar sobre la función que tuvo la física en México durante la introducción de la energía eléctrica. Este trabajo sólo explora una pequeña parte de este acontecimiento que transformó la vida del país.

1. J. Jeans, *Historia de la Física. Hasta mediados del siglo XX* (Fondo de Cultura Económica, México, 1986).
2. En el siglo XVII se pueden mencionar las contribuciones realizadas por Descartes (1596-1650) a través de su teoría de los remolinos, y la construcción de la máquina eléctrica efectuada por Otto von Guericke (1602-1686). La botella de Leiden se convirtió en otro instrumento eléctrico importante para el estudio de los fenómenos eléctricos y fue inventada por Pieter van Musschenbroek (1692-1761) en 1745. Con estos instrumentos Benjamín Franklin (1706-1790) realizó una serie de experimentos que pretendían demostrar que el rayo es de naturaleza eléctrica. J.D. Bernal, *La Proyección del Hombre. Historia de la Física Clásica* (Siglo XXI Editores, S.A., España, 1975).
3. Cuando Coulomb publicó sus resultados, también aparecieron las leyes de las interacciones eléctricas y magnéticas de Henry Cavendish (1731-1810). D. Papp, J. Babini, *Panorama General de Historia de la Ciencia. La Ciencia del Renacimiento Astronomía, Física, Biología* (Espasa-Calpe Argentina, S.A., Buenos Aires, 1952, Vol. VI).
4. S.F. Mason, *Historia de las Ciencias. 4. La ciencia del siglo diecinueve, agente del cambio industrial e intelectual* (Alianza Editorial, S.A., Madrid, 1986).
5. Las leyes básicas de la electricidad y el magnetismo, que ya habían sido descubiertas en la primera mitad del siglo XIX, fueron formuladas en forma de una amplia teoría matemática por el físico escocés James Clerk Maxwell (1831-1879). En 1873, Maxwell publicó la obra *Tratado de electricidad y magnetismo*, donde muestra las ecuaciones generales del campo electromagnético. Estas ecuaciones se conocen con el nombre de *ecuaciones de Maxwell* y son el punto de partida para todos los tratamientos modernos del electromagnetismo. Como resultado de los trabajos de Maxwell, pronto se estableció que la luz es sólo una forma de radiación electromagnética de una cierta longitud de onda. Así, los siglos de investigación de los fenómenos eléctricos y magnéticos condujeron inesperadamente al descubrimiento de la verdadera naturaleza de la luz. A. Cromer, *Física en la ciencia y en la industria* (Editorial Reverté, S.A., España, 1994).
6. A. Cromer, *Física para las ciencias de la vida* (Editorial Reverté, S.A., España, 2002).
7. En la estación generadora, los transformadores "elevan" la tensión con objeto de lograr una transmisión económica a grandes distancias; en las subestaciones distribuidas a lo largo de la red de transporte, los transformadores "reducen" la tensión para la distribución local; inmediatamente antes de que la corriente llegue al usuario, un transformador local reduce aún más la tensión [6].
8. E. Godoy Dardano, "Un ingeniero y su imperio: Frederick Stark Pearson", *Revista de la Universidad de México* (México, núm. 545, junio de 1996).
9. La línea de transmisión más larga que existía en aquella época, es decir, a finales del siglo XIX y principios del XX, era la que partía de las diversas centrales eléctricas ubicadas en las caídas del Niágara hasta Toronto, Canadá, la cual tenía un desarrollo de aproximadamente 200 km. AHA, Fondo Aprovechamientos Superficiales, caja 627, exp. 9083, fo. 4.
10. E. Iberdrola, Sevillana de electricidad y Unión Fenosa, *Centrales Hidroeléctricas. Conceptos y componentes hidráulicos* (Editorial Paraninfo, Madrid, 1994).
11. AHA, Fondo Aprovechamientos Superficiales, caja 4192, exp. 56591, fo. 104-132.
12. G.M. Oropesa, "El Río de Necaxa y sus caídas de 'La Ventana' y de 'Ixtlamaca'", *Memorias de la Sociedad Científica "Antonio Alzate"* (México, XII, 1898-1899) p. 180-191.
13. AHA, Fondo Aprovechamientos Superficiales, caja 4192, exp. 56591, fo. 168-169.
14. AHA, Fondo Aprovechamientos Superficiales, caja 4192, exp. 56591, fo. 78-80.

15. J. Díaz Lombardo, "Las obras de Necaxa. De 'La Aurora'", *Anales de la Asociación de Ingenieros y Arquitectos de México* (México, XV, 1907).
16. AHA, Fondo Aprovechamientos Superficiales, caja 4200, exp. 56644, fo. 26.
17. Esta información aparece en la Ley del Parlamento de Canadá, Capítulo 153, 3, Eduardo VII, del año de 1903. E. Rodríguez Mata, *Generación y Distribución de Energía Eléctrica en México. Periodo 1939-1949* (Investigaciones Industriales del Banco de México, S.A., México).
18. "Solemne dedicación de un monumento a la memoria del Ilustre Dr. Fred Stark Pearson", *Electra. El Magazine de Luz y Fuerza y Tranvías* (México, Año VI, núm. 71, marzo y abril de 1932).
19. "Frederick Stark Pearson 'El Mago de la Realidad'", *Electra. El Magazine de Luz y Fuerza y Tranvías* (México, Año III, núm. 35, junio de 1928).
20. "Bodas de Plata de la Cia. Mexicana de Luz y Fuerza Motriz, S. A.", *Electra. El Magazine de Luz y Fuerza y Tranvías* (México, Año III, núm. 35, junio de 1928).
21. AHA, Fondo Aprovechamientos Superficiales, caja 4191, exp. 56584, fo. 2-16.
22. AHA, Fondo Aprovechamientos Superficiales, caja 627, exp. 9083, fo. 18-21.
23. J.S. Carson, "The Power Industry", *Industrialization of Latin America*, (Lloyd J. Hughlett, editor, McGraw-Hill Book Company, INC., E.U.A., 1946).
24. G.M. Oropesa, "Las obras hidroeléctricas de Necaxa", *Memorias de la Sociedad Científica "Antonio Alzate"* (México, XXX-VII, 1917-1920).
25. M.P. Ramos Lara, *Historia de la Física en México en el Siglo XIX: Los Casos del Colegio de Minería y la Escuela Nacional de Ingenieros* (Tesis de Doctorado en Historia, UNAM-FFyL, México, 1996).
26. De acuerdo a informes del profesor del segundo curso de electricidad, el ingeniero Alberto Best, el curso despertaba interés en todos los estudiantes de la escuela, e incluso llegó a proponer que fuera obligatoria para las carreras restantes [25].
27. M.R. Gómez, *Biografías de agrónomos* (Colegio de Posgraduados, Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México, 1976).
28. "Sociales", *Electra. El Magazine de Luz y Fuerza y Tranvías* (México, Año VI, núm. 72, mayo y junio de 1932)
"El Ing. Federico Trigueros ha muerto", *Electra. El Magazine de Luz y Fuerza y Tranvías* (México, Año VII, núm. 76, marzo y abril de 1933).
29. Estos son los nombres localizados en el archivo AHA, seguramente se dieron otros nombramientos de los que no hemos encontrado registro. El nombre de Agustín del Río aparece en varios planos técnicos elaborados por Frederick Stark Pearson y Hugh L. Cooper. AHA, Fondo Aprovechamientos Superficiales, caja 3650; también la caja 2577, exp. 36056, fo. 2.
30. CESU, Expedientes de Alumnos, exp. 45058, fo. 18.
31. CESU, Expedientes de Alumnos, exp. 13915, fo. 16-19.
32. CESU, Expedientes de Alumnos, exp. 44674, fo. 16.
33. CESU, Expedientes de Alumnos, exp. 14576, fo. 32.
34. CESU, Expedientes de Alumnos, exp. 45038, fo. 2 y 7.
35. De acuerdo al plan de estudios de 1883 y 1886. CESU, ENI, Correspondencia, caja 2, exp. 18, fo. 139-141. Además CESU, Expedientes de Alumnos, exp. 14347, fo. 25.
36. CESU, Expedientes de Alumnos, exp. 44688, fo. 2.
37. CESU, Expedientes de Alumnos, exp. 43442, fo. 24, 37, 39 y 45.
38. CESU, Expedientes de Alumnos, exp. 14732, fo. 5, 7 y 11.
39. CESU, Expedientes de Alumnos, exp. 44674, fo. 30-31.
40. En los documentos del Ing. James, localizados en el Archivo de California, Estados Unidos, existe una copia del informe que presentó el 14 de agosto de 1909 a la Secretaría de Fomento, sobre el accidente ocurrido en la Presa de Necaxa, cuyo título es "Report on the present state of the hydraulic works of the Mexican Light & Power Company, Ltd., as per concessions of 1903 and 1906, with an annex relative to the accident which occurred to Dam No. 2 on the twentieth of May 1909". AHA, Fondo Aprovechamientos Superficiales, caja 627, exp. 9083, fo. 1-22.

Archivos consultados:

AHA: Archivo Histórico del Agua.

CESU: Centro de Estudios Sobre la Universidad (UNAM).