

Radiación para la investigación científica en el Centro Nuclear de México

Federico Lazarín Miranda
Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa

RESUMEN

Dos tipos de energía fueron fundamentales para la investigación nuclear en el Centro Nuclear de México (CNM): las radiaciones nucleares y la electricidad de alta densidad y en el presente artículo reconstruiremos y analizaremos las investigaciones que llevaron a cabo con dichas energías. Guiarán al escrito tres ejes analíticos. En primer lugar, explicaremos el concepto de radiaciones nucleares y la electricidad de alta densidad; en segundo lugar, reconstruiremos los programas de investigación del CNM, con la utilización de estas dos energías y, en tercer lugar, se describirán y analizarán los dos aparatos más importantes que se utilizaron en el Centro para realizar investigación básica y aplicada, así como la creación de nuevas tecnologías que utilizaban estas energías. Para tal fin el artículo se divide en tres apartados: "La utilización de la radiación para la investigación" es el primero. "Programas de investigación en el Centro Nuclear de México" es el segundo y en tercer lugar: "Tecnología para la investigación con radiación nuclear".

47

Palabras clave: Energía nuclear – Radiación – Historia de la ciencia – Física nuclear – Electricidad de alta densidad.

Abstract

Two types of energy were fundamental to nuclear research in the Nuclear Center of Mexico (CNM): nuclear radiation and high-density electricity. In this article, we will reconstruct and analyze the investigations carried out with one and other energies in that Center. In this way, they will guide three analytical axes: first, we will explain the concept of nuclear radiation and high-density electricity; secondly, we will reconstruct the research programs which used these energies at the CNM, thirdly, will describe and analyze the two most important devices that were used in the Centre to carry out basic and applied research, as well as the creation of new nuclear technologies with the use of nuclear radiation and high-density electricity. For this purpose, the article is divided into three sections: first, "The use of radiation for research?", "Research programs at the Nuclear Center in Mexico" is the second, and third "Technology for research with nuclear radiation."

Keywords: Nuclear Energy – Radiation – History of Science– Nuclear Physics – High density energy.

INTRODUCCIÓN

En noviembre de 1970 se inauguró el Centro Nuclear de México (CNM). Seis años antes se inició su construcción, en el kilómetro 36.5 de la carretera Federal a Toluca, en el municipio de Ocoyoacac, Estado de México, cuyas instalaciones tuvieron una inversión aproximada de 170 millones de pesos.

En este lugar se concentraron diversos laboratorios de investigación nuclear que estaban dispersos en la Ciudad de México, en el CNM se inició un nuevo programa de integración de actividades de investigación y desarrollo tecnológico. El personal era de aproximadamente 500 personas de las cuales 175 eran científicos: físicos, químicos, ingenieros (nucleares, electrónicos, mecánicos, entre otros), muchos de ellos tenían estudios de maestría y doctorado en el país o en el extranjero. Una tercera parte del personal del Centro estaba integrada por técnicos especializados que trabajaban en los diversos laboratorios y talleres, y el resto era el personal administrativo y de servicios. Las áreas dedicadas a la investigación y desarrollo de tecnología nuclear eran tres: 1. Acelerador de partículas, 2. Reactor y 3. Talleres Generales.¹

48 Dos tipos de energía fueron fundamentales para la investigación nuclear en el CNM: las radiaciones nucleares y la electricidad de alta intensidad. En el presente artículo reconstruiremos y analizaremos las investigaciones que llevaron a cabo, con una y otra energías, en dicho centro. De tal forma, que guiarán al escrito tres ejes temáticos: en primer lugar, explicaremos el concepto de radiaciones nucleares y la electricidad de alta intensidad; en segundo lugar, reconstruiremos los programas de investigación del CNM relacionados con estas energías y, en tercer lugar, se describirán y analizarán los dos aparatos más importantes que se utilizaron en el Centro para realizar investigación básica y aplicada, así como la creación de nuevas tecnologías nucleares.

LA UTILIZACIÓN DE LA RADIACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN

¿Qué es la radiación? ¿Para qué sirve para la investigación nuclear? ¿Cómo se utiliza? Estas son preguntas que debemos responder ahora para comprender cómo y por qué se adquirieron los aparatos de investigación para el CNM, es decir, el Reactor Triga Mark III y el Acelerador de Partículas Van de Graaf.

¹ Para abundar sobre el tema véase: Federico Lazarín Miranda, “La industria nuclear en México ¿Un proyecto estatal?”, en Federico Lazarín y Hugo Pichardo, *La utopía del uranio. Política energética, extracción y explotación del uranio en México*, México, Biblioteca Nueva, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, 2015, pp. 85-110.

Podemos afirmar que la radiación se encuentra en todas partes. Los rayos del Sol que iluminan cotidianamente a la Tierra o las partículas cósmicas que llegan desde distintas latitudes del universo, son formas de radiación natural a las que estamos expuestos todos los días y en todos los lugares en los que nos encontramos,² es decir, que tanto al aire libre como en el interior de nuestros hogares, estas partículas nos bañan y algunas atraviesan nuestros cuerpos sin que nos demos cuenta. De acuerdo con Ricards Campbell:

La mayor parte de la radiación que recibimos cotidianamente existe por la misma naturaleza. Como tal, se ha producido y seguirá produciéndose durante toda la vida del universo; y así como existe en nuestra Tierra, también existe en el Sol, en los otros planetas y en las galaxias lejanas. Tan forma parte de la naturaleza, que está estrechamente ligada con el suministro de energía en la misma formación de las estrellas y demás cuerpos celestes. Pudo haber desempeñado un papel importante en el origen de la vida y en la evolución de las especies. No hay ninguna manera en que podamos evitar recibir radiación natural, y nuestros cuerpos están adaptados a pequeñas cantidades de ella.³

Para Campbell, el mejor ejemplo de la radiación natural son las partículas cósmicas. Como su nombre indica, esta radiación proviene del espacio exterior, ello se deduce porque es más intensa a mayor altitud sobre el nivel del mar. Así las magnitudes disminuyen a medida que se desciende en la atmósfera y esta disminución es todavía mayor bajo el agua.

En general, las partículas cósmicas que se encuentran en las capas externas de la atmósfera están formadas por núcleos atómicos (de carga positiva), básicamente protones y partículas alfa (α). Éstos realizan un continuo bombardeo a nuestro planeta, desde distintas direcciones, gracias al magnetismo terrestre, y disminuyen su intensidad cerca del ecuador, ello demuestra que son partículas con carga eléctrica. A medida que penetran en la atmósfera tienen choques con los núcleos atómicos de los gases que la forman, en estas colisiones se producen nuevas emisiones de radiaciones conocidas como cascadas de radiación cósmica secundaria, algunas de estas partículas llegan a la estratósfera. Hasta la fecha se ha concluido que estas partículas son electrones, positrones y rayos gamma; así como mesones.⁴

Por otra parte, existe radiación producida por el ser humano a través de la tecnología, ésta se conoce como radiación artificial, por ejemplo, la radio, la

² Foro nuclear, <http://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/119909-que-sabes-de-la-radiacion>, (19/02/2019); y Jorge Rickards, *Las radiaciones: reto y realidades*, México, Secretaría de Educación Pública, Fondo de Cultura Económica, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (La ciencia desde México, 8), 1986, pp. 13-25.

³ Jorge Rickards Campbell, *Las radiaciones: reto y realidades...*, pp. 75-76.

⁴ Jorge Rickards, *Las radiaciones: reto y realidades...*, pp. 75-76; y Federico Lazarín Miranda, "En el principio: Manuel Sandoval Vallarta un pionero de los rayos cósmicos", en Jorge Bartolucci (coord.), *La saga de la ciencia mexicana. Estudios sociales de sus comunidades: siglos XVIII al XX*, México, Coordinación de Humanidades, Universidad Nacional Autónoma de México, 2011, pp. 145-175.

televisión, el horno de microondas, la luz que emite un foco o el teléfono celular son generadores de radiaciones electromagnéticas o de calor, cabe añadir que estas emisiones no son peligrosas para los seres vivos pues son de baja intensidad.

De aquí podemos desprender una primera definición: la radiación es la emisión, propagación y transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas en cualquier medio. Un ejemplo de ello es el calor que transmite la luz del sol, que viaja a través de ondas electromagnéticas.

La física ha descrito dos tipos de ondas o radiaciones electromagnéticas: la primera es la radiación no ionizante, este tipo de ondas no tiene la suficiente energía como para romper los enlaces que unen a los átomos del medio que irradian, como las ondas de radio y televisión, del horno de microondas o luz visible, entre otras.

La segunda es la radiación ionizante, la cual contiene suficiente energía como para producir ionizaciones de los átomos del medio o materia que es irradiado. Éstas van desde los rayos ultravioleta hasta la radiación cósmica. La emisión de estas radiaciones la realizan muchos elementos de la naturaleza cuya característica común es que se les considera inestables, pues en su núcleo el número de neutrones resulta excesivo o escaso, de esta forma sus electrones buscan configuraciones más estables, transformando al átomo de un elemento en un isótopo o en otro elemento químico. Por ejemplo, el Uranio 238, se convierte en Uranio 235, otro ejemplo, es el Tritio que al ionizarse se convierte en Hidrógeno. La energía que se genera en el momento de la búsqueda de la estabilidad en estos átomos es la que se conoce como radiactividad,⁵ este fenómeno físico-químico se descubrió gracias a la capacidad de estos elementos de dejar impresiones en placas fotográficas, ionizar gases o producir fluorescencia, pues en realidad la radiactividad no se puede ver.

Se atribuye a Henri Becquerel (1852-1908) el descubrimiento de la radiactividad. Al conocerse el descubrimiento de los rayos "X" por Wilhem Conrad Röntgen (1845-1923), Becquerel se preguntó si otros cuerpos fluorescentes como el sulfato doble de uranio y potasio (uranilo) producían algún tipo de emisión.⁶ El experimento del físico francés le llevó varios días hasta que descubrió que la radiación que captaba del uranilo no provenía del exterior (de la iluminación solar como se pensaba) sino de los propios átomos en estudio. A estas emisiones Becquerel las bautizó como radiactividad en 1896.⁷ Lo interesante del caso es que estas radiaciones no tenían relación alguna con la forma en que se reúnen los átomos sino que, con el tiempo, se descubrió que tienen correspondencia con propiedades, hasta ese momento ocultas, en el interior de los átomos.

⁵ Jorge Rickards, *Las radiaciones: reto y realidades...*, pp. 75-77, y George Gamov, *Biografía de la física*, México, Salvat-Alianza Editorial (Biblioteca General Salvat), 11, 1971, p. 219.

⁶ En ese momento no se sabía que esas emisiones en realidad eran alguna forma de energía.

⁷ *Ibidem*, pp. 217-218.

Las investigaciones en torno a la radiactividad continuaron: tres años después Ernest Rutherford (1871-1937) y su asistente, Frederick Soddy (1877-1956), sugirieron que este fenómeno era el resultado de la transformación espontánea de un elemento químico en otro y propusieron tres clases de rayos que estaban presentes en la radiactividad:

1. Rayos alfa (α), que pueden ser detenidos por una hoja de papel y que se comprobó que eran los iones de helio. (En realidad eran núcleos de átomos de helio, pero Rutherford no lo supo hasta que realizó los experimentos de dispersión, doce años después).
2. Rayos beta (β), que pueden pasar a través de hojas de aluminio de unos cuantos milímetros de espesor y que resultaron ser haces de electrones que se mueven muy rápidamente.
3. Rayos gamma (γ), que pueden penetrar planchas de plomo, de muchos centímetros de espesor y que son similares a los rayos X, aunque de longitud de onda mucho más corta.⁸

La radiactividad es un fenómeno de la naturaleza descubierto y estudiado por la física y la química: la primera estableció su naturaleza, intensidad y propiedades al interactuar con la materia, entre otras; la segunda, consiguió aislar las sustancias, describió cómo reaccionaban y midió su masa, por mencionar algunos resultados. Entre 1907 y 1919, Rutherford logró obtener una plaza en la Universidad de Mánchester en donde congregó a físicos y químicos para estudiar las propiedades de la radiactividad.

Para Rickards, éste representa uno de los grandes descubrimientos del hombre contemporáneo llevado a cabo por distintos científicos, quienes despejaron diversas incógnitas en torno a este problema físico-químico, de tal manera que conforme se “fueron conociendo sus efectos, también se descubrieron aplicaciones de gran utilidad, ya que las sustancias radiactivas o los instrumentos emisores de radiaciones ionizantes resultan insustituibles en medicina, agricultura, industria, ciencias de la tierra, biología y otras muchas ramas.”⁹

Uno de los problemas a estudiar era cómo se relacionaba la radiactividad con el átomo. Las investigaciones de Rutherford y su grupo establecieron que aquella era un fenómeno atómico debido a que las partículas α y β eran emitidas por los átomos radiactivos, por lo que se concluyó que eran componentes de éstos.

Para el científico neozelandés la radiactividad no era un fenómeno que cambiaba la naturaleza de las sustancias, un elemento que emitía radiactividad se “convertía en otro elemento cercano a él en la tabla periódica. En otras

⁸ *Ibidem*, p. 219.

⁹ Foro nuclear: <http://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/119909-que-sabes-de-la-radiacion>, (19/02/2019); y Jorge Rickards, *Las radiaciones: reto y realidades...*, pp. 13-25.

palabras, la radiactividad era un proceso [espontáneo o inducido, eso no se sabía aún] que transmutaba los elementos”.¹⁰

Al estudiar la radiactividad los científicos descubrieron que también era una herramienta para analizar la estructura de los átomos.

Tras su descubrimiento, se procedió a estudiar cualquier tipo de radiación haciéndola atravesar distintos materiales, diferentes grosores de un mismo material, a diversas inclinaciones de incidencia, etc. Con ello se obtuvo información relevante acerca de la energía de la radiación, de su intensidad y de su carga eléctrica. Este tipo de experimentos eran los que llevaron a cabo en Mánchester Rutherford y algunos de sus colaboradores, especialmente el alemán Hans Geiger (1882-1945) y el joven estudiante británico Ernest Marsden (1889-1970).¹¹

Esta radiación es producida al romper al átomo, y se desprenden grandes cantidades de energía que se pueden aprovechar para fines militares o pacíficos. En México la apuesta fue por su utilización pacífica en la Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN), como veremos en el siguiente apartado.

Jorge Rickards Campbell define a la “energía nuclear como la fuerza que mantiene unidos a los protones y neutrones en el núcleo del átomo,”¹² y el autor explica que esta fuerza no puede ser eléctrica porque los neutrones no tienen carga, además de que los protones se rechazan todos entre sí por tener carga positiva, de tal forma que se trata de una energía lo suficientemente intensa para contrarrestar la repulsión eléctrica entre los protones. Por su parte en la página denominada *Energía nuclear*, ésta se define como: la energía que se localiza en la parte central del núcleo atómico. En el núcleo de cada átomo hay dos tipos de partículas (neutrones y protones) que se mantienen unidas gracias a la energía nuclear. De tal forma que la tecnología nuclear permite transformar este tipo de energía en otros tipos como la eléctrica (en las centrales nucleares), en cinética (en determinados sistemas de propulsión, por ejemplo de vehículos espaciales).¹³

Por su parte, la electricidad de alta intensidad se refiere a la capacidad de generar y almacenar grandes cantidades de electricidad, ello sólo es posible lograrlo en los reactores nucleares o en los aceleradores de partículas,¹⁴ este tipo de energía se pudo descubrir gracias a los estudios sobre la radiactividad y al desarrollo tanto de los reactores como de los aceleradores de partículas.

¹⁰ Jaume Navarro, *El átomo cuántico. Bohr. Pasaporte cuántico a otro estado*, Barcelona, National Geographic, 2012, pp. 56-57.

¹¹ *Ibidem*.

¹² Jorge Rickards, *Las radiaciones: reto y realidades...*, p. 23.

¹³ *Ibidem* y “Energía nuclear”, <https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear>, (19/02/2018).

¹⁴ Frederick F. Morehead, “Light-emitting semiconductors”, en *Scientific American*, vol. 216, núm. 5, mayo, 1967, pp. 108-122.

PROGRAMAS DE INVESTIGACIÓN EN EL CENTRO NUCLEAR DE MÉXICO

El propósito del proyecto nuclear en México era la utilización pacífica de la radiación, con un fuerte acento en la producción de energía eléctrica, por lo que las actividades de la CNEN se encaminaron a ese objetivo. Para poder llevar a cabo ese proyecto se enviaron estudiantes y personal de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Instituto Politécnico Nacional (IPN) o empresas privadas como la Compañía Mexicana de Luz y Fuerza (CMLF) a especializarse en los campos de la física nuclear a los Estados Unidos, desde 1954.¹⁵

Ese año se empezaron a formar los primeros especialistas mexicanos en ciencias nucleares, al abrir Estados Unidos sus universidades para que estudiantes extranjeros realizaran posgrados en esa materia. Fernando de Alba Andrade tomó el Curso de Técnicas Básicas de Radioisótopos en Oak Ridge, Tennessee. En 1955 asistieron al mismo curso Ariel Tejera y Augusto Moreno y Moreno. Este mismo año, se llevó a cabo una reunión entre los directores del Proyecto Phoenix de la Universidad de Michigan y del Fondo para el Desarrollo Atómico Pacífico. Por México asistieron el general William Draper (1894-1974) y el ingeniero Gustave Maryssael, presidente y director general respectivamente de la CMLF, así como funcionarios de la UNAM incluido Nabor Carrillo, rector de la misma.

En 1955, ocho estudiantes mexicanos iniciaron estudios en ingeniería nuclear también en la Universidad de Michigan, cinco de ellos recibieron becas de la Compañía de Luz. Ellos fueron: Bruno De Vecchi Appendini y Carlos Vélez Ocón, (empleados de la CMLF); los físicos Arnulfo Morales Amado y Vinicio Serment Cabrero, de la UNAM; así como el ingeniero Antonio Magaña Plaza, del IPN. Además, Miguel Ángel Barberena Vega y Luis Gálvez Cruz fueron becados por el gobierno de Veracruz; y Roberto Treviño Arizpe, por el gobierno de EEUU.¹⁶ Todos ellos constituyeron el pie veterano de la CNEN. Con este personal especializado se iniciaron los trabajos de la Comisión para llevar a cabo los proyectos de investigación de acuerdo con las funciones siguientes de la misma:

- a) La exploración y explotación de los yacimientos de materiales de utilidad específica para uso en los reactores nucleares.

¹⁵ Para abundar sobre el programa nuclear de México y, así como la adquisición de conocimientos y la formación de científicos atómicos y personal especializado véanse: *Revista Ciencia Nicolaita*, no. 63, 2014, pp. 24-95; y Federico Lazarín y Hugo Pichardo (coords.), *La utopía del uranio. Política energética, extracción y explotación del uranio en México*, México, Biblioteca Nueva, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, 2015.

¹⁶ ININ, "Nabor Carrillo Flores", <http://www.inin.gov.mx/publicaciones/documentos/pdf/NABOR%20CARRILLO%20FLORES.pdf>, (12/02/2018).

- b) La exportación e importación de materiales de utilidad específica para la construcción de reactores nucleares.
- c) El comercio y transporte interior de materiales atómicos.
- d) La producción y uso de energía atómica en cantidades importantes a juicio de la Comisión.
- e) Las investigaciones científicas en el campo de la física nuclear y disciplinas científicas y técnicas conexas.
- f) El asesoramiento del Gobierno, sobre la legislación, en todos sus aspectos, relacionada con la atómica; en convenios con gobiernos extranjeros sobre energía y materiales atómicos y sobre intercambio de informaciones relativas a la energía nuclear.
- g) La preparación de físicos y técnicos mexicanos en energía nuclear.¹⁷

Para cumplir con sus funciones específicas el CNM contaba con tres áreas fundamentales, en ellas se desarrollaron básicamente trabajos de producción de radioisótopos de vida media corta en el reactor, análisis por activación, construcción de equipo y desarrollo de trabajos especiales de investigación básica y tecnológica- en los campos industrial, agrícola hidrológico, genético y médico.

Las actividades se pueden clasificar entonces en cuatro objetivos: a) investigación científica, b) investigación tecnológica, c) adiestramiento, capacitación y formación de personal a niveles medios y superiores, y d) servicios.¹⁸ Estos trabajos se llevaban a cabo de la siguiente forma: en el Área del Acelerador de partículas Van de Graaff se hacían experimentos en física de reacciones nucleares con la participación de un grupo de físicos e ingenieros especialistas en electroimanes, en alto vacío y manejo de altos voltajes. El aparato era de fabricación estadounidense como veremos más adelante.

En esta área había un taller para la construcción de aparatos de investigación, además, del Centro de Cómputo Electrónico con computadoras modelos PDP-10 y PDP-15. También había un laboratorio de Plasmas donde se hacían investigaciones con el propósito de encontrar nuevas fuentes de energía, por ejemplo: la fusión que se pensaba como una forma de generar energía más útil y duradera que la producida por la fisión del uranio.¹⁹

Asimismo, en esta área se establecieron laboratorios electrónicos y de investigación en detectores de estado sólido y un grupo de científicos trabajaba en el diseño de aceleradores para aplicaciones de tipo industrial, por ejemplo, para la esterilización de ciertos materiales o la conservación de alimentos.

¹⁷ Taller Laboratorio de Historia de la Ciencia y Archivística, UAM-I (TLHCA), Fondo Manuel Sandoval Vallarta, Sección Institucional, Subsección: Comisión Nacional de Energía Nuclear, Caja 10, exp.12, s/f, f. 2-3.

¹⁸ CIDSN, exp. Energía nuclear - CNEN - Programa de combustibles nucleares. "Información para la prensa", DF, 1972, ff. 3-4.

¹⁹ CIDSN, exp. Energía nuclear - CNEN - Programa de combustibles nucleares. "Información para la prensa", DF, 1972, ff 1-2.

El área del reactor, por su parte tenía un aparato de investigación tipo Triga Mark III de alberca de 1 MW térmico, también de fabricación estadounidense. Este reactor, además, se utilizaba para la producción de radioisótopos, así como, para la capacitación de personal en el manejo de estos aparatos, además del estudio de física e ingeniería de reactores (más adelante veremos algunos detalles sobre este equipo).

Otro de los usos del reactor era en el análisis de activación que utilizaba un alto flujo de neutrones para aplicaciones industriales y agrícolas, así como otros donde se estudiaban procesos de tratamiento de minerales y refinación de los compuestos intermedios en la producción de óxido de uranio.²⁰

El área de los Talleres Generales estaba constituida por laboratorios de Electrónica, Circuitos Integrados, así como de Elementos Combustibles, Normas y Ultracentrífugas. En la nave de estos talleres había equipo con el que se podían fabricar aparatos especiales de investigación así como piezas que integraban las plantas piloto que eran necesarias para investigar los procesos de obtención del óxido de uranio que se utilizaba en los combustibles del área de Reactores,²¹

Es indudable pensar que todos estos trabajos se realizaron gracias a que los científicos, ingenieros y técnicos que participaban en la CNEN, fueron adquiriendo los conocimientos necesarios para tales fines, pero, además, los apropiaron y, después, mediante los proyectos de investigación y desarrollo de nuevas tecnologías crearon nuevos conocimientos.

Uno de los objetivos más importantes en el CNM era la investigación que permitiera la generación de electricidad utilizando la energía nuclear, para lograr este propósito se pensó en los reactores de potencia. De tal forma, las actividades de la CNEN se concentraron en los problemas que planteaban la adquisición, instalación y operación del primer reactor de potencia para nuestro país, que a fin de cuentas estaría bajo control de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

De tal forma, la CNEN mantuvo una colaboración cercana con la Comisión Federal de Electricidad, así la transferencia y apropiación de conocimientos se extendió hasta la CFE. El discurso oficial afirmaba que los trabajos conjuntos entre estas dos instituciones era una:

decisión de la más alta importancia en cuanto al desarrollo de los usos pacíficos de la energía nuclear en México, fuertemente vinculada, además, con un sano crecimiento económico y social en el país en el próximo decenio [década de 1980], mediante la utilización adecuada de nuestros recursos energéticos, incluyendo los nucleares, una colaboración sin restricciones, condicionada solamente

²⁰ CIDSN, exp. Energía nuclear - CNEN - Programa de combustibles nucleares. "Información para la prensa", DF, 1972, ff. 2-3.

²¹ CIDSN, exp. Energía nuclear - CNEN - Programa de combustibles nucleares. "Información para la prensa", DF, 1972, ff. 3-4.

a la capacidad de sus recursos humanos y materiales que, en la medida de lo posible, ha tratado de ensanchar y consolidarse.²²

Cuando se presentó a la Comisión Federal de Electricidad la posibilidad de adquirir una planta nuclear para la generación de electricidad en octubre de 1966, la CNEN externó su más amplio apoyo al proyecto y ofreció la más extensa colaboración. En primer lugar, se hizo un estudio preliminar sobre los lugares en los que era mejor establecer la planta y se proporcionó información sobre las reservas de minerales de uranio y la factibilidad de su explotación. Posteriormente, personal del grupo de reactores de potencia de la CNEN, inició y mantuvo relaciones con los técnicos de la CFE, incluyendo el estudio que realizó, esta última, con el Stanford Research Institute, sobre 'análisis de decisiones' para la posible inclusión de plantas nucleares en el desarrollo del país.

En diciembre de 1968 se acordó constituir un grupo de trabajo entre las dos comisiones, y se afirmaba que la labor desarrollada por este grupo generó resultados muy positivos a ambas dependencias, pues se resolvieron distintos problemas, no se especificó cuáles. Así la CFE pudo reunir los elementos de juicio que le permitieron decidir, sobre bases teórico-económicas, la propuesta de compra de la primera planta nuclear para la generación de electricidad, con base en las cotizaciones que recibió de los fabricantes de reactores y comparándolas con los costos de las plantas de igual capacidad nuclear a la que se necesitaba.²³

Los principales temas abordados por el personal de las ambas comisiones fueron los siguientes: selección de sitios para la mejor ubicación del reactor; evaluación de los posibles proveedores de reactores de potencia; revisión de las especificaciones técnicas para la planta nuclear de potencia y revisión de las especificaciones de los combustibles nucleares.

En este rubro es importante resaltar la colaboración internacional mexicano-estadounidense con la integración del Grupo de Estudio entre el OIEA, México y Estados Unidos. El 7 de octubre de 1965, se firmó en la Casa Blanca un acuerdo entre los dos países y el OIEA para crear este 'Grupo de Estudio', su objeto era examinar las posibilidades técnicas y económicas de una planta nuclear de doble propósito que pudiera suministrar energía eléctrica y agua dulce para riego (por desalinización del agua de mar) para los estados de Sonora y Baja California en México, así como de California y Arizona en los Estados Unidos. Por la parte mexicana, correspondió a la CNEN la coordinación gubernamental del proyecto. Después de analizar las características y costos de este proyecto, se llegó a la siguiente conclusión: "La construcción de una planta nuclear de doble propósito, que produzca 44 metros cúbicos por segundo de agua dulce y que tenga una potencia de dos mil megawatts eléctricos es

²² Comisión Nacional de Energía Nuclear, *Memoria de Labores 1º de septiembre de 1968 al 31 de agosto de 1969*, sin lugar, 1969, pp. 11-15.

²³ *Ibidem*.

técnicamente posible en la actualidad”.²⁴ Desafortunadamente, no se llegó a ningún acuerdo entre los dos gobiernos y, al final, sólo quedó un documento titulado “Plantas nucleares productoras de energía eléctrica y agua desalada para el Noroeste de México y Suroeste de los Estados Unidos.”²⁵

En el anexo Directorio de dependencias del documento, se pueden apreciar las áreas específicas de la CNEN en el año de 1970 que permiten apreciar qué personajes dirigían laboratorios y programas de investigación. En ese año, el Proyecto del Programa Nacional de los Usos Pacíficos de la Energía Nuclear presentado, tenía tres apartados, en el primero, se describieron los antecedentes, propósitos del proyecto y la situación energética de México; en el segundo, se establecieron las reservas de mineral de uranio que había en territorio nacional y, en el tercero, se establecieron los principales tipos de reactores de potencia y sus características.²⁶

De tal forma que en el CNM se llevarían a cabo las investigaciones y estudios correspondientes para que México pudiera adquirir los reactores de potencia para la generación de energía eléctrica a partir de la nuclear.

TECNOLOGÍA PARA LA INVESTIGACIÓN CON RADIACIÓN NUCLEAR

EL REACTOR TRIGA MARK III. INVESTIGACIÓN CON ENERGÍA NUCLEAR

El 1° de julio de 1968, empezaron las operaciones de la Dirección del Reactor en el, todavía en construcción, Centro Nuclear de México, cuyo primer trabajo fue la instalación del reactor denominado TRIGA Mark III, el cual se decía que era el mejor de su época y desde el punto de vista de la investigación era el reactor más avanzado en el mundo.

Las gestiones para conseguir un reactor nuclear para México resultaron complicadas. Por razones políticas, no se quería firmar un convenio bilateral con los EEUU, por lo que, la Secretaría de Relaciones Exteriores llevó a cabo mínimas negociaciones con las autoridades de ese país, para tener los menos compromisos en materia nuclear, de tal manera que no se firmó un acuerdo bilateral entre los dos países que hubiera facilitado la adquisición de un reactor de investigación. Por el contrario se celebró un convenio con el OIEA para el suministro del reactor TRIGA Mark III y, otro tripartita —que incluía a los Estados Unidos— para la adquisición del combustible nuclear. Ambos, fueron firmados el 18 de diciembre de 1963.²⁷

²⁴ *Ibidem.*

²⁵ *Ibidem.*

²⁶ TLHCA, Fondo Manuel Sandoval Vallarta, Sección Institucional, Subsección: Comisión Nacional de Energía Nuclear, Caja 9, exp.1, 1970, ff. 1-34.

²⁷ Centro Nuclear de México, *Nuestros inicios*, México, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, s/f, pp. 31-32.

El reactor fue construido por la empresa Gulf General Atomics (GA), establecida en 1955, en San Diego, California, era una subsidiaria de la empresa General Dynamics Corporation (GDC), la idea de fundar esta subsidiaria fue de John Jay Hopkins (1893-1957), presidente de GDC, y de Frederic de Hoffmann (1924-1989), primer director y presidente de GA. De Hoffmann fue uno de los científicos que participaron en el proyecto Manhattan en Los Álamos, la empresa se estableció para los usos pacíficos de la energía nuclear.²⁸

El primer prototipo de un reactor pequeño y seguro de investigación, que se denominó TRIGA, inició su operación el 3 de mayo de 1958. La empresa Gulf General Atomics desarrolló un reactor especial de combustible de hidruro de circonio mezclado con uranio natural o Uranio 235, que tenía altos niveles de seguridad inherente, los más altos que cualquier otro reactor. Éste demostró ser uno de los proyectos nucleares más duraderos y exitosos, pues en los siguientes cuatro años se pusieron en el mercado los reactores TRIGA, en el año 2000 existían aproximadamente 65 reactores de este modelo en 24 países del mundo.²⁹

Pero qué quería decir el nombre de este reactor. De acuerdo con Carlos Graef Fernández, las tres primeras letras de TRIGA significaban las finalidades del reactor: la «T» (*Training*), se refiere a la capacitación de personal; la «R» (*Research*), representaba la investigación científica y la «I» (*Isotope*), hacía alusión a la producción de isótopos. Las dos últimas letras correspondían a General Atomic, el fabricante; Mark III indicaba el modelo del reactor.³⁰

Los altos índices de seguridad de este se debían a que el combustible contenía el extinguidor o moderador de la reacción nuclear, el cual actuaba y detenía la reacción cuando la temperatura del combustible nuclear superaba los 350 grados Celsius. Poseía sistemas de seguridad intrínsecos, en el caso, de un incremento inesperado de energía, se detenía automáticamente y no había ninguna salida de líquidos (agua), al exterior del Centro. La reacción de fisión se controlaba en el Mark III por medio de barras de control que regulaban la liberación de energía. Estas barras se introducían y sacaban a voluntad entre los elementos de combustible nuclear. Si por alguna causa no se introducían las barras con la rapidez suficiente para detener la liberación de energía nuclear, el hidruro de circonio entraba en acción automáticamente y apagaba el reactor. Para mayor seguridad, el reactor del Centro Nuclear se instaló en una piscina que, además de ser un moderador, era un blindaje y un refrigerante, que permitía a los operadores ver lo que ocurría en el núcleo del mismo.³¹

²⁸ General Atomics, <http://www.ga.com/history>, (28/05/2017); y Company Histories.com, <http://www.company-histories.com/General-Atoms-Company-History.html>, (28/05/2017).

²⁹ *Ibidem*.

³⁰ Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, *40 años de usos pacíficos de la energía nuclear en México- Folleto histórico*, México, Instituto Nacional de Energía Nuclear, 1996, p. 31.

³¹ Centro Nuclear México, *Nuestros inicios...*, pp. 31-32.

Los elementos principales del reactor son:

- A. Núcleo del reactor y elementos combustibles
- B. Control del reactor
- C. Piscina del reactor
- D. Blindaje³²

Está diseñado para operar en régimen transitorio o pulsado a una potencia máxima de 1,500 megawatts — durante un centésimo de segundo. De acuerdo con la CNEN, el reactor era una herramienta sumamente versátil y flexible, para investigación básica, el desarrollo tecnológico, la irradiación de materiales y la producción de radioisótopos. Se consideraba particularmente útil en la preparación del personal que operaría reactores de potencia para generar electricidad y desalar agua.

Los dispositivos experimentales del reactor incluían columnas térmicas horizontales y verticales y 12 tubos de haces de neutrones —puertos— y contaba, además, con una cámara de exposición de 3 metros de altura, 3.30 metros de ancho y 4.00 metros de longitud, en la que se podían irradiar especímenes de gran tamaño.³³

Instalaciones del reactor TRIGA Mark III:

- a) Un cuarto de exposición con un volumen muy grande, en el que se pueden irradiar sistemas biológicos, químicos, electrónicos, mecánicos, etc.
- b) Cuatro tubos radiales de 15 centímetros de diámetro para obtener haces de neutrones.
- c) Dos tubos tangenciales de 20 centímetros de diámetro.
- d) Una columna térmica vertical y una horizontal con cuatro accesos para obtener haces de neutrones térmicos y con un espacio interno para irradiación.
- e) Un sistema rotatorio de irradiación, con cupo simultáneo para cientos de muestras, útil en la producción de radioisótopos y en el análisis por activación.
- f) Un sistema neumático a fin de transferir muestras al núcleo.

³² Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, <http://inin.gob.mx/publicaciones/Çdocumentospdf/51%20INSTALACIONES.pdf>, fecha de consulta: 28 de abril de 2017.

³³ Comisión Nacional de Energía Nuclear. *Memoria de labores, 1°. de septiembre de 1969 al 31 de agosto de 1970*, México, Comisión Nacional De Energía Nuclear, 1970, p. 34.

- g) Espacios dentro del núcleo destinados a experimentos con muestras hasta de 11 cm de diámetro³⁴.

El reactor TRIGA Mark III, de un megawatt de potencia térmica, alcanzó su primera criticidad (reacción autosostenida),³⁵ el 8 de noviembre de 1968 a las 11:10 horas, fue el momento, en el que podemos decir en términos coloquiales, que se echó a andar el reactor y se realizó de forma sostenida y controlada la reacción en cadena.

El equipo de trabajo que hizo funcionar el TRIGA fue el siguiente: Arnulfo Morales Amado, operador —el único integrante con licencia para manejar un reactor—; Fernando López Carrasco, ayudante del operador; Enrique Ortega Espinosa, carga de elementos combustibles; Felipe Razo, ayudante; Charles Coffey y Michael de Groot, supervisores de la Gulf General Atomic. En esta primera criticidad del reactor del Centro Nuclear, estuvieron también presentes Carlos Graef Fernández, Alberto Barajas, Antonio Ponce, Romeo España, Ignacio Maldonado, Ricardo Corona y Víctor Ley Koo.

La noche de ese día la reacción en cadena continuaba, a las 23:10 horas, Graef propuso continuar la carga de combustible hasta completar el número previsto para producir la potencia térmica de un megawatt y, por primera vez, se observó en el Centro Nuclear el aura azul celeste del efecto Cherenkov.³⁶ Al principio de la actividad, el Mark III producía Sodio 24 y Potasio 44 para el Instituto Nacional de Nutrición que se enviaba los martes y los jueves en un vehículo de la CNEN.³⁷

El arribo del combustible nuclear a la Ciudad de México fue coordinado con el Ejército Mexicano, la Policía Federal de Caminos y otros cuerpos de

³⁴ Antonio Ponce M., *El reactor Triga Mark III del Centro Nuclear de México*, México, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (Serie divulgación, 5), septiembre, 1980, pp. 4-5; y Arnulfo Morales, *et al.*, “Reactor TRIGA Mark III del Centro Nuclear de México, descripción, construcción, montaje y operación”, en *Revista Mexicana de Física*, vol. 19, no. 2, 1970, pp. S27-S78.

³⁵ De acuerdo con el OIEA, “Criticidad es el estado de un medio que experimenta una reacción nuclear en cadena, cuando esta reacción está justo en el punto en que se auto-sostiene (es crítica), es decir, cuando la reactividad es cero”, o también: artefacto “capaz de mantener una reacción nuclear en cadena”, Organismo Internacional de Energía Atómica, *Glosario de seguridad tecnológica del OIEA. Terminología empleada en seguridad tecnológica nuclear y protección radiológica*, Viena, Organismo Internacional de Energía Nuclear, 2007, p. 42, http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/IAEASafetyGlossary2007/Glossary/SafetyGlossary_2007s.pdf, (28/04/2017).

³⁶ En 1934, el físico soviético Pavel Alekseevich Cherenkov, realizó experimentos con radiación alfa o beta muy energética, a partir de los cuales observó que, al bombardear una botella llena de agua, *esta brillaba con una luz azulada*. Este efecto se denominó, en su honor, *efecto Cherenkov*, y la radiación suele llamarse *radiación de Cherenkov*, en *Wordpress*, <https://radiaciondechernenkov.wordpress.com/>, (2/05/2017).

³⁷ Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, *El Centro Nuclear México*, México, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, s/f, pp. 31-33.

seguridad creados especialmente para custodiar la carga, mientras se verificaban minuciosamente los niveles de radiación.

*EL ACELERADOR TANDEM VAN DE GRAAFF. INVESTIGACIÓN
CON ELECTRICIDAD DE ALTA INTENSIDAD*

Otra de las áreas que operaron desde el principio en el Centro Nuclear fue la Dirección del Acelerador. El instrumento principal de la Dirección fue un acelerador Tandem Van de Graaff. Este equipo fue adquirido a la empresa High Voltage Engineering Corporation (HVEC). Fundada en 1947 por Robert J. Van de Graaff (1901-1967), Denis M. Robinson (1907-¿?), y John G. Trump (1907-1985). Esta compañía desarrolló y fabricó sistemas aceleradores de partículas, reguladores eléctricos, instrumentos de análisis de superficies, equipos de monitoreo y conectores modulares de potencia. Fabricó suministros para generadores electrostáticos usados en la terapia de cáncer, radiografía y estudios sobre la estructura nuclear. En 1967 la corporación tenía cuatro empresas subsidiarias, Electronized Chemicals Corporation, Glass Grinding Corporation, HVE Europa The Netherlands e Ion Physics Corporation.³⁸

El van de Graaff, como es mejor conocido el acelerador, fue el segundo que llegó a México,³⁹ considerado como uno de los aparatos de investigación más finos de su época, se entregó a la CNEN después de haber alcanzado las características de operación especificadas, el 15 de marzo de 1968. Era un acelerador de iones positivos, estos iones se lanzaban contra los blancos (otras partículas o átomos) que se deseaba investigar, después de ser acelerados, hasta adquirir una energía considerable (electricidad de alta intensidad). Las investigaciones del acelerador consistían en obtener información experimental sobre la estructura de los núcleos de los átomos, lo que permitiría un mayor conocimiento de la estructura de la materia. Las líneas de vacío y los dos grandes deflectores del acelerador fueron diseñados y construidos en el Instituto de Física de la UNAM. Asimismo, las cámaras de vacío que albergaban los blancos y los sistemas de detección fueron diseñadas y construidas por los investigadores asociados a la Dirección del Acelerador.

En el acelerador Van de Graaff se cargaba de electricidad una esfera metálica hueca encerrada en un recipiente también metálico, rodeada de bióxido de carbono y de nitrógeno a presión. Una banda de nylon ahulada trans-

³⁸ Massachusetts Institute of Technology. Institute Archives and Special Collections (MIT), Guide to the Records of the High Voltage Engineering Corporation, 1933-1969 MC.0153, <https://libraries.mit.edu/archives/research/collections/collections-mc/mc153.html#ref4>, (Consulta el 2/05/2017); y Bloomberg.com, <http://www.bloomberg.com/research/stocks/private/snapshot.asp?privcapId=29452>, (2/05/2017).

³⁹ El primero llegó en 1950 al Instituto de Física de la UNAM, Adriana Minor García, "El acelerador Van de Graaff mexicano. Entre el internacionalismo científico de la posguerra, la modernización y la consolidación de la física en México", en Wordpress, <https://seminariodeinstrumentos.files.wordpress.com/2011/11/minor.pdf>, (2/05/2017).

portaba mecánicamente electricidad a la esfera hueca llamada “electrodo”. Esta esfera se cargaba hasta adquirir un potencial eléctrico positivo de 12 millones de voltios. A las moléculas, cuyos núcleos iban a servir como proyectiles en el acelerador, se les “montaba” un electrón. Estas moléculas (con una carga negativa) atravesaban de un extremo a otro el tubo acelerador. La esfera antes mencionada, cargada de electricidad positiva se encontraba en el centro del tubo. Las moléculas cargadas “sentían” la atracción de la esfera central y se aceleraban. Varios electroimanes guiaban a las partículas aceleradas que más adelante chocaban con los blancos.⁴⁰

Este aparato permitía llevar a la práctica (física experimental), los resultados obtenidos en la física teórica. En 1970, la CNEN afirmaba que los resultados obtenidos en el trabajo científico del acelerador situaban a nuestro país en un puesto de vanguardia en América Latina y llamaba la atención de importantes centros de investigación en otros países. La investigación sobre la estructura nuclear era uno de los problemas de mayor interés científico en el mundo, particularmente en lo relativo a experimentos nucleares de altas precisiones comparables a los que utilizaban otros grupos de investigadores en países en estado muy superior de desarrollo.

De tal forma, que se realizaban dos proyectos a los que la CNEN concedía importancia: un acelerador de electrones y un separador magnético, cuya construcción se realizó en los talleres generales. Para utilizar en forma óptima el Acelerador Tandem, se autorizó su operación de lunes a jueves de cada semana durante las 24 horas del día, reservando los viernes a trabajos de mantenimiento y a la realización de seminarios sobre las investigaciones realizadas.⁴¹

Los dos aparatos más importantes del Centro Nuclear de México, requirieron una inversión de 25,000,000 de pesos mexicanos, y fueron el reactor Triga Mark III de un MW de potencia y el acelerador Van de Graaff Tandem de 12 millones de electrones-volt. Hasta hoy no hemos podido encontrar el costo individual de cada equipo.⁴²

CONCLUSIONES

Las preguntas de este artículo fueron: ¿Qué es la radiación? ¿Para qué sirve? y ¿Cómo se utiliza? Este escrito da respuesta parcial a ellas, pudimos dar la definición de radiación y dos de sus ejemplos: la energía nuclear y la electricidad de alta intensidad. En cuanto a la utilidad y uso de estas dos formas de energía, en este documento sólo mostramos una parte de ello, a través de los

⁴⁰ Centro Nuclear México, *Nuestros inicios...*, pp. 31-32.

⁴¹ Comisión Nacional de Energía Nuclear. *Memoria de Labores, 1° de septiembre de 1969 al 31 de agosto de 1970*, México, 1970, p. 37.

⁴² *Ibidem*, p. 31.

aparatos que producían esas dos formas de energía en el CNM y las investigaciones que se llevaban a cabo con ellas.

En este artículo se describieron y analizaron los dos aparatos más importantes del Centro Nuclear de México, que se constituyeron en los dos principales laboratorios de investigación en este lugar. Investigación que se realizó con energía nuclear a través de radiación y electricidad de alta intensidad. Es decir, que eran los dos ingenios que produjeron la energía para la investigación que se llevó a cabo en el Centro, falta detallar qué tipo de investigaciones y cómo se desarrollaron utilizando dichos aparatos. Asimismo, cuál era el impacto esperado de las investigaciones que se realizaron. También es importante acotar que algunas de las investigaciones se iniciaron en las instalaciones que la Comisión Nacional de Energía Nuclear tenía esparcidas por la ciudad de México.

Algunas de esas investigaciones fueron sobre la utilización de radio isótopos y algunas de sus aplicaciones y otras de física teórica nuclear, por ello, es importante reconstruir primero la historia de los dos aparatos de investigación principales del CNM: El Reator TRIGA Mark III (energía nuclear) y el acelerador de particular Tandem Van de Graaff (electricidad de alta intensidad), para después entrar al detalle de cuáles fueron las investigaciones en física y química experimentales llevadas a cabo en el mismo Centro.

FUENTES

ACERVOS

Centro de Información y Documentación del Sector Nuclear “Nabor Carrillo” CIDSN.

Massachusetts Institute of Technology. Institute Archives and Special Collections (MIT), Guide to the Records of the High Voltage Engineering Corporation, 1933-1969 MC.0153, <https://libraries.mit.edu/archives/research/collections/collections-mc/mc153.html#ref4>, (Consulta el 2/05/2017).

Taller Laboratorio de Historia de la Ciencia y la Archivística (TLHCA) Fondo Manuel Sandoval Vallarta, Sección Institucional, Subsección: Comisión Nacional de Energía Nuclear.

BIBLIOGRAFÍA

Azuela, Fernanda y José Luis Talancón, *Contracorriente. Historia de la energía nuclear en México (1945-1995)*, México, CEPE, Instituto de Geografía, Instituto de Investigaciones Sociales, Universidad Nacional Autónoma de México, Plaza y Valdes, 1999.

Lazarín, Federico y Hugo Pichardo (coords.), *La utopía del uranio. Política energética, extracción y explotación del uranio en México*, México, Biblioteca Nueva, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, 2015.

Uramex, *Presencia de Uramex en el desarrollo de México*, México, Uranio Mexicano, 2 tomos, 1980.

HEMEROGRAFÍA

Centro Nuclear de México, *Nuestros inicios*, México, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, s/f.

Comisión Nacional de Energía Nuclear, *Memoria de Labores 1° de septiembre de 1968 al 31 de Agosto de 1969*, sin lugar, CNEN, 1969.

Comisión Nacional de Energía Nuclear, *Memoria de Labores, 1° de septiembre de 1969 al 31 de agosto de 1970*, México, Comisión Nacional de Energía Nuclear, 1970.

García, Blanca y Lizbeth Cortés, "La política gubernamental para la creación del programa nuclear en México: 1955-1979", en *Ciencia Nicolaita*, No. 63, diciembre de 2014, pp. 50-60.

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, *Contacto Nuclear*, México, ININ, No. 56, 2010.

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, *El Centro Nuclear México*, México, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, s/f.

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, *Cuarenta años de usos pacíficos de la energía nuclear*, México, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (Folleto histórico), 1996.

Minor García, Adriana, "El acelerador Van de Graaff mexicano. Entre el internacionalismo científico de la posguerra, la modernización y la consolidación de la física en México", en WordPress, <https://seminariodeinstrumentos.files.wordpress.com/2011/11/minor.pdf>.

Ponce M., Antonio, *El reactor Triga Mark III del Centro Nuclear de México*, México, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (Serie divulgación, 5), septiembre, 1980.

Ponce M., Antonio, *Los reactores nucleares*, México, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, (Serie Divulgación), 1980.

Organismo Internacional de Energía Atómica, *Glosario de seguridad tecnológica del OIEA. Terminología empleada en seguridad tecnológica nuclear y protección radiológica*, Viena, Organismo Internacional de Energía Nuclear, 2007, p. 42, http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/IAEASafetyGlossary_2007/Glossary/SafetyGlossary_2007s.pdf, (28 04 2017).

ELECTRÓNICAS

Bloomberg.com, <http://www.bloomberg.com/research/stocks/private/snapshot.asp?privcapId=29452>, (2/05/2017).

General Atomics, <http://www.ga.com/history>, (28/12/2018).

Company Histories.com, <http://www.company-histories.com/General-Atomsics-Company-History.html>, (28/05/2017).

<http://www.rcp.ijs.si/ric/export/image1.gif>, (28/04/2017).

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, <http://inin.gob.mx/publicaciones/documentospdf/51%20INSTALACIONES.pdf>, (28/04/2017).

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, http://inin.gob.mx/mini_sitios/segundo_plano.cfm?cve_area=RN&codigo_opc=400008000, (2/05/2017).

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, <http://www.inin.gob.mx/publicaciones/documentospdf/PRESENTACIÓN1.pdf>, (21/05/ 2013).

Massachusetts Institute of Technology Museum, <http://museum.mit.edu/nom150/entries/1335>, (2/05/2017).

Universidad del País Vasco, http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/campo_electrico/graaf/graaf.htm, (2/05/2017).

WordPress, <https://radiaciondecherenkov.wordpress.com/>, (2/05/2017).