

Apps nucleares

Divulgación de la ciencia y tecnología nucleares para jóvenes
Año 4, enero-junio, 2018

Edición especial de instalaciones

No. 7



instituto nacional de
investigaciones nucleares

DIRECTORIO

Dra. Lydia Paredes Gutiérrez

Directora General

Dr. Federico Puente Espel

Director de Investigación Científica

Dr. Pedro Ávila Pérez

Director de Investigación Tecnológica

Ing. José Walter Rangel Urrea

Director de Servicios Tecnológicos

M.A. Hernán Rico Núñez

Director de Administración

Mtra. María de los Ángeles Medina

Titular del Órgano Interno de Control

Dr. Julián Sánchez Gutiérrez

Secretario Técnico

Concepción creativa y coordinación editorial

Mtra. Elizabeth López Barragán
Coordinadora de Promoción y Divulgación Científica

Asistencia de redacción

Lic. Víctor Octavio Hdez. Ávila

Fotografía

Pável Azpeitia de la Torre
Armando Iturbe German
123RF

Ilustraciones

Angélica Balderrama

Formación

Grupo Comersia,
por Karen Hdez.

> CONTENIDO

1 Editorial
LYDIA PAREDES GUTIÉRREZ

2 Auténtica súper velocidad
Acelerador Tandem Van de Graaff (ATVG)
JUAN ANDRÉS ASPIAZU FABIÁN

5 La difracción delatora
Laboratorio de Difracción de Rayos X (LDRX)
DEMETRIO MENDOZA ANAYA

8 Cazafantasmas nucleares
Laboratorio para el Desarrollo e Innovación en Medición y Mitigación de Emisiones (Ladimme)
SERGIO TORAL REBOLLEDO

11 Lo más diminuto del aire
Acelerador Tandetrón
FRANCISCA ALDAPE UGALDE

14 El núcleo celeste del conocimiento
Reactor TRIGA Mark III
PASTOR ENRÍQUEZ CRUZ

17 La imagen segura
Laboratorio de Control de Calidad y Protección Radiológica en Imagenología (Laccprim)
JUAN GARCÍA AGUILAR

20 Detectives de huellas nucleares
Laboratorio Nacional de Investigaciones en Forense Nuclear (Lanafonu)
ALBERTO CEDILLO CRUZ

23 Biosensores, la alerta oportuna
Laboratorio Nacional de Investigación y Desarrollo de Radiofármacos (Lanider)
NALLELY PATRICIA JIMÉNEZ MANCILLA

26 Sustancia activa de la medicina nuclear
Planta de Producción de Radiofármacos (PPR)
EDILBERTO GARZA VIELMA

Año 4, número 7, enero-junio, 2018

APPS Nucleares es una publicación semestral de divulgación científica para jóvenes, editada por el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), Centro Nuclear "Dr. Nabor Carrillo Flores", Carr. México-Toluca, La Marquesa, s/n, Ocoyoacac, Estado de México, C.P. 52750. Tel. 5329 7219

Editora responsable Elizabeth López Barragán.
elizabeth.lopezbarragan@inin.gob.mx
Reserva de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2017-022808542200-01, ISSN:2448-8593, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Los artículos presentados son responsabilidad de los autores. Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del ININ. Se autoriza la reproducción parcial de la publicación siempre que se cite la fuente.

Hecha e impresa en México por Comersia Impresiones, SA de CV, con domicilio en Insurgentes Sur 1793-207, Guadalupe Inn, C.P. 01020, este número se terminó de imprimir el 31 de diciembre de 2017, con un tiraje de 2 mil ejemplares.

Distribución gratuita.

Apps nucleares



ININmx



@inin_mx



gob.mx/inin



ININmx



ININmx

EDITORIAL



No se puede concebir el desarrollo de la investigación científica sin la existencia de los laboratorios o de la infraestructura y condiciones requeridas para llevarla a cabo. Hasta en las películas de "Santo, el enmascarado de plata", es célebre el laboratorio donde este famoso luchador mexicano realizaba investigaciones para encontrar técnicas de solución que le ayudaran a combatir a los malhechores. Tampoco son desconocidos los laboratorios donde todos los días buscan conquistar al mundo, los singulares personajes de la serie de televisión animada *Pinky y Cerebro*.

Gracias al impulso y visión de destacados científicos e intelectuales mexicanos, en el invierno de hace 62 años, el primer día del año 1956 fue creado el primer organismo en México dedicado al desarrollo de la ciencia y la tecnología nuclear con fines pacíficos. Unos años después inició la construcción del centro que, con instalaciones únicas en su tipo, se convertiría en el recinto de la ciencia nuclear en México.

La actual sede del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), el Centro Nuclear "Dr. Nabor Carrillo Flores", cuenta con una comunidad multidisciplinaria de más de 700 científicos y profesionales dedicados a la investigación, desarrollo tecnológico e innovación en ciencias y tecnologías nucleares. En sus instalaciones y laboratorios, ubicadas en una zona boscosa del Estado de México, se investigan y desarrollan aplicaciones nucleares en áreas de salud, ambiente, energía, industria, arte, agricultura y protección radiológica, entre las más destacadas, además de la correspondiente formación de talento humano altamente especializado.

La ciencia y la tecnología enriquecen el patrimonio cultural de las naciones y estimulan su capacidad para innovar, por lo que son elementos clave del desarrollo sostenible y equilibrado de las sociedades globales contemporáneas. A poco más de cinco décadas, el recinto de la ciencia nuclear en México mantiene su amplio potencial para continuar trabajando en la investigación y desarrollo de las aplicaciones pacíficas de la ciencia nuclear, que contribuyen al desarrollo sostenible de nuestra nación y el mundo.

LYDIA PAREDES GUTIÉRREZ

Es doctora y maestra en Ciencias en Física Médica por la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM). Realizó los estudios de Maestría en Ciencias en Ingeniería Nuclear en el Instituto Politécnico Nacional (IPN) y la Ingeniería en Energía en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM).

Es directora general del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) desde 2013 y presidenta del Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y Tecnología Nucleares en América Latina y El Caribe (ARCAL), del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) (2017). También es presidenta de la Sección Latinoamericana de la American Nuclear Society (LAS/ANS).

En reconocimiento a su amplia trayectoria profesional fue galardonada con el premio a "La Personalidad del Año 2017", por la Sección Latinoamericana de la American Nuclear Society. Ha sido nombrada egresada distinguida de la UAM y reconocida por su trayectoria profesional por la Fraternidad Institutense de la UAEM.

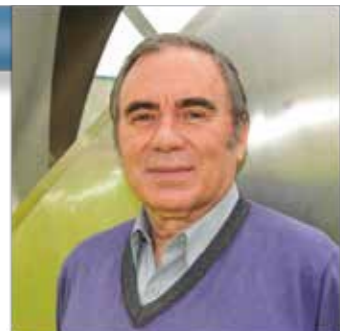
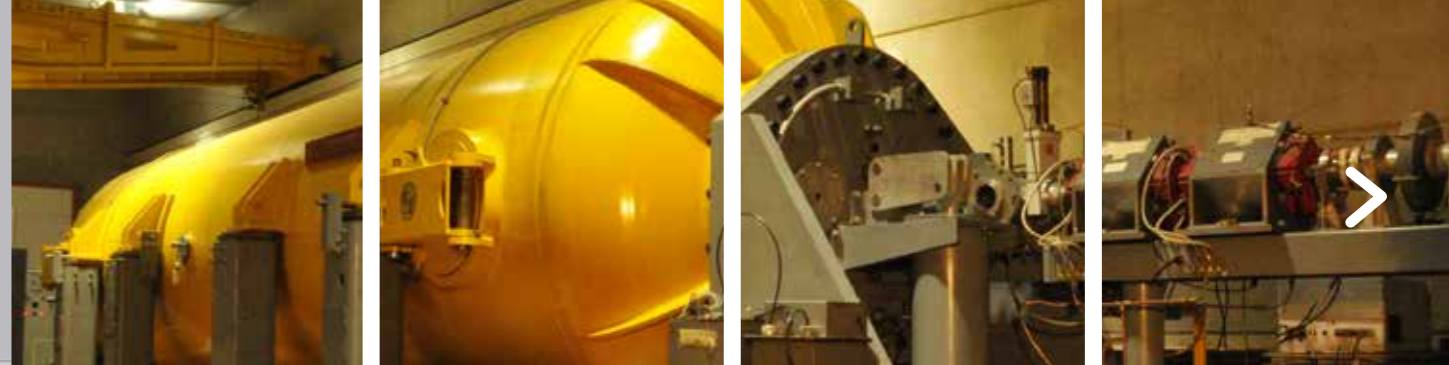
Admira a Elvira Carrillo Puerto por su lucha incansable de los derechos de las mujeres. El adjetivo que la describe es *comprometida*. Le gustaría tener más tiempo para pintar.





Auténtica súper velocidad

Acelerador Tandem Van de Graaff | ATVG



JUAN ANDRÉS ASPIAZU FABIÁN

Imagina algo capaz de alcanzar altísimas velocidades, poseer visión atómica y tener la capacidad de generar conocimiento en innumerables ciencias. Te sorprenderás, pero en realidad existe y su nombre es el Acelerador Tandem Van de Graaff (ATVG), en cuyo laboratorio se lleva a cabo investigación para el desarrollo de las aplicaciones de la ciencia nuclear en México.

¿Te imaginas poder alcanzar la velocidad suficiente para darle la vuelta al mundo en unos cuantos segundos, a la manera de *Flash*, el ser más rápido de los cómics? En realidad existe un dispositivo que es capaz de producir velocidades inimaginables. Se trata del Acelerador Tandem Van de Graaff (ATVG) y puede hacer que un protón le dé más de una vuelta a la Tierra en tan solo un segundo.

Con el auge de la ciencia nuclear en la década de 1940 comenzó a dársele importancia a la investigación y desarrollo de áreas del conocimiento, como la física nuclear, reactores nucleares, radioisótopos, agronomía y genética. Fue en ese momento cuando se consideraron seriamente los múltiples beneficios de las aplicaciones de la tecnología nuclear.

Una de las áreas que causaba mayor interés era el estudio de fenómenos a nivel atómico. Para realizar investigaciones a ese nivel era necesario el uso de aceleradores de iones energéticos. Por ello, el 15 de marzo de 1968 el Acelerador Tandem Van de Graaff (ATVG) entró en funcionamiento en el Centro Nuclear "Dr. Nabor Carrillo Flores", sede del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

El Acelerador Tandem Van de Graaff dio inicio a la implementación experimental de investigación básica mediante técnicas como dispersión elástica, reacciones nucleares con proyectiles ligeros, iones pesados y espectroscopía, entre muchas otras.

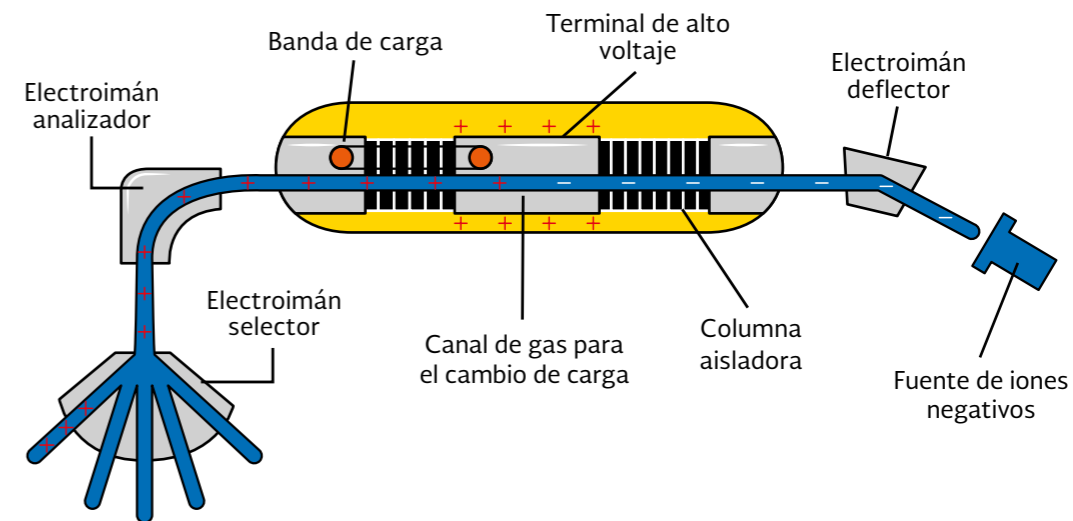
Pero vamos por partes. El término acelerador describe literalmente el funcionamiento de la súper máquina, ya que se trata de un conductor aislado donde se acumula una gran cantidad de carga que produce un campo eléctrico de alta intensidad (y relativamente uniforme), utilizado para acelerar partículas atómicas cargadas (iones) a velocidades altísimas, capaces de hacer que un protón le dé alrededor de dos vueltas al mundo en un segundo.

Mediante la alta velocidad de un ion es posible vencer la fuerza de repulsión del núcleo y así establecer las condiciones de interacción con el núcleo de un átomo o los electrones que lo rodean. Al colisionar el ion con el átomo la energía transferida al mismo, produce una excitación energética, que deriva en la emisión de radiación para que el átomo vuelva a adquirir una configuración energética estable.

La radiación emitida por el proceso mencionado puede ser de distintos tipos (siempre característica del átomo emisor). La radiación secundaria permite indirectamente la identificación y el estudio de las propiedades del átomo emisor, al transformarse en señales electrónicas (las cuales se clasifican según su energía) y esa información finalmente se despliega en forma de "espectro" (gráfica con eje horizontal en energía y vertical en número de cuentas).

En el Acelerador Tandem Van de Graaff se emplean las técnicas Ion Beam Analysis (IBA), aplicadas (según sus características) para determinar propiedades del átomo, análisis de ma-

Esquema de un acelerador Tandem



teriales o para realizar aplicaciones en diversas disciplinas científicas.

El empleo de las técnicas IBA proporcionan ventajas analíticas, con una precisión promedio de partes por millón, confiabilidad casi al 100%, análisis no destructivos, análisis superficiales de hasta 200 micras y análisis elemental simultáneo del hidrógeno al uranio. Estas técnicas se utilizan principalmente para la caracterización elemental de diversos tipos de muestras, producción de neutrones por reacciones nucleares, estudios de estructura nuclear por resonancias nucleares y obtención de nuevos materiales.

En las últimas décadas, el desarrollo de la tecnología de aceleradores ha potenciado el alcance de aplicaciones en múltiples áreas como investigación básica y aplicada, biología, tratamiento de gases de combustión y agua, desarrollo de fármacos, desechos médicos y nucleares, investigación del cáncer, identificación de materiales, cambio climático y energías alternativas, celdas de combustibles de hidrógeno, biocombustibles, dispersión de neutrones y muchas otras áreas.

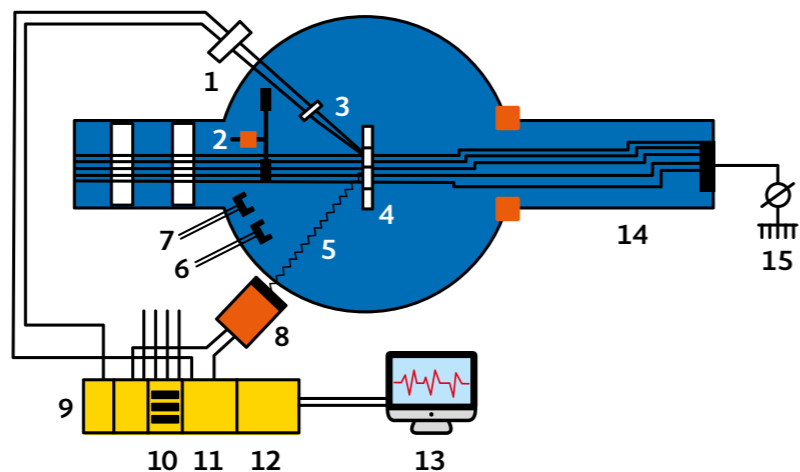
Como ejemplos específicos se pueden mencionar los siguientes:

1. Estudios de la bioconcentración de metales en líquenes para identificar qué tipo de contaminantes hay en la zona.
2. Determinar la cantidad de nitrógeno en semillas de trigo para conocer el valor proteínico (la cantidad de nitrógeno presente se relaciona con este último valor).
3. Irradiar larvas de mosquita de la fruta (*drosophila melanogaster*) con neutrones, para provocar alteraciones en el ADN y entonces saber los efectos que podría causar el recibir ese tipo de radiación como seres humanos.

En el mundo existen cerca de 30 mil aceleradores de diversos tipos dedicados a diferentes propósitos. En México, el ATVG es único en su tipo, ya que está especializado en la investigación, además de ser capaz de proporcionar una gran energía a átomos ionizados, lo cual es una ventaja analítica, dado que existen experimentos o aplicaciones de interés en investigación o aplicaciones con iones a altas energías.



Arreglo experimental típico "Ion Beam Analysis" (IBA)



1. Detector para rayos X, Si(Li) (silicio con litio difundido)
2. Dispositivo para medición indirecta de carga en la muestra "Chopper"
3. Rayos X producidos en la muestra por impacto de iones en la muestra
4. Muestra que se estudia
5. Rayos gamma producidos en la muestra por impacto de iones en la muestra
6. Iones retrodispersados en la muestra
7. Detectores de Iones retrodispersados de silicio de barrera superficial
8. Detector para rayos gamma, Ge(Li) (germanio con litio difundido)
9. Amplificador de señales eléctricas
10. Fuentes de voltaje
11. Convertidor de pulsos analógicos a digitales
12. Analizador de pulsos electrónicos "multicanal"
13. Espectro energético de la radiación producida en la muestra
14. Medidor de corriente "caja de Faraday" de iones que traspasan la muestra
15. Integrador de carga en la caja de Faraday

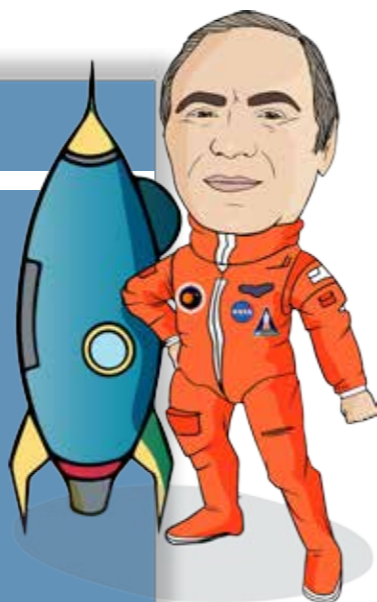
Además, la gran diversidad de iones que pueden ser utilizados en el ATVG se producen con una "fuente de iones" tipo SNICS (Source of Negative Ions by Cesium Sputtering). Así, la diversidad de iones y energías posibles convierten al ATVG en

la principal herramienta analítica en física nuclear en el país, con lo que incontables esferas del conocimiento han sido beneficiadas y estudiadas a nivel atómico, desde 1968 hasta el día de hoy.

JUAN ANDRÉS ASPIAZU FABIÁN

Estudió el Doctorado en Física Nuclear en la Universite Louis Pasteur, Strasbourg, en Francia. Actualmente es Jefe del Departamento de Aceleradores.

Está orgulloso de sus hijos. Su relato favorito es *Le Petit Prince* de Antoine de Saint Exupéry. Su fruta predilecta es el mango manila. Su pasatiempo favorito es hacer ejercicio, ver béisbol y leer a Stephen Hawking, en especial el libro *El gran diseño*. Su personaje histórico favorito es Nelson Mandela. Desde niño sentía curiosidad por saber qué había en las estrellas y anhelaba viajar hacia el espacio. Se identifica con la frase: "para mantener el equilibrio hay que mantenerse en movimiento" de Albert Einstein. El adjetivo que lo describe es *receptivo*.



INDUSTRIA



La difracción delatora

Laboratorio de Difracción de Rayos X | LDRX

DEMETRIO MENDOZA ANAYA

La ciencia y la tecnología nos han permitido iluminar el oscuro camino de la ignorancia. Poco a poco hemos logrado conocer más de nosotros mismos y de todo lo que nos rodea. Eso incluye los materiales. Entérate cómo la difracción de rayos X es el procedimiento ideal para saber más sobre la materia.



Desde la antigüedad, el hombre primitivo supo aprovechar los materiales que la naturaleza le ofrecía. En un principio, el uso que le dio a los materiales fue rudimentario, enfocado únicamente a su supervivencia: materiales *blandos* para protegerse de los fenómenos naturales y materiales *duros* para defenderse de los depredadores y obtener alimentos.

Con el paso del tiempo el hombre acumuló experiencias y aprendió a modificar los materiales en su beneficio. Por ejemplo, descubrió que al exponerlos al fuego transformaba sus características volviéndolos más duros (cerámica), maleables (metal) e incluso podía combinarlos para mejorar sus cualidades (aleaciones).

Además, el ser humano comenzó a razonar sobre los sucesos que ocurrían a su alrededor y se planteó diversas interrogantes, entre ellas, ¿de qué está conformada la materia? El filósofo griego Demócrito (460-370 a.C.) fue uno de los primeros en proponer la existencia de unidades fundamentales de la materia a las que llamó "átomos" (del griego *átomon*, aquello que no se puede dividir). Tiempo después, Joseph Louis Proust descubrió que los elementos siempre se combinaban en proporciones definidas de peso para formar compuestos y estas proporciones siempre eran números enteros, es decir, que la materia estaba constituida por bloques indivisibles de construcción. En 1808, John Dalton presentó su teoría del átomo, en la que proponía que cada elemento estaba compuesto por átomos iguales y exclusivos, y que aunque eran indivisibles e indestructibles se podían asociar para formar compuestos químicos. Después, en 1869, Dmitri Mendeleiev desarrolló una tabla periódica de los elementos según el orden creciente de sus masas atómicas.



Calor + Barro, Yeso, Arcilla = **Endurecimiento**

- ladrillos
- porcelanas
- cerámicas



Calor + Metal = **Maleabilidad**

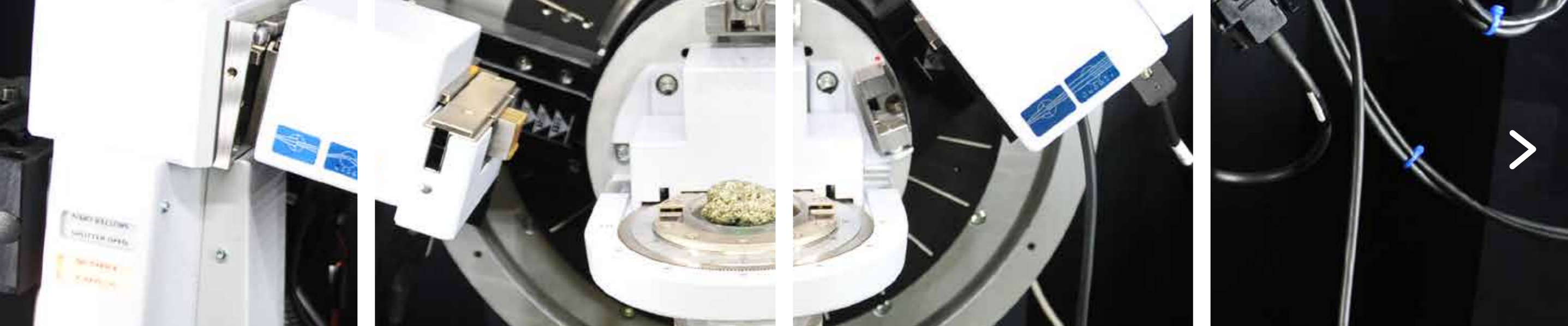
- orfebrería
- metalúrgica



Calor + Combinación de dos o más elementos (usualmente metales) = **Aleación**

- acero
- latón
- bronce



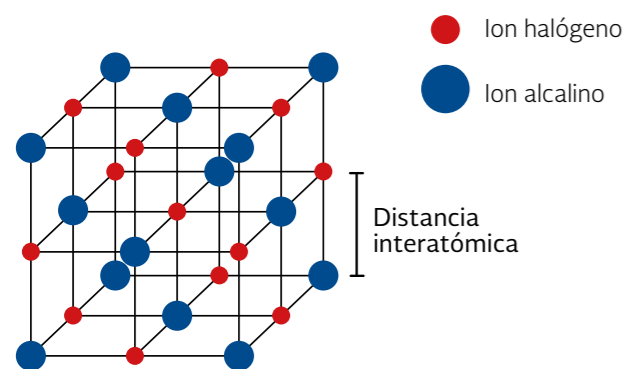


Gracias a toda la teoría desarrollada anteriormente, hoy en día sabemos que la materia se constituye por átomos, también qué tipo de átomos están presentes en la materia y la forma en que se enlazan entre sí, además de cómo definen las características y propiedades del compuesto que forman, entre otras particularidades.

Los materiales pueden ser cristalinos o amorfos. Los átomos de los materiales cristalinos se sitúan en una posición ordenada a lo largo de muchas distancias atómicas y en diferentes direcciones, cada átomo se encuentra enlazado con su vecino más próximo. Cuando no existe un orden de largo alcance, se dice que el material no cristaliza, es decir, es un material amorfo. Muchas de las propiedades de los materiales (dureza, densidad, tenacidad, conductividad térmica, conductividad eléctrica, propiedades ópticas, etc.) dependen de su grado de cristalinidad o de cómo se ordenan los átomos, iones y moléculas.

Para entender el comportamiento de la mayoría de los materiales es necesario determinar el tipo

Ordenamiento cristalino del cloruro de sodio (NaCl)



y grado de ordenamiento cristalino que poseen. Existen múltiples métodos y técnicas que permiten conocer con bastante precisión la cristalinidad de los materiales. Por la rapidez y precisión de información que brinda, la difracción de rayos X es una de las técnicas más eficaces.

La difracción de rayos X es un fenómeno físico en el que al interactuar los rayos X con objetos ordenados, como los materiales cristalinos, son dispersados a diferentes ángulos, formando patrones de difracción característicos del material cristalino en estudio. La dispersión sucede debido a que la longitud de onda de los rayos X es similar a las distancias interatómicas de los materiales cristalinos. Este hecho permite utilizar la difracción de rayos X como método para explorar la estructura molecular de los materiales.

Conocer el ordenamiento atómico de los materiales es de suma importancia en las diferentes áreas de la ciencia y la tecnología, a tal grado que todo centro de investigación, independientemente de sus líneas de investigación, tiene un laboratorio de difracción de rayos X. En 1995, el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) creó el Laboratorio de Difracción de Rayos X (LDRX), adquiriendo un difractómetro de rayos para polvos. En 2016 se adquirió, con el apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), un nuevo difractómetro de rayos X con mayor sensibilidad en su sistema de detección, que permite obtener información cristalográfica (difractogramas) con mayor resolución.

En el LDRX se puede determinar la pureza de la materia prima y la calidad de sus productos en sectores como el automotriz, de pinturas, cementos, vidrios, farmacéutica, etcétera. La amplia variedad de materiales que pueden ser analizados con esta técnica abarcan metales y óxidos metá-

licos, minerales, cerámicos y bio-cerámicos, huesos, cementos, arcillas, pinturas, catalizadores, recubrimientos, polímeros, nanomateriales, materiales históricos y prehistóricos, entre muchos otros.

Con la modernización del LDRX, el ININ se ha vuelto a posicionar como uno de los institutos de investigación con mayor capacidad de análisis en difracción de rayos X y cristalografía en México.



DEMETRIO MENDOZA ANAYA

Estudió la Licenciatura en Física y la Maestría en Ciencias Nucleares en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y posteriormente el Doctorado en Ingeniería de Materiales en la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). Colabora en el Departamento de Tecnología de Materiales.

Está orgulloso de su familia, de sus raíces "Hñahñu" (lengua de origen otomí) y de trabajar en el ININ. Disfruta mucho correr. Sus frutas favoritas son los duraznos y las tunas. Uno de sus libros predilectos es *Lobo estepario* de Hermann Hesse. Admira a Benito Juárez y se identifica con su frase: "El respeto al derecho ajeno es la paz". El adjetivo *perseverante* es el que más lo describe.



Cazafantasmas nucleares

Laboratorio para el Desarrollo e Innovación en Medición y Mitigación de Emisiones | Ladimme



SERGIO TORAL REBOLLEDO

“Los monstruos son reales y los fantasmas también: viven dentro de nosotros” es una frase del escritor Stephen King, que además de invitarnos a la reflexión también resulta muy cierta. Los fantasmas existen, aunque no de la forma en que solemos imaginarlos. Conoce los fantasmas que aparecen y afectan distintos tipos de instalaciones y equipos, y cómo entran en acción los “cazafantasmas nucleares” a solucionar los problemas.

Es probable que recuerdes la emblemática película de la década de los ochenta titulada *Los cazafantasmas*. Esta cinta relata las aventuras de un equipo de expertos que abren un laboratorio especializado con el propósito de investigar fenómenos paranormales. Para ello, desarrollan su propia tecnología y anuncian sus servicios para capturar las manifestaciones “ectoplasmáticas” en la ciudad de Nueva York.

La película, por supuesto, plantea la aparición de fantasmas. Y aunque parezca increíble los fantasmas sí existen, pero no de la forma en que lo imaginas. En el Centro Nuclear “Dr. Nabor Carrillo Flores”, sede del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), se encuentra el Laboratorio para el Desarrollo e Innovación en Medición y Mitigación de Emisiones (Ladimme) encargado de medir y capturar diferentes tipos de fantasmas.

¿Qué entendemos por fantasmas? Nos referimos a los contaminantes que pueden aparecer en los lugares donde vivimos, estudiamos, jugamos o trabajamos, perjudicando de forma seria la salud de seres vivos, además de dañar los aparatos que usamos, por ejemplo, los equipos electrónicos.

La capacidad de estos fantasmas para hacer daño es impresionante. Se ocultan en los huecos de las moléculas del aire, del agua, del suelo, de las partículas, que a simple vista no se ven ni se huelen. Aunque hay excepciones, la mayoría toman ciertos colores, formas, características e incluso olores desagradables (como a huevo podrido) y además pueden llegar a ser muy tóxicos.

En algunos casos estos fantasmas contaminantes surgen de manera natural, pero su aparición tam-

bién es consecuencia de procesos industriales y deben ser capturados por su capacidad para hacer daño. Cuando un fantasma contaminante aparece es cuando llaman a los “Cazafantasmas nucleares” del Ladimme. Y para explicar cómo entran en acción te mostraré la siguiente bitácora de aventura.

Día 1. Identificar la necesidad y el tipo de fantasma

En enero de 2010 recibimos una llamada del encargado de una planta hidroeléctrica en la que describía la presencia de olor a huevo podrido y muchas fallas en los sistemas electrónicos, que provocaba paros de la planta, afectando la producción de electricidad. Acto seguido, los colaboradores del Ladimme arribamos al sitio para realizar mediciones del aire en toda la planta. Se tomaron muestras en filtros y de los componentes electrónicos con fallas. Mediante técnicas nucleares logramos identificar el fantasma contaminante: ácido sulfhídrico (H₂S).



Laboratorio portátil

Día 2. Prospectiva tecnológica, diseño y construcción para medir y atrapar al fantasma de H₂S

En el Área 1 del laboratorio los expertos investigaron lo último en tecnología para medir y mitigar el fantasma contaminante. Mientras tanto en el Área 2 se crearon cada una de las partes que integrarían la tecnología para medir y capturar el H₂S. Posteriormente, se desarrollaron diagramas electrónicos, planos técnicos, cálculos matemáticos, simuladores 3D de cada una de las piezas, ya que los requerimientos deben probarse virtualmente hasta dar con la solución.

Día 3. Validación de nuestra tecnología para medir y atrapar al fantasma de H₂S

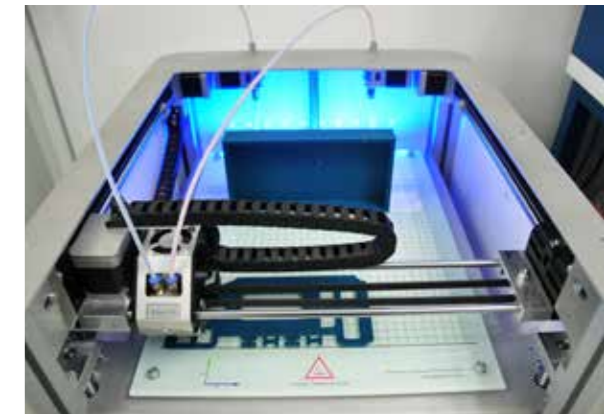
En el Área 3 del laboratorio (verificación y calibración) se probó que la tecnología de medición y captura desarrollada funcionara contra el fantasma contaminante. Para ello, se aplica la técnica nombrada validación por intercomparación, que consiste en colocar en un espacio hermético nuestra tecnología con otros equipos de medición, en este caso del H₂S. Después se abre un cilindro patrón que contiene una concentración conocida y certificada de fantasmas de H₂S. Mediante un equipo de dilución aprobado se liberan cantidades conocidas del fantasma y todos los equipos deben medir con exactitud esa concentración. Si nuestro equipo varía se ajusta hasta ponerlo a punto.

Finalmente, todos los resultados se grafican y se obtiene el certificado de validación de nuestra tecnología. Con respecto al equipo de captura, se hace pasar una concentración conocida del H₂S y a su salida no debe medirse su presencia, pues el fantasma debe quedar atrapado, en caso contrario también se ajusta hasta alcanzarlo.

Día 4. Implementación y garantía

Cuando la tecnología que utilizamos para medir y atrapar fantasmas de H₂S ha sido validada, comienza a implementarse en múltiples sitios de la planta hidroeléctrica, mediante una solución robusta y paneles solares para medir en áreas del personal (y otras en gabinetes herméticos con electrónica sensible), permitiendo capturar a dicho fantasma.

Posteriormente, se comunican todos los sitios a un servidor y a través de un programa se evalúa su funcionamiento en tiempo real, obteniendo gráficas historiales de su medición y captura. De esta forma, se soluciona exitosamente la aparición de H₂S en la planta hidroeléctrica.



Diagramas electrónicos



Verificación y calibración



Panel solar



Con base en la infraestructura con la que cuenta el Ladimme, además de H₂S se pueden medir y mitigar los siguientes fantasmas contaminantes:

- Monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂), entre otros, mediante analizadores aprobados, además de fantasmas radiactivos.
- También podemos medir y mitigar muchos otros con cromatografía acoplado a masas, es decir, calentando espectros fantasmales que podemos separar e identificar en información contenida en una base de datos de espectros de masas de fantasmas.
- Verificación y calibración de otros equipos con fantasmas de gases certificados.
- Búsqueda de fantasmas en muestreo de emisiones gaseosas, de agua y de suelo.
- Determinación analítica de partículas y de sus fantasmas.
- Mitigación de fantasmas con métodos biológicos.

Somos el único laboratorio para medir y mitigar fantasmas contaminantes desarrollando tecnología propia de bajo costo, de muy poco mantenimiento, con validación en el país, además de estar integrado por personal altamente capacitado con experiencia de más de 30 años, y contar con una importante y especializada infraestructura. Somos los especialistas para atrapar a los fantasmas contaminantes.



SERGIO TORAL REBOLLEDO

Estudió Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Veracruz (ITV). Está orgulloso de su esposa e hijos, que son su motor. Además del diseño, la integración, las pruebas, la aprobación e implementación de los desarrollos e innovaciones tecnológicas que se realizan en Ladimme, ya que son sus principales aportaciones. Colabora en el Departamento de Sistemas Electrónicos.

Una de sus novelas favoritas es *Pedro Páramo* de Juan Rulfo. Sus frutas predilectas son el nanche, el coyol y el jobo. Su pasatiempo es pescar con su hijo mayor, además de la jardinería por su efecto relajante. Uno de sus personajes históricos favoritos es Leonardo Da Vinci, se identifica mucho con su frase: "amo a aquellos capaces de sonreír en mitad de los problemas". El adjetivo que lo describe es *resolvente*.

AMBIENTE



Lo más diminuto del aire

Acelerador Tandetrón

FRANCISCA ALDAPE UGALDE

De acuerdo con estudios de la Organización Mundial de la Salud (OMS) se estima que sólo el 12% de la población que reside en zonas urbanas respira aire limpio, esto sin considerar otro dato que estima que 7 millones de personas mueren anualmente a causa de la contaminación ambiental. El primer paso para combatir esta problemática es la investigación. El Acelerador Tandetrón nos da la información con la que podemos cuidar nuestra salud y la del planeta.



Actualmente, la contaminación es un problema que invade la atmósfera y de esta manera prácticamente a cualquier espacio del mundo. En 1967 el consejo de Europa definió la contaminación atmosférica como la contaminación del aire cuando hay presencia de una sustancia extraña o la variación importante en la proporción de sus constituyentes que puede provocar efectos perjudiciales para los seres vivos.

Algunos de las principales fuentes de emisión que propician la contaminación atmosférica son la quema de combustibles fósiles para generar energía y que en este proceso producen sulfatos y dióxido de carbono, la quema de biomasa que produce potasio y a su vez conduce a la deforestación.

En la década de los cincuenta comenzaron los esfuerzos para contrarrestar la contaminación, mediante políticas públicas y diversas actividades, sin embargo no fue suficiente, ya que necesitaban de un elemento fundamental: la investigación científica que proporcionara análisis más precisos.

Fue entre 1984 y 1985 que se comenzaron a planear los estudios sobre contaminación atmosférica en el Laboratorio del Acelerador Tandem Van de Graaff 6MV, del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). El propósito de esas investigaciones era utilizar el acelerador para realizar análisis químico de muestras de polvo atmosférico, técnica que se había implementado pocos años antes en otros países del mundo.

En 1990 el ININ inició los estudios cuantitativos de contaminantes atmosféricos, mediante la ins-

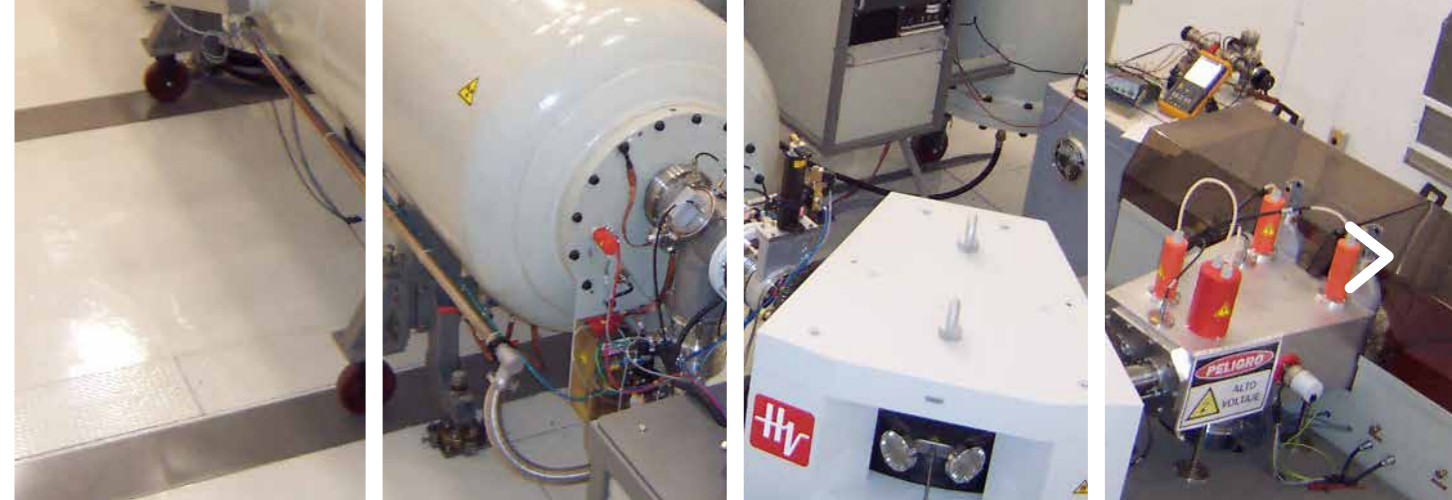


Cámara de irradiación. En este dispositivo las muestras que contienen el polvo atmosférico, se irradian con el haz de protones que proviene del acelerador de partículas.

talación de una cámara profesional y el rediseño de la línea de transporte del haz, bajo el auspicio parcial de Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). De esta manera, el ININ contó con una instalación completa para el desarrollo de una técnica atómica cuantitativa, de origen nuclear y basada en haces de iones (protones) generados por un acelerador de partículas subatómicas para el estudio de contaminantes atmosféricos.

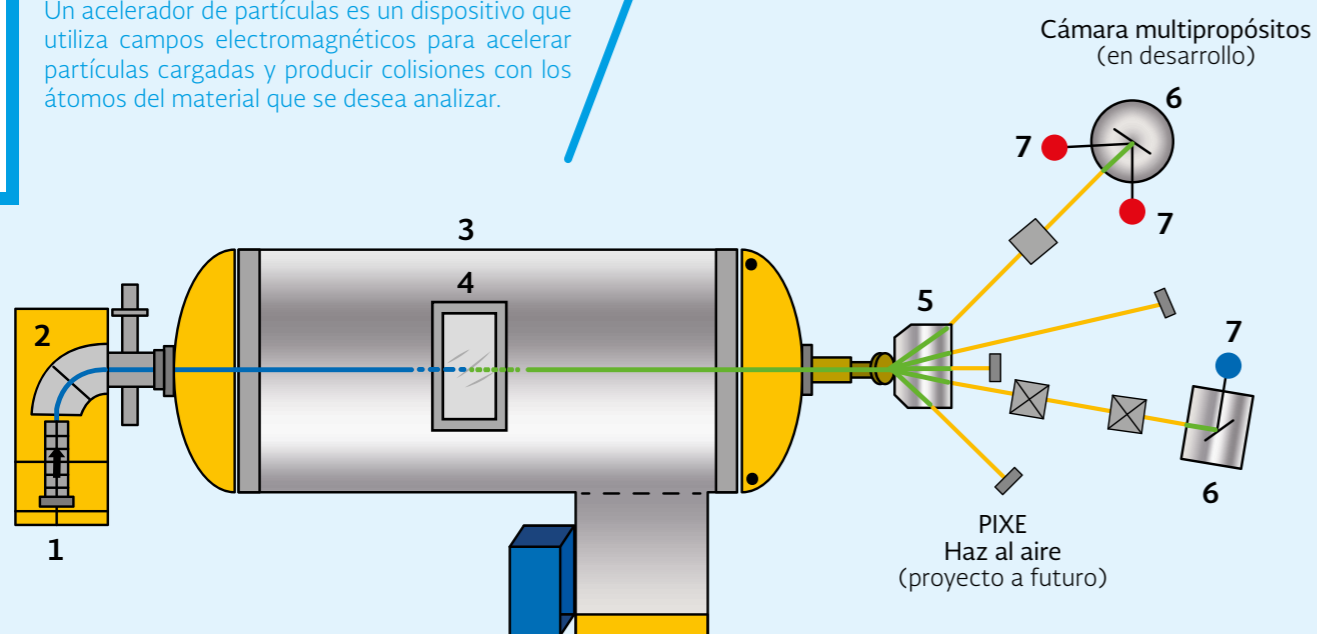
El contexto de esa época reflejaba un gran interés en el país (de diversas instituciones gubernamentales y múltiples investigadores) por el contenido elemental de la contaminación atmosférica. Sin embargo, el tiempo "de uso acelerador" que se requería era insuficiente para satisfacer la demanda de trabajo, por ello se propuso la compra de un segundo acelerador de mayor versatilidad (de menor energía y

tamaño) para enfocarse completamente en la investigación en estudios atmosféricos. Así, en 1998 el ININ adquirió el Acelerador Tandem Van de Graaff modelo Tandetrón 2MV. Un acelerador es un instrumento conformado por múltiples equipos y sistemas (magnéticos, hidráulicos, neumáticos, entre otros). Esto requiere de mantenimiento y actualización constante para su operación adecuada, de acuerdo con su energía y tamaño. En este sentido, un acelerador de partículas es un dispositivo que utiliza campos electromagnéticos para acelerar partículas cargadas a altas velocidades y realizar colisiones con los átomos de algún otro material. Los aceleradores de partículas de más interés son los empleados por los físicos para hacer colisionar partículas subatómicas, con el propósito de conocer más sobre la estructura de la materia o sobre su contenido elemental.



Acelerador 2MV

Un acelerador de partículas es un dispositivo que utiliza campos electromagnéticos para acelerar partículas cargadas y producir colisiones con los átomos del material que se desea analizar.



- 1 Fuente de iones:** ahí se generan los iones con polaridad negativa
- 2 Imán selector de masas:** imán deflector magnético que selecciona la masa deseada
- 3 Tanque acelerador:** en el tanque los iones negativos experimentan una aceleración hasta la mitad del tanque
- 4 Terminal de alto voltaje:** aquí se lleva a cabo el proceso de intercambio de polaridad de los iones y adquirirán una aceleración igual a la que traían
- 5 Imán deflector:** imán deflector que selecciona la dirección del haz hacia la línea de irradiación donde se encuentra la cámara de irradiación
- 6 Analizador o cámara de irradiación:** aquí toma lugar la interacción entre el haz y los átomos de la muestra.
- 7 Detector:** Este aparato detecta las partículas energéticas que se emiten después de la interacción del ion con los átomos de la muestra. Ellas llevan la información de interés para realizar el análisis.

En el ININ, el acelerador Tandetrón se utiliza para irradiar muestras de polvo atmosférico que se adquieren en los colectores de la Ciudad de México (CDMX) y otras ciudades, a partir de las cuales se identifican los elementos químicos en la muestra de polvo atmosférico (aquellos que están flotando en la atmósfera como resultado de actividades del hombre y los que emite la naturaleza de manera normal). La información obtenida del microanálisis químico realizado con el acelerador permite conocer la abundancia o concentración del elemento contaminante en el aire que respiramos. También, de esta información se puede conocer el origen o fuentes de donde provienen los contaminantes.

La metodología usada también es útil para irradiar muestras de origen biológico, industrial, geológico e incluso aplicado en el análisis de pinturas artísticas para corroborar su autenticidad.

Derivado de los estudios realizados en aerosoles, se está investigando sobre los sulfatos generados en la atmósfera como consecuencia de la quema de combustibles fósiles. La importancia de reducir los sulfatos reside en su capacidad de

acelerar el cambio climático, ya que crean capas de nubes en las que están inmersos, principalmente en zonas industriales, que además pueden moverse hacia otras regiones del planeta donde existe vegetación. Las capas generadas impiden que la luz del sol penetre a la tierra (esta capa las refleja al espacio) y llegue a la vegetación, inhibiendo la fotosíntesis. Este fenómeno es contrario al del efecto invernadero y se denomina efecto de enfriamiento.

Los sulfatos de interés se encuentran en el área metropolitana de la CDMX. El Sistema de Monitoreo Atmosférico (Simat) de la Secretaría del Medio Ambiente de la CDMX proporciona las muestras de la estación de monitoreo de su interés. Los resultados obtenidos sobre contaminación atmosférica han propiciado el establecimiento de las Normas de Calidad del Aire.

El estudio de partículas es fundamental en el futuro para el desarrollo de la medicina, la exploración espacial, la tecnología electrónica, etc. En el ININ se produce investigación científica para procurar nuestra salud y la del planeta.



FRANCISCA ALDAPE UGALDE

Estudió la Licenciatura en Física y la Maestría en Ciencias en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Además del Doctorado en Ciencias en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). Se siente orgullosa de sus errores, porque éstos le mostraron sus carencias y le ayudaron a crecer. Está adscrita al Departamento de Estudios del Ambiente.

El mango es su fruta predilecta. Disfruta mucho de la lectura en su tiempo libre. Su historia favorita es *El Principito* de Antoine Saint Exupéry. Admira al científico Richard Feynman. "Los años enseñan mucho de lo que nunca saben los días", es una frase del escritor estadounidense Ralph Waldo Emerson en la que cree. Se identifica con el personaje de la hormiga atómica por su fortaleza y dinamismo.



El núcleo celeste del conocimiento

Reactor TRIGA Mark III



PASTOR ENRÍQUEZ CRUZ

El conocimiento es la clave del desarrollo de la humanidad. La tecnología ha sido una de las herramientas más útiles para conocer nuestro entorno a muchos niveles. Un buen ejemplo es la investigación producida en México a través del reactor TRIGA Mark III, gracias al cual ha sido posible dar grandes pasos en la generación del conocimiento.

Conocer los elementos que nos rodean nos permite sacar provecho del entorno y progresar científicamente. Gracias a la tecnología, específicamente a los reactores de investigación, podemos visualizar lo que es invisible para los ojos humanos, estudiarlo y progresar con ese conocimiento.

El 1 de julio de 1968 iniciaron las labores de instalación del reactor TRIGA Mark III en el Centro Nuclear "Dr. Nabor Carrillo Flores", sede del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). El 8 de noviembre de 1968 en el reactor de investigación TRIGA Mark III se produjo por primera vez el efecto Cherenkov.

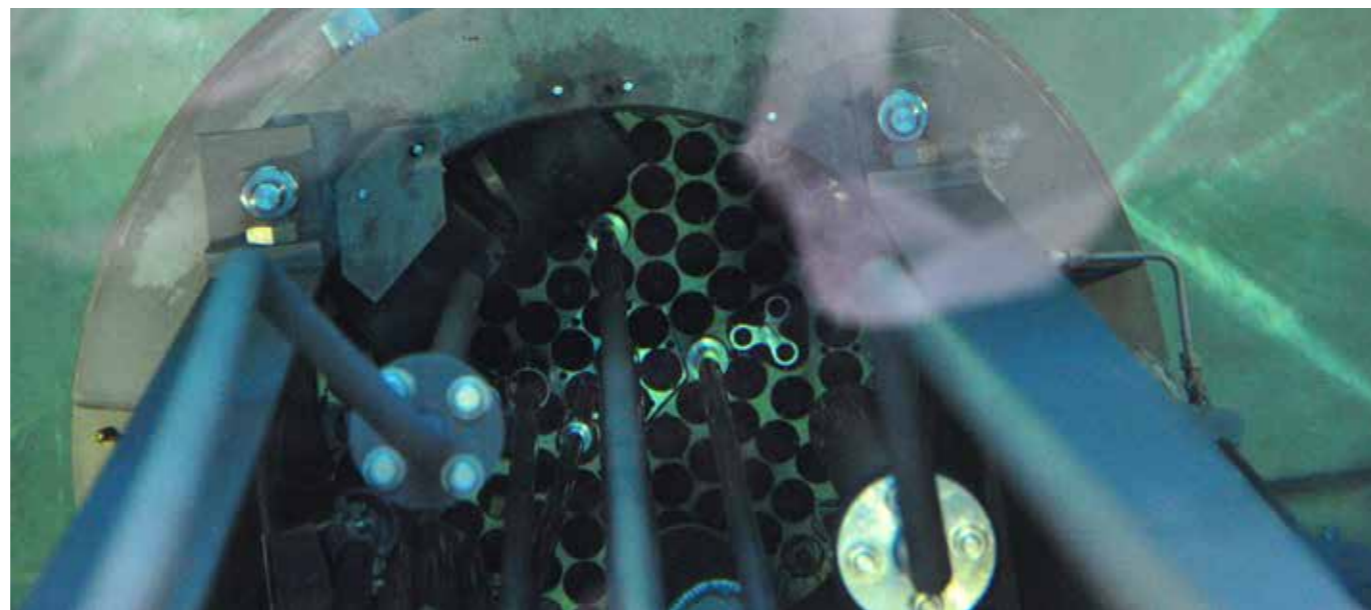
Pero, ¿qué hace a un reactor tan útil? Los reactores de investigación son capaces de ayudarnos a conocer más sobre la interacción de la radiación con los materiales, saber más sobre el comportamiento de los neutrones en diferentes niveles de energía y además analizar materiales con técnicas no destructivas ¿increíble verdad?

Los objetivos principales del reactor TRIGA Mark III son realizar investigación en el área nuclear, la producción de radioisótopos para usos médicos, agrícolas e industriales, y el entrenamiento de personal capacitado.

Las instalaciones que componen al reactor se usan para irradiar, con neutrones o rayos gamma, muestras de materiales de distinto tipo y tamaño. Las instalaciones externas se utilizan para irradiar muestras de gran tamaño u obtener un haz de neutrones para varios propósitos, por ejemplo, radiografías con neutrones. Las instalaciones inter-

nas se utilizan para diversos estudios en los que se necesita un alto flujo de neutrones, entre los que destacan, la producción de radioisótopos y el análisis de muestras por activación neutrónica.

El núcleo del reactor está contenido en una piscina alargada con instalaciones experimentales en los extremos. El núcleo es móvil y la piscina está llena de agua ligera con un bajo contenido de sales y minerales. Además, está constituido por 74 elementos combustibles, siete instalaciones de irradiación, cuatro barras de control y 34 elementos de grafito. Los combustibles están distribuidos en cinco círculos concéntricos, conocidos como anillos, alrededor de una posición central vacía conocida como "Dedal Central", donde se tiene el máximo flujo de neutrones. También cuenta con un sexto círculo ocupado por las barras de grafito, las cuales actúan como reflector de neutrones.

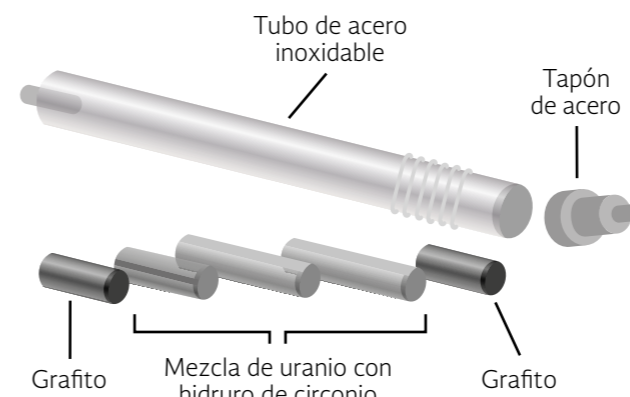


Núcleo del reactor



Instalaciones del reactor

Cada elemento combustible está compuesto de una mezcla combustible-moderador de hidruro de circonio con erbio y uranio (U-ZrH-Er). El contenido de uranio en la mezcla es del 30% y tiene un enriquecimiento nominal del 20% (por esta razón son conocidos como combustibles LEU 30/20). Los elementos combustibles están conformados por un tubo cilíndrico de acero inoxidable, en su interior tiene dos barras cilíndricas de grafito y tres barras cilíndricas de combustible-moderador.



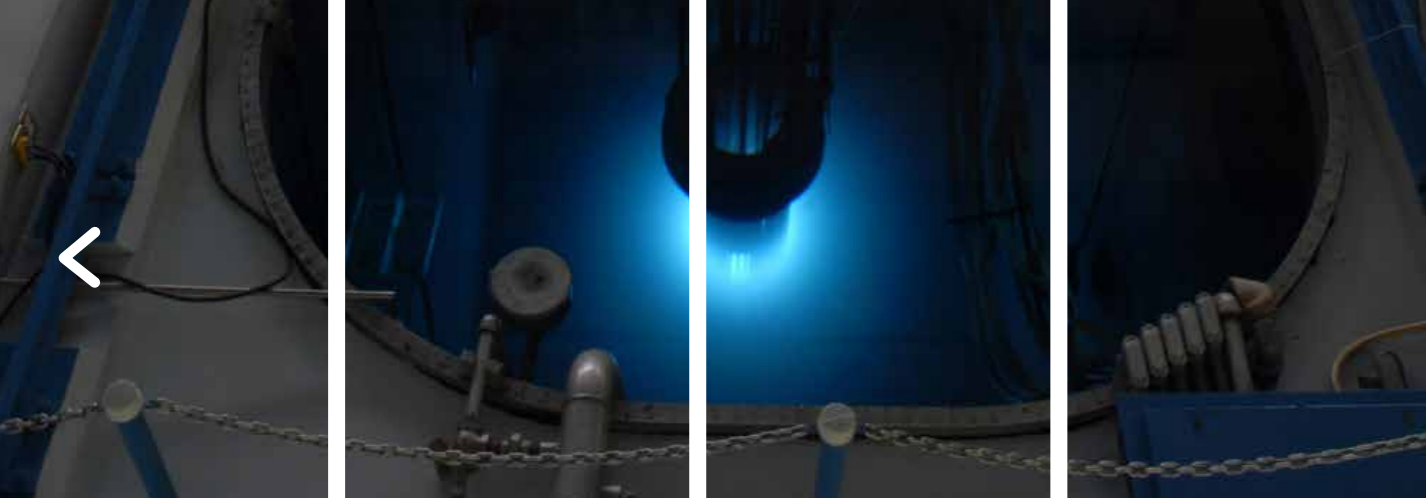
Ahora veamos ¿qué vuelve al reactor TRIGA Mark III tan seguro? La respuesta es su combustible. Esto se debe a que el combustible mismo puede detener rápidamente la reacción en cadena cuando la temperatura del combustible sobrepasa los 350 grados centígrados sin ninguna operación mecánica, electrónica o humana. Además, para evitar que se sobrepase la potencia nominal de operación de manera inadvertida, se han incorporado en la consola del reactor circuitos automáticos que cesan la operación en caso de rebasarse los límites de operación. Las barras de control están acopladas a sus mecanismos mediante electroimanes, ante una indicación anormal de la consola (por ejemplo, de potencia o de temperatura), el circuito de apagado interrumpe la energía a los electroimanes y las barras de control caen por gravedad y apagan el reactor.

Aplicaciones del Reactor TRIGA Mark III

Producción de radioisótopos. Se pueden producir múltiples radioisótopos, como samario (Sm-153), sodio (Na-22), molibdeno (Mo-99), fósforo (P-32), cloro (Cl-38), entre otros. Estos isótopos radiactivos son usados fundamentalmente en medicina, industria e investigación. Por ejemplo, el Na-22 se ha utilizado en radiotrazado para encontrar fugas de agua o medición de niveles en sistemas petroleros de almacenamiento de hidrocarburos, mientras que el Sm-153 se utiliza como paliativo en enfermos terminales de cáncer óseo.

Dispersión de neutrones. El material es irradiado con neutrones, los cuales penetran e interactúan con la materia y son desviados a cierto ángulo con una energía específica, dependiendo de la estructura del material. Estos datos son básicos para la modelación del material estudiado.

Radiografías con neutrones. Con los neutrones se puede explorar la materia, pero de manera diferente gracias a su sensibilidad a los elementos ligeros. Es posible obtener radiografías con neutrones



Efecto Cherenkov producido en el núcleo del reactor al estar en funcionamiento

en lugar de utilizar una fuente emisora de radiación electromagnética, produciendo imágenes radiográficas inversas a las radiografías convencionales. Estos elementos capturan intensamente a los neutrones emitiendo radiación gamma que impresiona la placa, obteniéndose la imagen.

Irradiación de materiales. En el reactor se pueden reproducir los esfuerzos y deformaciones que sufren los materiales de la vasija en los reactores de potencia, como los de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV). Esto posibilita el estudio del deterioro y la fragilización de componentes mecánicos y sistemas de detección de la radiación.

Enseñanza y entrenamiento. Es de suma importancia en los rubros de educación y entrenamiento a estudiantes e investigadores de diversas áreas.

Análisis por activación neutrónica. Técnica analítica usada para determinar la composición y concentración elemental de una amplia diversidad de materiales. Esta técnica es muy útil para el análisis de muestras valiosas, por ejemplo, se puede determinar el material y la edad de cuadros y objetos antiguos. Es muy útil en áreas como medicina, arqueología, geología y en monitoreo ambiental.

Como seguramente has descubierto, los reactores de investigación nos abren las puertas a mundos que desconoceríamos sin su tecnología. Las ramas científicas que nos permiten conocer son vastas, desde aplicaciones médicas hasta aplicaciones arqueológicas. Por ello, el reactor TRIGA Mark III ha sido y es una de las piezas claves en la búsqueda y desarrollo del conocimiento en México.



Difractómetro de neutrones

PASTOR ENRÍQUEZ CRUZ

Estudió la Licenciatura en Física y Matemáticas, y la Maestría en Ciencias en Ingeniería Nuclear, en el Instituto Politécnico Nacional (IPN). Actualmente es Jefe del Departamento del Reactor.

Está orgulloso de vivir en una época llena de retos y obstáculos, ya que lo hacen valorar cada logro obtenido. Su fábula favorita es *El árbol y el espino*. Su fruta predilecta es la sandía. Disfruta mucho de pasear en motocicleta y está aprendiendo a tocar la guitarra. Su personaje histórico favorito es Emiliano Zapata. La frase con la que más se identifica es: "quiero morir siendo esclavo de los principios, no de los hombres". El adjetivo que más lo describe es *atrevido*.



PROTECCIÓN
RADIOLÓGICA



La imagen segura

Laboratorio de Control de Calidad y Protección Radiológica en Imagenología | Laccprim

JUAN GARCÍA AGUILAR

Todos los procesos de medicina en general, así como de la ciencia nuclear en particular, a los que es sometido un paciente son verificados con cautela y las personas que los llevan a cabo han tenido muchas horas de entrenamiento. La aplicación de rayos X es un buen botón de muestra. En el Laboratorio de Control de Calidad y Protección Radiológica en Imagenología (Laccprim) se capacita a especialistas en esta materia, además de generar y difundir protocolos de seguridad y buenas prácticas.



Superman es el famoso superhéroe ficticio capaz de volar, que también puede, entre su amplia gama de poderes, mirar dentro de cualquier material o personas. La visión de rayos X es un poder real y desde hace varios años nos ayuda a salvar millones de vidas. Para que esto sea posible utilizamos equipos especializados en imagenología y rayos X.

En 1997, la Dirección General de Salud Ambiental de la Secretaría de Salud publicó las normas de protección y seguridad radiológicas para el diagnóstico médico con rayos X. Por ello, el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) conformó un grupo de trabajo para ofrecer servicios y asesorías a instituciones públicas y privadas.

Este equipo se especializó en la garantía y control de calidad de los servicios de imagenología y equipos de rayos X, así como en la protección y seguridad radiológicas de las personas, instalaciones y ambiente donde se realizan este tipo de actividades.

Hubo que tomar en consideración aspectos como el tiempo requerido para la formación y entrenamiento especializado de las personas que proporcionan estos servicios, pues los equipos de imagenología tienen siempre una alta demanda de ocupación, ya que prácticamente ningún paciente es atendido sin que se requiera una imagen para su diagnóstico o tratamiento.

Además, las aplicaciones de las técnicas de imagenología en otras áreas, como la biología o la antropología, difícilmente encuentran espacios donde llevarse a cabo, ya que no se realizan en los hospitales debido a las condiciones de asepsia que deben prevalecer en esas instalaciones médicas.



Los rayos X son invisibles al ojo humano, pero aprovechamos los efectos que provocan en otros aparatos, dispositivos o materiales (por ejemplo, las películas o algunos detectores) para observar imágenes analógicas y digitales 2D y 3D.



En 2016 se inauguró el Laboratorio de Control de Calidad y Protección Radiológica en Imagenología (Laccprim) del ININ, conformado por un grupo de técnicos, ingenieros físicos y físicos médicos, un tomógrafo y un fluoroscopio (fuente de rayos X y una pantalla fluorescente entre las que se sitúa al paciente), así como la instrumentación y equipos necesarios para realizar control de calidad en todas las modalidades clínicas de equipos de rayos X. Además, está en proceso la instalación de un mastógrafo digital donado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), entre otros equipos.

El Laccprim cuenta con una ventana de cristal plomado de 4 metros de longitud que funciona como blindaje contra la radiación, permitiendo que todos los participantes observen las pruebas, prácticas, uso de instrumentación y operación de los equipos de manera segura. También está integrado un sistema de proyección de imágenes con monitores de alta resolución, pantalla y pizarrón, lo que hace posible capacitar al personal.

Los equipos, en esta etapa de la instalación, son generadores de rayos X y mediante sus sistemas auxiliares de imagen es posible evaluar las condi-

ciones de funcionamiento y seguridad de los equipos para pacientes, médicos técnicos, enfermeras y todos los colaboradores. Estos aparatos son utilizados en aplicaciones médicas de diagnóstico, cuya finalidad es crear una imagen de las estructuras internas del objeto o sujeto a analizar.

Los rayos X son invisibles al ojo humano, pero gracias a los efectos que provocan en otros aparatos, dispositivos o materiales (por ejemplo, las películas o algunos detectores) es posible observar imágenes analógicas y digitales 2D y 3D, como radiografías en películas radiográficas, monitores u hologramas.

Un equipo de rayos X es fabricado con aplicaciones específicas, tales como mastografía, tomografía, fluoroscopia convencional, fluoroscopia intervencionista, radiología dental, densitometría ósea o radiología general. Su principio de funcionamiento es el mismo, en cualquiera de los casos. Estos equipos están formados por un tubo de rayos X, contenido dentro de un cabezal metálico, un transformador eléctrico elevador de potencial, un transformador para disminuir el potencial, un rectificador de potencial de alterno a continuo, una consola de control y un sistema para visualizar la imagen.



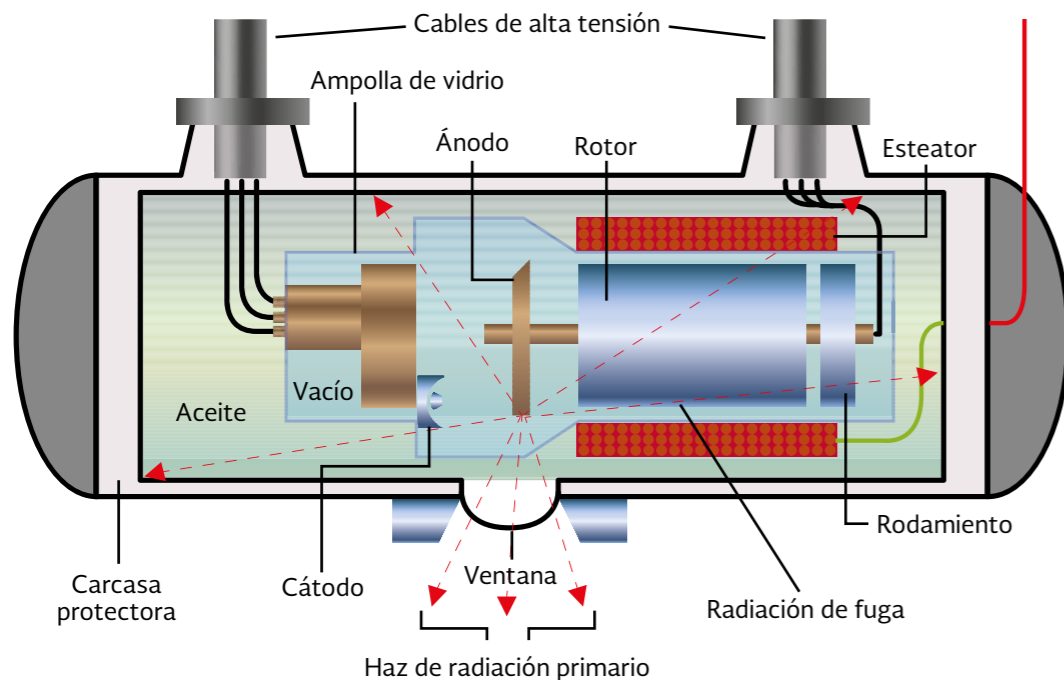
El Laccprim tiene múltiples funciones, destacan entre ellas:

- Capacitación de físicos médicos, ingenieros, radiólogos e intervencionistas y técnicos radiólogos, en la implementación de los sistemas de garantía de calidad y control de calidad en imagenología.
- Protección radiológica en las aplicaciones clínicas, como tomografía, mastografía, fluoroscopia, radiología general y dental, en sus opciones analógicas y digitales.
- Generación de protocolos de investigación en física, materiales, biología, antropología, salud y otras áreas (algunas técnicas de imagenología permiten determinar la forma, dimensiones, densidad y composición del contenido interno sin afectar las muestras).
- Aplicación de protocolos y técnicas necesarias para el control de calidad y el desarrollo de métodos para la determinación de la dosis de radiación en cada tipo de procedimiento clínico que utilice rayos X.

- Proveer estudios de imagenología en 2D y 3D que no son destructivos, en objetos, materiales y animales de laboratorio que un hospital no aceptaría, por ejemplo, analizar momias y animales, objetos con valor cultural (joyas arqueológicas), dispositivos electrónicos, entre otros.
- Generar publicaciones para difundir protocolos, guías de seguridad y buenas prácticas, desarrollar los indicadores nacionales para evaluar el uso seguro de las técnicas de imagenología.

Esta instalación es única en su tipo. En otros países, el número de salas de rayos X para atención clínica de los pacientes es suficiente para cubrir las necesidades de la población y el personal bajo entrenamiento cuenta con todos los recursos. En cambio, en nuestro país el número de salas de rayos X es insuficiente y con un alto costo económico. En el Laccprim los especialistas disponen de todas las opciones clínicas de imagenología en un mismo lugar y de todo el tiempo necesario sin la presión de suspender la capacitación para brindar la atención a un paciente. Por ello, este laboratorio es capaz de atender las necesidades de capacitación y de investigación en el país.

Cabezal de un equipo de rayos X



- Esta carcasa está construida de metal, generalmente de aluminio, con un revestimiento interno de plomo, lo que permite atenuar la radiación isotrópica.
- La carcasa sólo es capaz de atenuar la radiación y no bloquea por completo su paso.



JUAN GARCÍA AGUILAR

Estudió la Licenciatura en Ingeniería Mecánica Eléctrica en la Universidad Veracruzana (UV), la Maestría en Ciencias en la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), además de los posgrados en Protección Radiológica y Seguridad Nuclear en la Universidad de Buenos Aires (UBA), Argentina, y en Seguridad e Higiene en el Trabajo en el Instituto de Seguridad en el Trabajo. Colabora en el Departamento de Metrología de Radiaciones Ionizantes del ININ.

Está orgulloso de sus hijos. El adjetivo que lo describe es *perseverante*. Le gusta mucho el mango. Su cuento favorito es "Aladino" del libro *Las mil y una noches*. Los pasatiempos que más disfruta son la pesca y el cine. Admira a Thomas Alva Edison. Se identifica con la frase: "Tropezar no es malo, encariñarse con la piedra sí".



Detectives de huellas nucleares

Laboratorio Nacional de Investigaciones
en Forense Nuclear | Lanafonu



ALBERTO CEDILLO CRUZ

Gran parte del desarrollo producido por la tecnología nuclear y sus beneficios se debe a la responsabilidad y buen uso que le han dado los investigadores. Por ello, el Laboratorio Nacional de Investigaciones en Forense Nuclear es el primero en tomar medidas para asegurar las aplicaciones de la ciencia nuclear.



La ciencia forense nuclear es una subdisciplina de la ciencia forense, y estudia el origen y la historia de los materiales nucleares y radiactivos, o evidencias asociados a éstos, especialmente los hallados en el lugar de un delito.



El tráfico ilícito de materiales nucleares y radiactivos es una preocupación de los Estados miembros del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). México ha adoptado las recomendaciones del OIEA para combatir las posibles actividades ilícitas con materiales nucleares, que incluyen la protección física de materiales y su contabilidad precisa, la detección y respuesta al tráfico nuclear ilícito, así como la seguridad de fuentes radiactivas y los planes de emergencia.

El Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) con apoyo de la Secretaría de Energía (Sener) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), crearon en 2013 el Laboratorio Nacional de Investigaciones en Forense Nuclear (Lanafonu), donde se trabaja en los aspectos técnico-científicos que preservan la seguridad radiológica de México.

La ciencia forense nuclear es una subdisciplina de la ciencia forense, y estudia el origen y la historia de los materiales nucleares y radiactivos, o evidencias asociados a éstos, especialmente los hallados en el lugar de un delito. Un elemento esencial en la materia es tener un plan listo para aplicarlo en caso de incidente nuclear o radiológico. Si se decomisan materiales nucleares en un cruce de frontera o si se encuentran en refrigeradores desechados en un vertedero, o se utilizan para fabricar una bomba sucia, las autoridades nacionales y locales deben disponer ya de sistemas establecidos para la contención de esos materiales y el descubrimiento de su origen.

Un claro ejemplo es el robo de vehículos que transportan fuentes radiactivas, donde los delincuentes



no conocen el tipo de material que es transportado y una vez que identifican que no tiene un valor en el mercado negro, abandonan la fuente radiactiva.



Alerta generada por Protección Civil Federal por fuente radiactiva robada en Jalisco, México

La investigación comienza con la caracterización del material radiactivo, así como los materiales biológicos, ambientales y geológicos asociados a ellos, mediante la determinación de sus características físicas, composición elemental y molecular, y relaciones isotópicas. Para determinar las características mencionadas es necesario realizar una serie de análisis pertinentes, que incluye la identificación de constituyentes mayores, menores y trazas, así como de isótopos de tiempo de vida media larga.

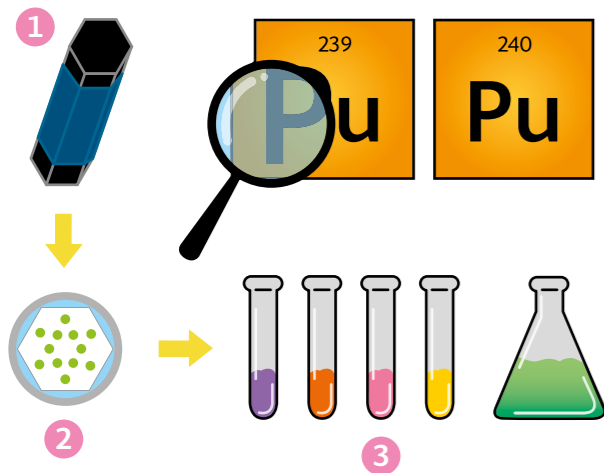
Además del material nuclear o radiactivo de interés, pueden estar presentes impurezas químicas, si estos elementos están presentes a niveles de traza y el intervalo, y las concentraciones de tales elementos pueden ser características de procesos, materias primas o instalaciones particulares. Por lo tanto, las mediciones de estos elementos son importantes para una evaluación, ya que pueden proporcionar información no sólo sobre el uso legal previsto, sino también sobre el material de origen o sobre el tipo de instalación de producción.

La investigación en forense nuclear es utilizada en los procedimientos judiciales nacionales o internacionales, como causas penales relacionadas con el contrabando e incluso terrorismo. El proceso comienza analizando la naturaleza, el uso y el origen de los materiales nucleares, los cuales tienen una huella dactilar nuclear definida por radioisótopos, isótopos y relaciones de masas, edad del material, contenido de impurezas, forma química y parámetros físicos.

Mediante la identificación de la huella dactilar nuclear es posible localizar a las organizaciones y/o personas que manejan de forma ilícita estos materiales. El material de referencia que utilizamos es el mineral de uranio concentrado, conocido como "torta o pastel amarillo" (óxido de uranio o urania), ya que es un producto intermedio clave en la fabricación de combustible nuclear.

Determinar con certeza de dónde procede un material nuclear/radiológico y todos los lugares donde ha estado es de suma utilidad, ya que nos permite:

- Descubrir los puntos débiles en la infraestructura de la reglamentación nuclear.
- Evitar que los materiales de carácter estratégico y potencialmente peligrosos, de este tipo, no acaben en manos del público o de delincuentes.
- Y, principalmente, mantener segura y protegida a la población mexicana.



- 1 Material de origen nuclear.
- 2 Toma de muestra representativa para determinar los isótopos de plutonio (Pu), las firmas de uranio (U), entre otros.
- 3 Tratamiento radioquímico para determinar los isótopos del plutonio-239 (^{239}Pu) y plutonio-240 (^{240}Pu), además de sus estados de oxidación.

Una de las principales ventajas con las que cuenta el Lanafonu es que está equipado con una infraestructura de vanguardia, altamente especializada y que sirve para desarrollar metodologías de análisis para caracterizar materiales en investigaciones que puedan contribuir en la toma de decisiones en los protocolos de emergencia nacional en el sector nuclear (emergencias radiológicas y tráfico ilícito de material nuclear), o bien, durante las rutinas de inspección y control radiológicos.

El Lanafonu es único en su tipo en Latinoamérica, ya que cumple con tres principales funciones: investigación, formación de recursos humanos y prestación de servicios altamente especializados. Además, puede establecer asociaciones entre instituciones de diferentes regiones del país y

así expandir las capacidades científico-tecnológicas de los diferentes grupos de investigación. Se divide en tres laboratorios: Bioensayo, Espectrometría de masas y Análisis químicos.

Los resultados de un examen forense nuclear resultan cruciales en las investigaciones sobre el cumplimiento de la ley y contribuyen a la toma de decisiones en materia de seguridad nuclear y radiológica en México.

Las técnicas en forense nuclear son sumamente efectivas, al grado que han sido utilizadas en múltiples escenarios y en casos criminales que parecían imposibles de resolver. Por ejemplo, en el Laboratorio Nacional de Energía de Oak Ridge (ORNL) se han solucionado retos difíciles para el análisis de escenas del crimen y gracias a las técnicas en forense nuclear fue posible revelar los secretos del asesinato de John F. Kennedy o de la muerte de Zachary Taylor (ambos expresidentes de Estados Unidos de América). Para el procedimiento se utilizaron muestras de hebras de cabello, fragmentos de uñas y de bala, con las que fue posible determinar más pistas del caso.



ALBERTO CEDILLO CRUZ

Estudió la Licenciatura en Química Farmacéutica Biológica, así como la Maestría y Doctorado en Ciencias Químicas, en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En la actualidad es responsable del Laboratorio Nacional de Investigaciones en Forense Nuclear (Lanafonu).

Se siente orgulloso de su familia. Su historia favorita es *Siddhartha* de Hermann Hesse. Le gusta el durazno. Los pasatiempos que más disfruta son escuchar música y leer. Uno de sus personajes favoritos es Batman. La frase con la que más se identifica es: *Audentes fortuna iuvat*/ "La fortuna favorece a los valientes". El adjetivo que más lo describe es *astuto*.



SALUD



Biosensores, la alerta oportuna

Laboratorio Nacional de Investigación y Desarrollo de Radiofármacos | Lanider

NALLELY PATRICIA JIMÉNEZ MANCILLA

En los últimos años el cáncer ha sido una de las enfermedades más frecuentes en la población. Es por eso que el Instituto Nacional de Cancerología (INCan) y el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) han centrado múltiples esfuerzos en investigar y desarrollar tecnología para detectar y tratar oportunamente este padecimiento. Una herramienta indispensable para combatirlo son los radiofármacos. Conoce el lugar donde los investigamos y desarrollamos.



Se estima que actualmente el cáncer es la tercera causa de muerte a nivel nacional. Cada año se presentan cerca de 148 mil nuevos casos de cáncer. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) sólo en 2015 murieron más de 8 millones de personas por esta enfermedad. Las cifras son alarmantes. Como una medida para contrarrestar el cáncer y otras enfermedades se realiza investigación para su detección y tratamiento oportunos.

Una pieza clave de la investigación médica y la lucha contra múltiples enfermedades son los radiofármacos: sustancias que dentro de su estructura contienen un átomo radiactivo o radionúclido, que puede ser administrado en seres humanos con fines de diagnóstico o terapéuticos.

Con el objetivo de generar conocimiento científico y tecnología radiofarmacéutica propia, se creó el Laboratorio Nacional de Investigación y Desarrollo de Radiofármacos (Lanider), del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), que forma parte del programa de Laboratorios Nacionales del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) y está asociado con el Instituto Nacional de Cancerología (INCan).

El programa de Laboratorios Nacionales del Conacyt está definido como la unidad de investigación especializada para el desarrollo científico y la innovación en temas fundamentales. Estos laboratorios cumplen con los objetivos de generar investigación, formar recursos humanos y prestar servicios. El Conacyt apoya la formación de estas unidades para incidir en la formación de recursos humanos de calidad, optimizar recursos



Actualmente, el Lanider distribuye más de 100 productos diferentes a centros de medicina nuclear. Gracias a ello es posible llevar a cabo más de 350 mil estudios al año, lo que se traduce en miles de vidas salvadas.



y generar sinergias entre diversas instituciones y organizaciones.

El Lanider se enfoca principalmente en la investigación y la producción, así como el control de calidad y distribución de los radiofármacos (también conocidos como biosensores radiactivos). El grupo de trabajo del área de investigación es multidisciplinario, pues está compuesto por investigadores de diversas áreas científicas, como físicos, ingenieros biomédicos, biólogos, entre otras profesiones.

Actualmente, el Lanider distribuye más de 100 productos diferentes a centros de medicina nuclear. Gracias a ello es posible llevar a cabo más de 350 mil estudios al año, lo que se traduce en miles de vidas salvadas.

La producción de radiofármacos se genera en la planta de producción, que cuenta con áreas limpias (libres de toxinas y bacterias, con flujo de aire estéril, entre otras características), cumpliendo con los requisitos de buenas prácticas de fabricación que dictan las autoridades sanitarias. Además, cuenta con los permisos necesarios para la utilización de material radiactivo expedidos por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS).

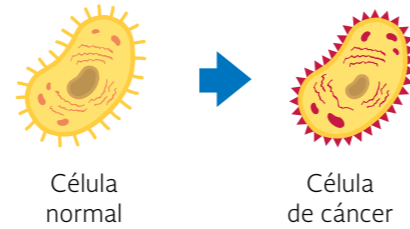
Una de las grandes virtudes de los radiofármacos es que pueden ser administrados al paciente mediante una inyección intravenosa, por inhalación o administración oral, con el fin de obtener una imagen que el médico utiliza para establecer el diagnóstico de la enfermedad, o bien, para brindar un tratamiento y darle seguimiento. Los radiofármacos también son capaces de llegar específicamente a las células de cáncer y reconocerlas, ya que están formados por una molécula que identifica a la célula dañada y un radionúclido, que es la molécula que emite la radiación.

Los radiofármacos utilizan radiación beta y gamma. La radiación beta es usada para destruir las células de cáncer, ya que son partículas con carga y masa que van chocando con el medio y van destruyendo lo que se encuentran a su paso. La radiación gamma, por su parte, es pura energía y no tiene masa, esto le permite pasar por los cuerpos de las personas sin causar daño y ser detectada por un equipo especial (gammacámara), que construye una imagen capaz de mostrar la concentración y localización de los radiofármacos.

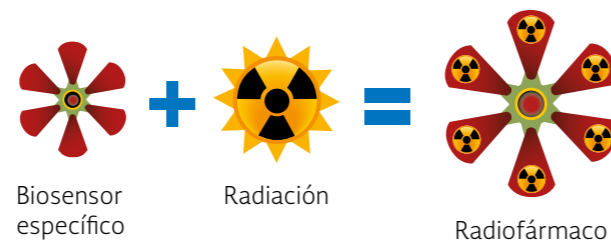
Para que los radiofármacos puedan ser aplicados a los seres humanos deben caracterizarse químicamente y ser sometidos a diferentes pruebas, tanto *in vitro* (en células) como *in vivo* (en ratones). Con

Proceso de investigación y desarrollo de un radiofármaco

1 Identificación de características específicas de la célula de cáncer



2 Diseño de radiofármacos



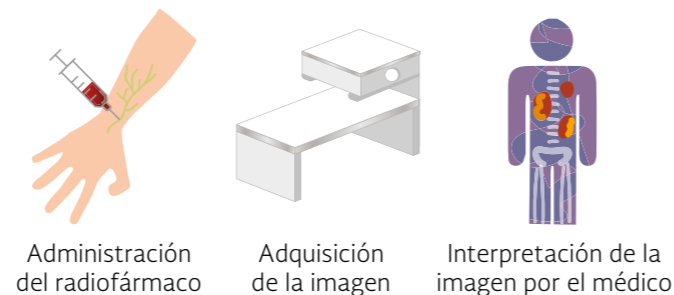
3 Caracterización química, *in vitro* e *in vivo*



4 Producción y pruebas de calidad



5 Aplicación del radiofármaco en pacientes



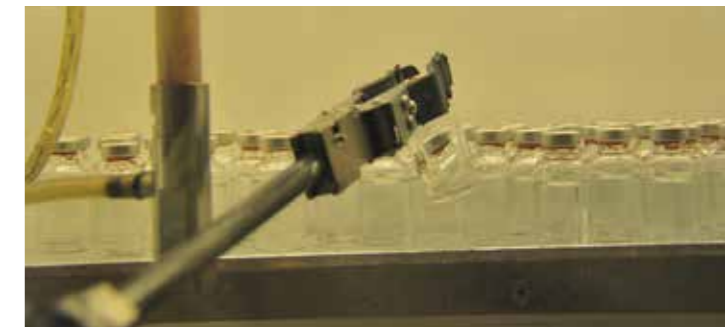
estas pruebas se puede saber si el radiofármaco se une o no a la célula de cáncer y también el mecanismo por el cual es desechado del cuerpo (puede ser por los riñones, con la orina, o por el sistema hepatobiliar, por las heces). Las pruebas nos permiten conocer cómo es el movimiento del radiofármaco en el cuerpo y saber cuánto tiempo durará en un órgano, lo que médicamente es muy importante.


Ya que el radiofármaco ha pasado todas las pruebas de calidad y de aplicación, puede ser usado en estudios clínicos, en hospitales con pacientes diagnosticados con cáncer. Una vez cumplido con el registro ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI), para obtener los derechos sobre el producto, y ante la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (Cofepris), para obtener la autorización del uso en seres humanos (registro sanitario), entonces el radiofármaco puede ser utilizado en hospitales y laboratorios de diagnóstico.

El Lanider cuenta con 23 diferentes radiofármacos, lo que permite la realización de múltiples estudios, entre los que destacan, análisis de función cardíaca, de función renal, para evaluar si existe invasión de las células de cáncer en hueso, diag-

nósticos de cáncer de mama, de próstata, paliativos del dolor, entre otros. Algunos de estos radiofármacos se exportan a Costa Rica, Sudáfrica, República Dominicana y Guatemala.

La ciencia nuclear ha logrado ayudar a millones de personas en el mundo, mediante el diagnóstico y tratamiento de enfermedades, y los radiofármacos han sido la pieza necesaria para resolver el rompecabezas de muchos padecimientos que afectan la salud.



 Un radiofármaco es la sustancia que dentro de su estructura contiene un átomo radiactivo o radionúclido, que puede ser administrado en seres humanos con fines diagnósticos o terapéuticos.



NALLELY PATRICIA JIMÉNEZ MANCILLA

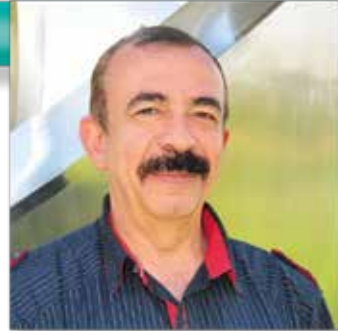
Estudió la Licenciatura en Física, la Maestría en Ciencias con Especialidad en Física Médica y el Doctorado en Ciencias de la Salud en la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM). Actualmente es investigadora Nacional del Conacyt comisionada al Lanider-ININ por el convenio ININ-Cátedras Conacyt para jóvenes investigadores.

Disfruta mucho de las historias mitológicas en donde se mencionan seres extraordinarios como unicornios, pegasos, minotauros y centauros. Su fruta favorita es el durazno. Disfruta mucho ir al cine. Si tuviera que elegir un adjetivo para describirse es *comprometida*. Su frase predilecta es: "nunca te duermas sin un sueño ni te levantes sin un motivo" de Mario Benedetti.



Sustancia activa de la medicina nuclear

Planta de Producción de Radiofármacos | PPR



EDILBERTO GARZA VIELMA

La medicina nuclear se ha convertido en una de las herramientas fundamentales en el tratamiento de múltiples enfermedades como el cáncer. Sin embargo, no siempre fue así. El uso de radiofármacos es reciente, aunque su desarrollo ha sido veloz y eficaz. La Planta de Producción de Radiofármacos (PPR) del ININ tiene la responsabilidad de producir más del 80% de la demanda del país y así procurar de la salud de la población.

“Hay ciertamente dos cosas diferentes, saber y creer que se sabe. La ciencia consiste en saber y en el creer que se sabe, está la ignorancia” es una frase del filósofo griego Hipócrates, quien es considerado el padre de la medicina. En sus palabras hay mucha verdad, ya que la medicina ha pasado por un proceso largo de mejoramiento, desarrollo y especialización. Un hito en la historia de la medicina ha sido la aparición de los radiotrazadores o radiofármacos.

En 1913, George von Hevesy, científico especializado en química y física, introdujo el concepto de radiofármaco. Posteriormente, en 1936 se utilizó por primera vez un radioisótopo en la terapia de una enfermedad humana, el elegido fue el fósforo-32 (^{32}P) utilizado para tratar a un paciente con leucemia. Así fue como inició la era de la medicina nuclear.

Un año después, en 1937, se produjo yodo radiactivo (I-131), a través del bombardeo de una muestra de telurio (Te). Desde el siglo XIX se sabía que el yodo forma parte de la tiroxina (hormona producida en la tiroides), lo que provocaba la acumulación de este elemento en la glándula. En 1940, se diagnosticó el primer caso de hipertiroidismo y el químico Glenn Seaborg vio la oportunidad de usar el I-131 para su tratamiento.

La investigación en radiofármacos para el cuidado de la salud humana comenzó a desarrollarse rápidamente y a inicios de 1960 el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) comenzó la investigación y generación de radiofármacos en la Planta de Producción de Radiofár-

macos (PPR). En ese momento, el principal producto era el yodo-131. En 1964 se desarrollaron 10 diferentes complejos llamados núcleo-equipos, para la preparación de radiofármacos inyectables marcados con tecnecio-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$), el cual es considerado como el radionúclido ideal para la obtención de imágenes diagnósticas en medicina nuclear.

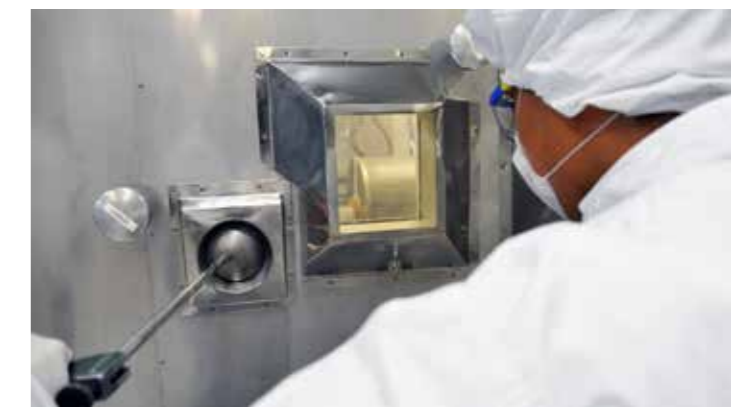
El proceso para la generación de un radiofármaco es sencillo, mediante un radionúclido “padre” de vida relativamente larga (emite radiación más tiempo) como el molibdeno (^{99}Mo), se obtiene un radionúclido “hijo” de vida media corta el $^{99\text{m}}\text{Tc}$. El comportamiento químico diferente de los dos radionúclidos permite separar el hijo del padre de una manera eficiente por métodos químicos, como cromatografía (adsorción), extracción por solvente, entre otros.



Actualmente, existen dos líneas de producción en la PPR. La primera produce radiofármacos destinados al sector Salud y su instalación cuenta con 16 celdas herméticas, equipada con un sistema de extracción de aire para que tengan presión negativa (no debe salir aire cuando se abre una ventana por donde se ingresa el material radiactivo). Las celdas están distribuidas en línea para facilitar el traslado del material radiactivo, por medio de una banda transportadora que corre por la parte de atrás de las celdas.

Una de las celdas tiene una puerta corrediza de plomo, para ingresar y abrir los contenedores en los que viene el material radiactivo. La apertura de los contenedores y el manejo de los recipientes que contienen el material radiactivo se hace por medio de los manipuladores. Las celdas también cuentan con una placa de lucita que permite ver los equipos e instrumentos que se encuentran en su interior.

Cuenta con una pared de tabiques de plomo de 10 cm de espesor, que es blindaje para frenar la radiación que emite el material radiactivo. Además, en las áreas de la planta de producción de radiofármacos se tienen distribuidos detectores de radiación para la inspección y control de los niveles de radiación.



Los radiofármacos que se preparan en la PPR del ININ permiten realizar alrededor de 300 mil estudios de diagnóstico al año y son fundamentales en el tratamiento de una gran variedad de enfermedades.

La segunda línea de producción de la PPR genera, en el Laboratorio de Precursores de Radiofármacos, los kits fríos (precursores de radiofármacos), que son utilizados en el diagnóstico médico y tienen una alta demanda clínica. La mayoría de ellos son preparados y distribuidos por el ININ y pueden clasificarse como agentes óseos, hepáticos, hepatobiliares, cerebrales, cardíacos, renales, pulmonares, tiroideos y para el diagnóstico de neoplasias.

Las ventajas de los radiofármacos son diversas y vastas, ya que permiten el diagnóstico de enfermedades en múltiples partes del cuerpo (renal, cerebral, pulmonar, hepato-esplénica y de médula ósea), así como de epilepsia, Alzheimer, demencia, migrañas y tumores cerebrales, además son agentes de detección de cáncer. También son útiles en el tratamiento de dificultades en el miocardio, artritis avanzada y tumores (de origen neuroendocrino, sistema nervioso), de cáncer de próstata, entre otros.



Los radiofármacos que se preparan en la PPR del ININ permiten realizar alrededor de 300 mil estudios de diagnóstico al año y son fundamentales en el tratamiento de una gran variedad de enfermedades.

El espectro de utilidad de los radiofármacos es tal, que permiten el diagnóstico y terapia de enfermedades en tiroides, enfermedad de Hodking, problemas infecciosos, tumores en la cresta neural (cráneo), además de funcionar como paliativo en enfermedades como cáncer óseo, de mama, próstata y pulmón.

La PPR es la única instalación en el país dedicada a la producción de radiofármacos para el sector Salud. Gracias a su labor se beneficia a la población mexicana, mediante el diagnóstico y tratamiento temprano de enfermedades, ya que cubre un poco más del 80% de la demanda nacional en medicina nuclear y compite con productos de importación de múltiples empresas.

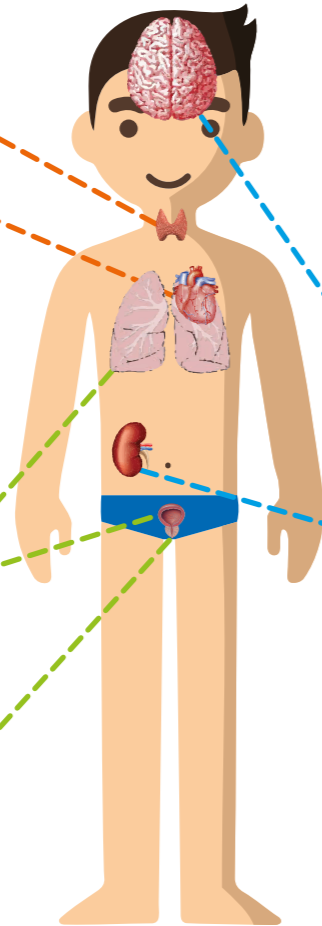
Ejemplos del uso de radiofármacos

1. Radiofármacos

- **Yoduro-131 de sodio:** diagnóstico y terapia de tiroides.
- **Cloruro de talio-201:** tratar dificultades de irrigación sanguínea al corazón.
- **Citrato de Galio-67:** diagnóstico de enfermedades infecciosas y abscesos.

2. Moléculas marcadas

- **MIBG-I-131:** detección y tratamiento de tumores derivados de la cresta neural (cráneo).
 - **¹⁵³Sm-EDTMP:** tratamiento paliativo de dolor en pacientes de cáncer de mama, próstata o pulmón.
- Unidosis de moléculas marcadas con Lutecio-177 (Lu-177)**
- **¹⁷⁷Lu-DOTA-TOC:** Tratamiento de tumores del sistema nervioso.
 - **¹⁷⁷Lu-DOTA-iPSMA:** Tratamiento de cáncer de próstata.



3. Kits fríos (precursores de radiofármacos)

- **Ácido dietilentriaminopentacético (DTPA):** Centelleografía (técnica diagnóstica que se basa en la introducción de isótopos radiactivos en el paciente) renal y cerebral.
- **Dimero de etilencisteina (ECD):** Diagnóstico de epilepsia, Alzheimer, demencia, migrañas y tumores de cerebro.
- **Benzoilmercaptoacetiltriglicina (Bz-MAGIII):** Estudios de la función renal.
- **HYNIC-bombesina/RGD, HYNIC-exendin/octreótido:** agentes de detección de cáncer.

EDILBERTO GARZA VIELMA

Estudió la Licenciatura en Química Industrial en la Universidad Autónoma de Coahuila (UAdeC). Actualmente es Jefe del Departamento de Materiales Radiactivos.

Está orgulloso de colaborar en la implementación y adecuación de las áreas del Laboratorio de Precursores y de la Planta de Producción de Radiofármacos. Sus historias favoritas son Don Quijote de la Mancha y Dr. Zhivago. Su fruta predilecta es el kiwi. Su pasatiempo es ver fútbol americano. Admira a Isaac Newton, Albert Einstein y Leonardo Da Vinci. La frase con la que se identifica es: "Vive como si fueras a morir mañana, aprende como si fueras a vivir siempre", de Mahatma Gandhi. El adjetivo que lo describe es *entusiasta*.



**FRANCISCO
EPPENS
HELGUERA**

Estudió pintura y escultura en la Academia de Bellas Artes de San Carlos de la UNAM, en la Ciudad de México.

Su trabajo fue influenciado por el movimiento artístico conocido como "Renacimiento mexicano" (etapa artística mexicana que reflejó el fin de la Revolución Mexicana y la reconstrucción del tejido social). Las obras de Eppens interpretan la realidad simbólicamente y tienen múltiples elementos nacionalistas.

En 1969 rediseñó el escudo mexicano que es utilizado actualmente. En Ciudad Universitaria creó los murales "La vida, la muerte, el mestizaje y los cuatro elementos", y "La superación del hombre por medio de la cultura", ubicados en la Facultad de Medicina y Odontología, respectivamente.

Francisco Eppens (1913-1990) especializó su trabajo en pintura, escultura, obra mural y dibujo, en sus obras artísticas reflejó sus ideas sobre la modernidad y el compromiso social.



Mural realizado por el artista plástico mexicano **Francisco Eppens Helguera** en 1966, ubicado en el exterior del edificio del reactor TRIGA Mark III, dentro de las instalaciones del Centro Nuclear "Dr. Nabor Carrillo Flores", sede del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

Como gran parte de la obra de Eppens, tiene múltiples elementos nacionalistas. Las obras de Eppens son figurativas e interpretan la realidad de una manera simbólica. En este mural hace una alegoría de una **mujer de rasgos indígenas**, de cuya mano izquierda surge un **halo azul**, que semeja el **efecto Cherenkov** producido por los reactores nucleares. Por ello, predomina la gama cromática en tonos azules.

Esta obra, de **200 metros cuadrados**, fue realizada en mosaico veneciano con más de **1 millón de piezas**.

**El núcleo
y la energía nuclear**

PORTAFOLIO SOLUCIONES INTEGRALES

El Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) ofrece un amplio portafolio de servicios de alta especialización en distintos sectores industriales.

INDUSTRIA



- > • Estudio, caracterización y análisis de materiales
- Soporte tecnológico a centrales de generación eléctrica
- Diseño y mantenimiento de instrumentación nuclear
- Calibración de instrumentos de medición



SALUD



- > • Investigación, producción y suministro de radiofármacos
- Esterilización de dispositivos médicos y de materias primas para la industria farmacéutica, alimenticia y cosmética
- Banco de Tejidos Radioesterilizados para su uso clínico en tratamientos de quemaduras en la piel



AMBIENTE



- > • Estudios integrales de contaminación ambiental
- Estudios sobre el origen y dinámica de contaminantes
- Determinación de paleotemperatura en campos petroleros



EDUCACIÓN CONTINUA



- > • Encargado de Seguridad Radiológica (ESR)
- Personal Ocupacionalmente Expuesto (POE)
- Diagnóstico médico con rayos-X
- Manejo de residuos peligrosos biológico-infecciosos



SEGURIDAD RADIOLÓGICA



- > • Asesoría en protección radiológica para uso y posesión de material radiactivo
- Transporte de material radiactivo
- Recolección, transporte, recepción, tratamiento y almacenamiento de desechos radiactivos



CONTACTO
Departamento de Promoción y Mercado

☎ **5329 7200**
ext. 14630 y 14631



ININmx



@inin_mx



gob.mx/inin



ININmx



ININmx



instituto nacional de
investigaciones nucleares