

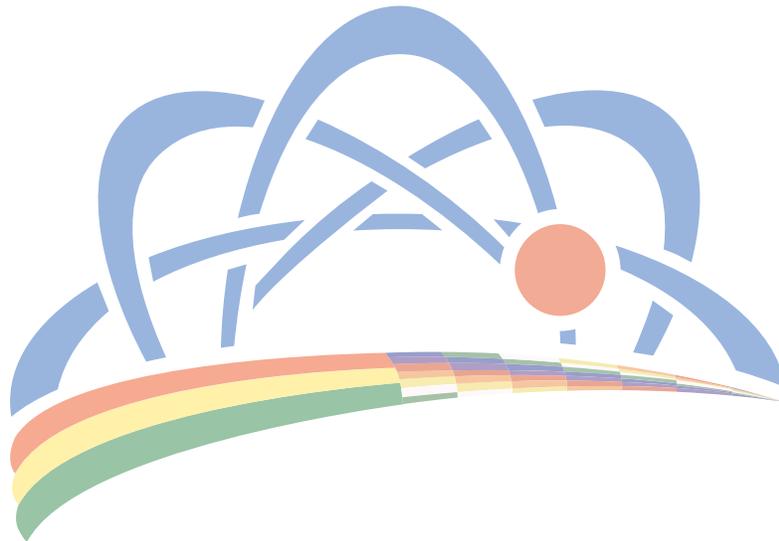


Agencia  
Boliviana de  
Energía  
Nuclear



ESTADO PLURINACIONAL DE  
**BOLIVIA**

MINISTERIO DE  
HIDROCARBUROS Y ENERGÍAS



# FUNDAMENTOS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA NUCLEAR TOMO 3



aplicaciones  
en salud



aplicaciones  
en la industria



ciclo del  
combustible



aplicaciones  
nucleares



centro de  
investigaciones

Esta publicación fue elaborada por la Agencia Boliviana de Energía Nuclear – ABEN y se enmarca en la Constitución Política del Estado, en los trece pilares de la Agenda Patriótica del Bicentenario 2025 y en el Programa Nuclear Boliviano – PNB.

Primera edición, junio 2023



©AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

#### **DIRECCIÓN GENERAL**

Ing. Hortensia Jiménez Rivera  
Directora General Ejecutiva ABEN

#### **ELABORACIÓN DE CONTENIDOS**

Equipo técnico ABEN

#### **REVISIÓN DE CONTENIDOS**

Ing. Hortensia Jiménez Rivera  
Lic. Luis Fernando Cáceres Choque  
Ing. Vivían Waira Pabón Coela

#### **EDICIÓN DE TEXTOS**

Ing. Sergio Fabian Fernandez Quiroga

#### **DISEÑO, DIAGRAMACIÓN E IMPRESIÓN**

Editorial del Estado Plurinacional de Bolivia

**DEPÓSITO LEGAL:** 4-1-162-2023 P.O.

PRIMERA EDICIÓN

LA PAZ - BOLIVIA



## PRESENTACIÓN

“Las tecnologías nucleares son un conjunto de soluciones de ingeniería que permiten utilizar las re- acciones nucleares y la radiación ionizante en diversos campos como medicina, industria, agricultura, geología, educación, entre otros, aportando al desarrollo de la economía nacional de los países que las usan con fines pacíficos”. Las áreas más destacadas de sus aplicaciones son la energía nuclear y la medicina nuclear.

Bolivia establece ejes estratégicos, resultados y acciones en el Plan de Desarrollo Económico Social (PDES), articulado con la Agenda Patriótica 2025, siendo uno de sus ámbitos lograr la soberanía científica tecnológica con identidad propia que busca “promover e invertir responsablemente en la investigación y desarrollo de tecnología nuclear que nos permita vivir bien”.

En este sentido, el gobierno nacional de Luis Arce Catacora está desarrollando políticas, programas y proyectos de aplicaciones de la tecnología nuclear que permitan fortalecer y ampliar nuestra base productiva, fomentando la formación y especialización de profesionales, desarrollando conocimiento y constante entrenamiento de los recursos humanos bolivianos.

En ese sentido, la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN), a través de la implementación del Programa Nuclear Boliviano (PNB), presenta el texto “Fundamentos de Ciencia y Tecnología Nuclear” Tomo 3, teniendo como principal objetivo la difusión de los proyectos en el área nuclear de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear, detallando los principales componentes del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN) y de la Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia (CMNyR). Esperamos que este texto ahonde en el conocimiento de las bases fundamentales de la ciencia y tecnología nuclear, y sea de utilidad para los bolivianos y las bolivianas que aspiran construir una Bolivia tecnológicamente de avanzada en América Latina.

Ing. Hortensia Jiménez Rivera  
DIRECTORA GENERAL EJECUTIVA  
AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

## Prefacio

En su primer número, *Fundamentos de Ciencia y Tecnología Tomo 1* se brindó a los lectores conocimiento acerca de la física nuclear, química nuclear, la interacción de los fotones con la materia y un resumen de mitos de la tecnología nuclear respondidos con fundamentos científicos.

En *Fundamentos de Ciencia y Tecnología Tomo 2* se entregó al lector un resumen de las aplicaciones de la tecnología nuclear en la medicina, el medio ambiente, la agricultura, la industria y la energía. Se detalló algunas de las investigaciones que se podrán realizar en Bolivia gracias al Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear y la Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia.

En *Fundamentos de Ciencia y Tecnología Tomo 3* se pretende brindar al lector un breve resumen sobre la historia de la tecnología nuclear en Bolivia, desde su inicio hasta la actualidad. Asimismo, se explicará qué es la Agencia Boliviana de Energía Nuclear y cómo apoya al Programa Nuclear Boliviano; por último, se dará una explicación detallada de los centros nucleares que se están implementando en el país:

1. Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear:
  - Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica
  - Centro Multipropósito de Irradiación Gamma
  - Complejo del Reactor Nuclear de Investigación
  - Laboratorios especializados
2. Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia

Dando detalles sobre las áreas de investigación, servicios y beneficios para la población boliviana que traerán estos centros de última tecnología.

## Contenido

<b>1</b>	<b>Reseña histórica de la aplicación de la tecnología nuclear en Bolivia .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>La Agencia Boliviana de Energía Nuclear.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN) .....</b>	<b>5</b>
3.1	Objetivo del CIDTN.....	6
3.2	Componentes del CIDTN.....	7
3.3	Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica .....	8
3.3.1	Generalidades .....	8
3.3.2	Principio de la tecnología y funcionamiento .....	8
3.3.3	Áreas del CCRP .....	10
3.3.4	Aplicaciones .....	15
3.4	Centro Multipropósito de Irradiación (CMI) .....	16
3.4.1	Generalidades .....	16
3.4.2	Principios de la Tecnología.....	16
3.4.3	Áreas del CMI.....	17
3.4.4	Aplicaciones, beneficios y líneas de investigación .....	20
3.5	Reactor Nuclear de Investigación (RNI).....	25
3.5.1	Generalidades .....	25
3.5.2	Funcionamiento de un RNI .....	27
3.5.3	Instalaciones y aplicaciones .....	32
3.6	Laboratorios especializados .....	38
3.6.1	Generalidades .....	38
3.6.2	Principios de la tecnología.....	38
3.6.3	Instalación .....	39
3.6.4	Aplicaciones .....	41
<b>4</b>	<b>La Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia (CMNyR).....</b>	<b>42</b>
4.1	Objetivo de la Red de CMNyR.....	42
4.2	Las 3 principales áreas de un CMNyR.....	43
4.3	Tipos de investigación en un CMNyR .....	47
<b>5</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>50</b>
	<b>Bibliografía.....</b>	<b>53</b>



## 1 Reseña histórica de la aplicación de la tecnología nuclear en Bolivia

El desarrollo de la tecnología nuclear en Bolivia se remonta a la década de 1960, con la incorporación como Estado Miembro ante el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA); de esa manera, da los primeros pasos en el ámbito nuclear.

En la década de los 70 se inicia la operación de una planta piloto de uranio llegando a producir algunos kilogramos de este material, con una pureza del 60%; sin embargo, debido a una falta de voluntad política y falta de recursos financieros este proyecto termina ahí.

Más adelante se incorpora el uso de ciertos radioisótopos enfocados a la medicina nuclear, continuando hasta 1992 cuando se instalan los primeros equipos de Tomografía Computarizada de Fotón Único (SPECT, por sus siglas en inglés) en algunas ciudades del país, todo con ayuda y supervisión del OIEA [1].

Debido a una falta de inversión y voluntad política no se desarrollan mayores aplicaciones de la tecnología nuclear (exceptuando aplicaciones pequeñas en la medicina) en el país desde la década de los 60 hasta el 2015.

En el año 2015 se publica el Programa Nuclear Boliviano (PNB) enmarcado en la Agenda Patriótica 2025 del Gobierno nacional, en el que se planifica la construcción e implementación del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN), con el objetivo de apoyar a los sectores de salud, industria, ciencia, tecnología y académico.

El año 2016, a través del Decreto Supremo N° 2654 de 20 de enero de 2016, se declara de carácter estratégico y de prioridad nacional la ejecución e implementación del Programa Nuclear Boliviano (PNB) en todas sus etapas, componentes y aplicaciones, debiendo el nivel central del Estado, las entidades territoriales autónomas y las instituciones privadas prestar el apoyo necesario para su desarrollo.

Considerando la importancia estratégica de la ejecución del PNB y al ser de prioridad nacional la implementación de políticas y programas para el desarrollo de la aplicación de la energía nuclear e investigación, en fecha 9 de marzo de 2016 se crea la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) con la finalidad de desarrollar, suministrar y comercializar bienes y servicios de tecnología nuclear con fines pacíficos, con las siguientes funciones:

1. Proponer y desarrollar planes y programas.
2. Suministrar o comercializar bienes.
3. Desarrollar y prestar servicios.
4. Promover y desarrollar la investigación.
5. Operar las instalaciones nucleares.
6. Ejercer la propiedad y resguardo de material fisionable.
7. Ejercer la propiedad estatal de los materiales radiactivos.

En el año 2016 a través de la Ley N° 788 se ratifica el “Acuerdo entre el Gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia y el Gobierno de la Federación de Rusia sobre la cooperación en la construcción del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear en el territorio del Estado Plurinacional de Bolivia”.

En el año 2017 a través de la Ley N°1003 se asigna la competencia de tecnología nuclear con fines pacíficos al nivel central del Estado y se establecen las condiciones para la construcción de infraestructura e implementación del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN).

En el año 2018 se firma el contrato entre la Agencia Boliviana de Energía Nuclear y la empresa argentina INVAP para la construcción de la Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia en las ciudades de El Alto, La Paz y Santa Cruz. Este contrato igual incluye la capacitación del personal boliviano necesario para la óptima operación de los 3 centros.

La ABEN es la encargada de la implementación, operación y préstamo de servicios de los centros nucleares como el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN) y la Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia (CMNyR), los cuales se detallarán en los próximos capítulos, además de capacitar recursos humanos en las aplicaciones de la tecnología nuclear con fines pacíficos.

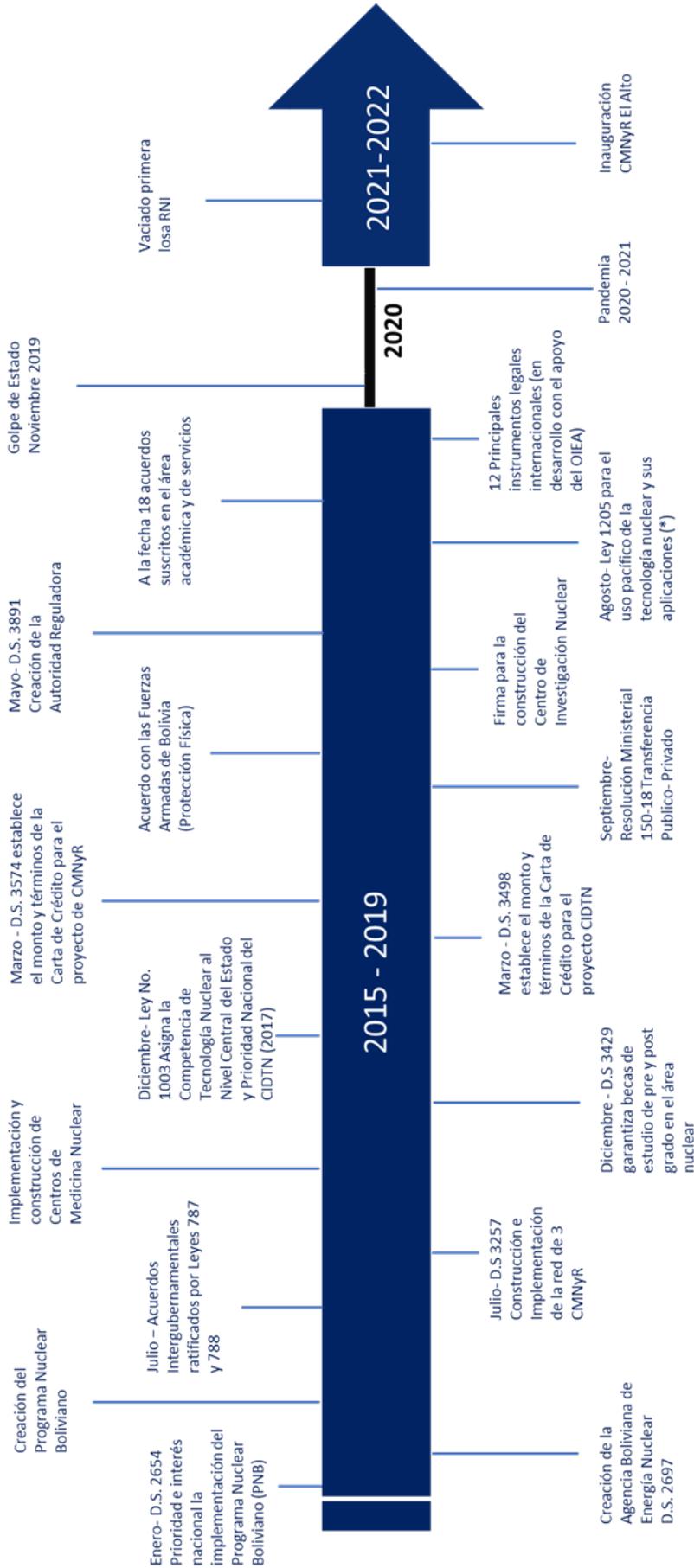


Figura 1 Línea de tiempo de la historia de la tecnología nuclear en Bolivia. Fuente: Elaboración propia

## 2 La Agencia Boliviana de Energía Nuclear

Considerando la importancia estratégica de la ejecución del Programa Nuclear Boliviano (PNB) y al ser de prioridad nacional la implementación de políticas y programas para el desarrollo de la aplicación de la energía nuclear e investigación, en fecha 9 de marzo de 2016 se crea la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) con la finalidad de desarrollar, suministrar y comercializar bienes y servicios de tecnología nuclear con fines pacíficos, cuyas funciones se muestran en la figura 2:

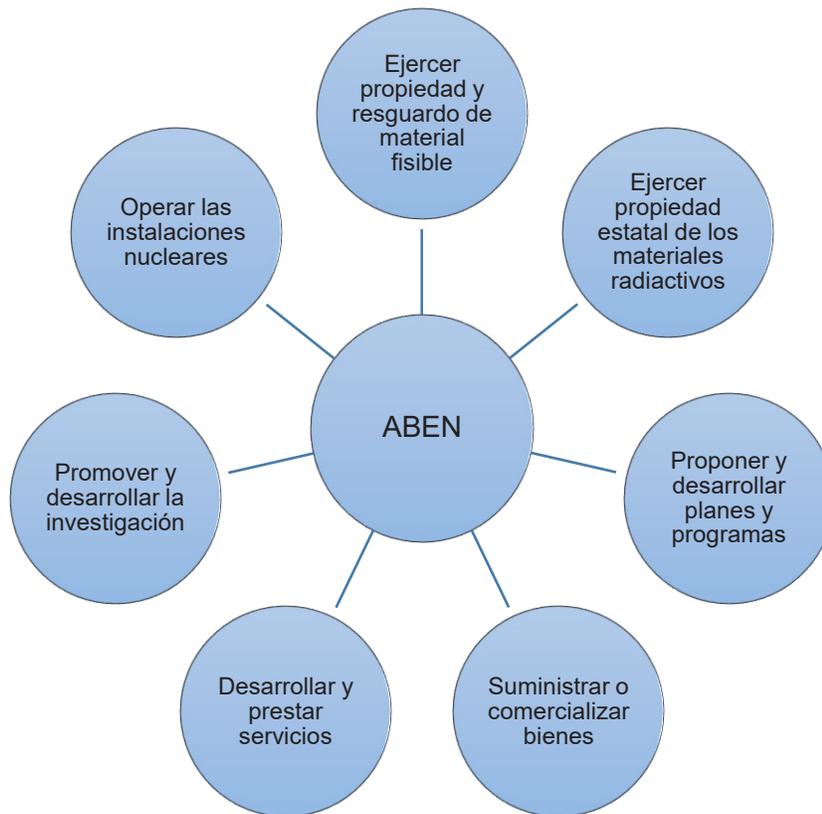


Figura 2 Objetivos de la Agencia Boliviana de Energía Nuclear Fuente: Elaboración propia

La ABEN es la encargada de la implementación, la operación y préstamo de servicios de los centros nucleares como el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN) y la Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia (CMNyR), los cuales se detallarán en los próximos capítulos, además de capacitar recursos humanos en las aplicaciones de la tecnología nuclear con fines pacíficos.

### 3 Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN)



*Figura 3 Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear CIDTN [2].*

El Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN) (Figura 3) es construido en el marco del contrato firmado entre Bolivia y Rusia. El CIDTN se encuentra ubicado en la zona de Parcopata, distrito 8 de la ciudad de El Alto, departamento de La Paz. Geográficamente, el CIDTN se sitúa a más de 4.000 metros sobre el nivel del mar, sobre la Planicie Altiplánica que forma parte de la cuenca endorreica. La construcción de esta infraestructura se constituye en un paso muy importante para nuestro país en cuanto a desarrollo científico en tecnología nuclear.

En el año 2016 se firma el Acuerdo intergubernamental entre el gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia y el gobierno de la Federación de Rusia, sobre la cooperación en el campo del uso pacífico de la tecnología nuclear.

En septiembre del 2017, Bolivia y Rusia firmaron un acuerdo para la construcción del Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN). Este fue un paso importante para Bolivia hacia el desarrollo científico y tecnológico, con identidad propia.

El proyecto se realiza sobre la base de la tecnología nuclear rusa y una oferta completa de la Corporación Estatal de Energía Atómica “ROSATOM”<sup>1</sup>, que comprende la construcción del CIDTN, el desarrollo de recursos humanos y la infraestructura nuclear boliviana, además

---

<sup>1</sup> Rosatom es la corporación nuclear estatal de la Federación Rusa, que reúne a más de 350 empresas nucleares y a institutos de investigación.

de la cooperación científico-tecnológica mutua. Por su ubicación geográfica, el CIDTN constituye en el primer centro más alto del mundo, y el de más alto nivel científico-tecnológico-nuclear de la región en los últimos tiempos.

### 3.1 Objetivo del CIDTN

El CIDTN tiene como objetivo beneficiar y coadyuvar a las necesidades de los sectores de la salud, industria, ciencia y tecnología, aportar en la formación y capacitación de recursos humanos para la aplicación de la tecnología nuclear para dar solución a diferentes problemáticas de nuestro país y ayudar a alcanzar objetivos trazados dentro de la Agenda Patriótica. Principalmente, el CIDTN ayudará en el cumplimiento de los 3er y 4to pilares de la Agenda Patriótica 2025 (Soberanía Científica y Tecnológica, y Soberanía alimentaria, respectivamente).

Los diferentes componentes nucleares y radiológicos que conforman el CIDTN permitirán realizar investigaciones, producciones industriales y servicios tecnológicos de alto nivel.

Entre las producciones industriales se encuentran los diferentes tipos de radiofármacos conocidos y nuevos radiofármacos diseñados sobre la base de compuestos activos de plantas medicinales, dando valor al conocimiento ancestral boliviano. Los radiofármacos que se producirán serán de uso exclusivo en medicina nuclear, cuyo uso servirá para el diagnóstico y tratamiento de diferentes enfermedades neoplásicas<sup>2</sup>. Los diagnósticos tempranos y consecuentemente los adecuados tratamientos de este tipo de enfermedades permitirán tener una mejor calidad de vida a la población boliviana que sufre de este tipo de enfermedades.

Por otro lado, las irradiaciones industriales, investigaciones y servicios que ofrecerá el CIDTN permitirá lo siguiente:

- La comercialización de los alimentos a nivel internacional.
- La conservación de granos y cereales.
- El mejoramiento genético de semillas.
- La preservación del patrimonio cultural.
- El fortalecimiento de la comercialización de minerales, dándole mayor valor agregado en mercados internacionales.

---

<sup>2</sup> Las enfermedades neoplásicas son aquellas en las que existen células anormales y estas se multiplican sin control invadiendo tejidos cercanos.

- Combatir las plagas que agobian a la salud de la población boliviana por la diseminación de enfermedades infectocontagiosas que además perjudican a los agricultores.
- Acrecentar y generar nuevas aplicaciones industriales a través de las aplicaciones de la tecnología nuclear.
- Contribuir con la formación de recursos humanos en el área de la tecnología nuclear.

En las siguientes secciones se detallarán cada uno de los componentes que formarán parte del Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Nuclear.

### 3.2 Componentes del CIDTN

El CIDTN está constituido por los siguientes componentes:

- Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica (CCRP).
- Centro Multipropósito de Irradiación (CMI) y sus laboratorios.
- Complejo del Reactor Nuclear de Investigación (RNI).
- Laboratorio de Radioisótopos.
- Laboratorio de Análisis de Activación Neutrónica.
- Laboratorio de Plasma.
- Laboratorio de Radiobiología y Radioecología.
- Complejo Técnico de Ingeniería.
- Edificio de Capacitación y Entrenamiento.
- Edificio Administrativo.
- Edificio de Bomberos.

La descripción de cada uno de los componentes antes mencionados es realizada a continuación.

### 3.3 Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica

#### 3.3.1 Generalidades

El Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica (CCRP) fue proyectado con el objetivo de producir radioisótopos y radiofármacos, estos últimos de distribución a nivel nacional e internacional para su uso en medicina nuclear. Es el primer laboratorio industrial radiofarmacéutico de alta capacidad en Bolivia para la producción de radiofármacos tanto para diagnóstico como para tratamiento, mejor conocidos como radiofármacos teranósticos.

El uso de radiofármacos fortalecerá los servicios de diagnóstico temprano y tratamiento de enfermedades oncológicas, neurológicas y cardiológicas, entre otras, que aquejan a la población boliviana. De esta manera se reducirá el índice de mortalidad de la población que adolece este tipo de enfermedades.

El CCRP estará enfocado principalmente en:

- Producir radiofármacos utilizados en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades oncológicas, cardiológicas y neurológicas para su uso en equipos PET<sup>3</sup> y SPECT<sup>4</sup> implementadas en centros de medicina nuclear que requieran de estos insumos.
- Realizar estudios preclínicos con nuevos radiofármacos, considerando la fusión entre el milenar conocimiento de la medicina tradicional con la novedosa ciencia y tecnología nuclear aplicada en la salud para desarrollar estudios de diagnóstico y tratamiento.

Adicionalmente, con la incorporación de profesionales bolivianos especialmente formados en la operación del CCRP, se posibilita la enseñanza, educación y formación de nuevos recursos humanos, que garantizará la operación y funcionamiento del CCRP a largo plazo.

#### 3.3.2 Principio de la tecnología y funcionamiento

Un Ciclotrón es un acelerador de partículas que trabaja acelerando un haz de partículas cargadas (por lo general protones) los cuales, tras alcanzar una energía dada, son transportados para impactar con otros isótopos (generalmente estables) generando una reacción nuclear convirtiendo estos isótopos en radioisótopos.

---

<sup>3</sup> Tomógrafo por emisión de positrones

<sup>4</sup> Tomógrafo computarizado por emisión de fotón único

El ciclotrón implementado en el CCRP es un acelerador de partículas, modelo TR-24, de la empresa canadiense ACSI, es capaz de operar con energía variable de entre 18 y 24 MeV y con corriente de haz de hasta 300  $\mu$ A. El TR-24 posee cinco estaciones de blancos, pudiendo operar simultáneamente con doble haz de extracción, irradiando dos blancos en estado sólido, líquido y/o gaseoso.

Mayor información en el siguiente link:  
<http://educa.minedu.gob.bo/concyt/pagina/12> [3]

Los radioisótopos que se producirán en el ciclotrón son mostrados en la tabla 1. Inicialmente se producirán  $^{18}\text{F}$  y  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , por su mayor aplicación en los diferentes tipos de diagnósticos. Para la producción de radioisótopos de  $^{18}\text{F}$  se cuenta con 2 tamaños de blancos, lo que permitirá obtener diferentes actividades, 6 y 9 Ci, respectivamente, por 2 horas de irradiación:

Tabla 1. Radioisótopos y capacidades de producción del ciclotrón. Elaboración propia

Radioisótopo	Reacción	Estado del blanco	Capacidad de producción / Tiempo de irradiación (h)	Periodo de semidesintegración (min)
$^{18}\text{F}$	$^{18}\text{O} (p,n)^{18}\text{F}$	Líquido	9 Ci / 2 h (alta potencia) 6 Ci / 2 h (baja potencia)	109.7
$^{11}\text{C}$	$^{14}\text{N} (p,\alpha)^{11}\text{C}$	Gaseoso	3,5/1,2 Ci de $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ / 0,5 h	20
$^{64}\text{Cu}$	$^{64}\text{Ni} (p,n)^{64}\text{Cu}$	Sólido	250 mCi / 4 h	762
$^{68}\text{Ga}$	$^{68}\text{Zn}(p,n)^{68}\text{Ga}$	Sólido	200 mCi / 1 h	67.8
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	$^{100}\text{Mo} (p,2n)^{99\text{m}}\text{Tc}$	Sólido	10 Ci / 6 h	360
$^{123}\text{I}$	$^{124}\text{Xe} (p,pn)^{123}\text{Xe} - ^{123}\text{I}$	Gaseoso	200 mCi / 4 h	793.2
$^{124}\text{I}$	$^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$	Sólido	10 mCi / 4 h	6019.2
$^{89}\text{Zr}$	$^{89}\text{Y} (p,n)^{89}\text{Zr}$	Sólido	65 mCi / 4 h	4704.6

[Ci]<sup>5</sup>= Unidad física de la radioactividad, Curie.

Una vez que se produce el radioisótopo, este es enviado a través de líneas de transferencia a celdas calientes equipadas con diferentes módulos de síntesis y fraccionamiento de radiofármacos. Estos módulos vienen con los insumos necesarios (reactivos) para producir el radiofármaco sin la intervención directa del operador. Las celdas calientes tienen un

<sup>5</sup> El Curie es una unidad de actividad radiactiva, nombrada así en homenaje a Marie y Pierre Curie, representa  $3,7 \cdot 10^{10}$  desintegraciones por segundo.

espesor de plomo variable de acuerdo con el tipo de trabajo que se realizará en la celda como blindaje que protege al operador de la radiación ionizante emitida por los radioisótopos durante la producción del radiofármaco.

En la figura 4 se muestra el procedimiento de síntesis de  $^{18}\text{F}$ -FDG (Fluorodesoxiglucosa).

Mayor información en el siguiente link:  
<https://www.youtube.com/watch?v=L1wvxYj0UGY> [4].

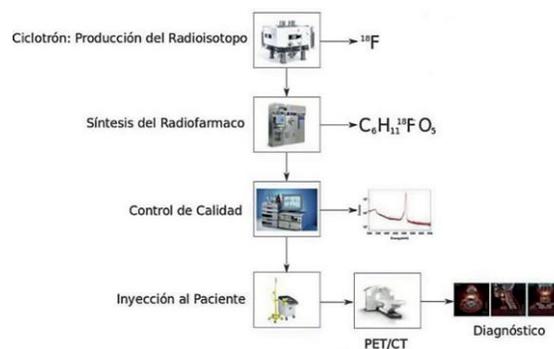


Figura 4 Esquema de trabajo Ciclotrón desde la producción del radioisótopo hasta la obtención del diagnóstico [5].

### 3.3.3 Unidades del CCRP

El CCRP está compuesto por 4 principales unidades:

1. Unidad de producción de radioisótopos.
2. Unidad de producción de radiofármacos.
3. Unidad de control de calidad.
4. Unidad de preclínica.

Las unidades más importantes del CCRP son la unidad de producción de radioisótopos y la unidad de producción de radiofármacos, debido a que en estas unidades se debe tener un alto grado de conocimiento en la operación de maquinaria y equipos necesarios para llevar a cabo la síntesis de radioisótopos y radiofármacos.

**¿Sabías que** dentro del área de producción de radioisótopos se encuentra el búnker del ciclotrón, cuyos muros de concreto tienen un espesor de 2,5 m y una puerta móvil de 10 toneladas para atenuar las radiaciones que se generarán dentro de esta sala cuando el equipo está en plena operación?

### 3.3.3.1 Unidad de producción de radioisótopos

En esta unidad se encuentra instalado El ciclotrón TR-24, que es el principal equipamiento del CCRP, con el cual se producirán los distintos radioisótopos PET y SPECT (Figura 5).



Figura 5 Ciclotrón TR-24 [6]

- Ciclotrón TR-24: capaz de producir radioisótopos PET y SPECT.
- Estaciones de blancos: estos dispositivos mecánicos operados a distancia se utilizan para albergar, enfriar, monitorear y manipular un blanco de irradiación, se tienen estaciones de blancos líquidos, sólidos y gaseoso.

El ciclotrón se encuentra blindado por un búnker de paredes y techo de 2,5 m de espesor en concreto y una puerta móvil de 10 toneladas. La salida de protones es realizada por dos líneas de haces, las cuales a la vez se dividen en dos y en tres líneas en las cuales se encuentran en las estaciones de blancos, que son dispositivos mecánicos operados a distancia. Los mismos son utilizados para albergar, enfriar, monitorear y manipular un blanco de irradiación. Se tienen estaciones de blancos para sustancias líquidas, sólidas y gaseosas.

Las reacciones nucleares por las cuales se obtendrán estos radioisótopos en el Ciclotrón se detallan en la tabla a continuación:

Tabla 2 Reacciones de obtención de radioisótopos. Elaboración propia

Radioisótopo	Reacción Nuclear
$^{18}\text{F}$	$^{18}_8\text{O} + ^1_1\text{p} \rightarrow ^{18}_9\text{F} + ^1_0\text{n}$
$^{11}\text{C}$	$^{14}_7\text{N} + ^1_1\text{p} \rightarrow ^{11}_6\text{C} + 2^4_2\alpha$
$^{64}\text{Cu}$	$^{64}_{28}\text{Ni} + ^1_1\text{p} \rightarrow ^{64}_{29}\text{Cu} + ^1_0\text{n}$
$^{68}\text{Ga}$	$^{68}_{30}\text{Zn} + ^1_1\text{p} \rightarrow ^{68}_{31}\text{Ga} + ^1_0\text{n}$
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	$^{100}_{42}\text{Mo} + ^1_1\text{p} \rightarrow ^{99\text{m}}_{43}\text{Tc} + 2^1_0\text{n}$

Radioisótopo	Reacción Nuclear
$^{123}_{54}\text{I}$	$^{124}_{54}\text{Xe} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{123}_{54}\text{Xe} + {}^1_0\text{n} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{123}_{53}\text{I}$
$^{124}_{52}\text{I}$	$^{124}_{52}\text{Te} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{124}_{53}\text{I} + {}^1_0\text{n}$
$^{89}_{39}\text{Zr}$	$^{89}_{39}\text{Y} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{89}_{40}\text{Zr} + {}^1_0\text{n}$

### 3.3.3.2 Unidad de Producción de radiofármacos

En esta unidad se producen radiofármacos para su uso en pacientes, tiene una capacidad de producción de distintos tipos de radiofármacos a partir del radioisótopo producido en el ciclotrón y distintos tipos de precursores. Para realizar estas tareas cuenta con celdas calientes blindadas de síntesis y fraccionamiento o dispensación, además del personal capacitado para estas tareas.

La unidad también se ocupa de la preparación del bulto (blindaje + radiofármaco) y etiquetado del producto según normativa internacional para su distribución. La preparación del bulto se realiza siempre y cuando el producto es liberado por la unidad de Control de Calidad. En la figura 6 se puede observar el radiofármaco con su blindaje, debidamente etiquetado.



Figura 6 Radiofármaco con su blindaje [7].

### 3.3.3.3 Unidad de Control de Calidad

En esta unidad se encuentra el laboratorio de Control de Calidad del CCRP, cuenta con equipamiento tecnológico capaz de dar una respuesta eficaz, con calidad analítica y en cortos tiempos de ensayo.

La unidad de Control de Calidad es la encargada de realizar los análisis físico-químicos, radiactivos y biológicos al radiofármaco producido en el CCRP para verificar que el producto

<sup>6</sup> El I-123 se produce indirectamente de la irradiación del Xe-124 y posteriormente se deja decaer un tiempo determinado para la obtención del I-123.

cumple con los requisitos legales establecidos y con los parámetros de calidad establecidas en las especificaciones.

El control de calidad se realiza en una fracción del producto, una serie de ensayos químicos, radiactivos y biológicos son llevados a cabo, de acuerdo con monografías establecidas en farmacopeas oficiales reconocidas por la legislación nacional vigente, como ser la Farmacopea Europea, la Farmacopea de los Estados Unidos, entre otras. Los resultados obtenidos permiten liberar o rechazar el producto.

Si el producto cumple satisfactoriamente con los requisitos y especificaciones es liberado. Esto significa que el mismo puede ser distribuido a los diferentes centros de medicina nuclear que solicitaron el producto para su administración a pacientes.

#### 3.3.3.4 Unidad de Preclínica

Esta unidad está destinada a realizar el estudio de nuevos radiofármacos a través de la investigación con radioisótopos producidos en el ciclotrón y precursores conocidos o nuevos (compuestos activos de plantas medicinales de Bolivia).

Para llevar a cabo estas investigaciones la unidad cuenta con celdas calientes de síntesis, además de todo el equipamiento para realizar el control de calidad del radiofármaco.

Los radiofármacos desarrollados serán sometidos a estudios preclínicos antes de su uso en seres humanos, para ello se cuenta con un Mini-PET Vector 5 que permite obtener imágenes PET/SPECT/CT en animales (Figura 7).



Figura 7 Mini-Pet de Estudios Preclínicos [8]

Esta unidad será de vital importancia para hacer investigación en preclínica. Entre las principales líneas de estudio se tienen:

- Evaluación del metabolismo de moléculas con acción terapéutica (nuevas, existentes) a través de la marcación con radioisótopos para estudios de enfermedades específicas.
- Estudios de la acción terapéutica de principios activos presentes en las plantas medicinales, procedentes de los diversos pisos ecológicos del país (altiplano, yungas, valles y llanos).
- Investigación y evaluación de nuevas aplicaciones de radioisótopos emergentes a nivel mundial para el área de salud.

En la figura 8 se muestra el esquema de trabajo de investigación con el Mini-PET en la unidad de Preclínica.

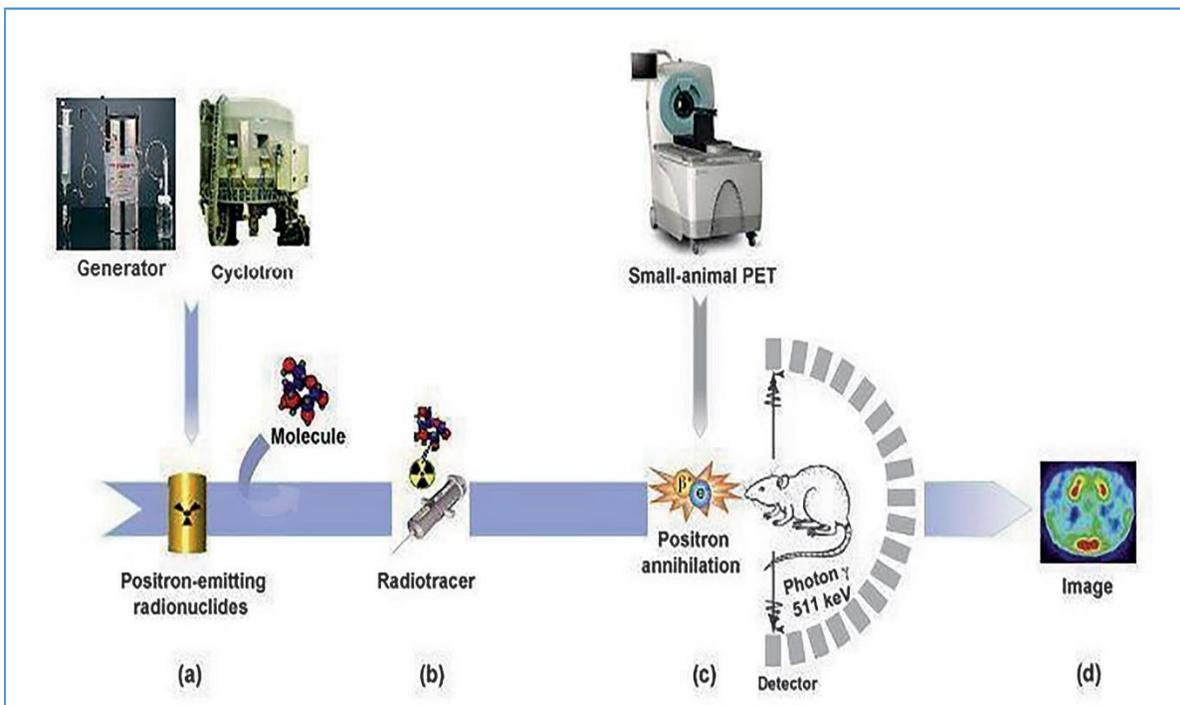


Figura 8 Esquema de trabajo de investigación con el Mini-Pet [9].

Algunos ejemplos de nuevos radioisótopos emergentes son:

- $^{89}\text{Zr}$ , El Zirconio-89 es un radioisótopo utilizado en estudios PET para estudios con anticuerpos marcados, la importancia del  $^{89}\text{Zr}$  radica en su capacidad para facilitar el seguimiento in vivo de los vectores dirigidos que requieren períodos prolongados de tiempo para obtener una óptima imagen del paciente.
- $^{61}\text{Cu}$  (Cobre-61), muchas moléculas pueden ser marcadas con isótopos del cobre, entre algunos de sus usos se tiene el marcado de tumores tipo fibrosarcomas y marcado en células blancas o rojas.

- $^{43}\text{Sc}$  (Escandio-43), y  $^{44}\text{Sc}$  (Escandio-44): pueden ser utilizados moléculas similares al Galio, por lo que tiene futuras aplicaciones en tumores neuroendocrinos.
- $^{86}\text{Y}$  (Itrio-86): es utilizado para el marcado de péptidos dirigidos al receptor de somatostatina (Tumores neuroendocrinos), y también el marcado en anticuerpos para estudio.

### 3.4 Centro Multipropósito de Irradiación (CMI)

#### 3.4.1 Generalidades

El Centro Multipropósito de Irradiación (CMI) es el primer centro de estas características en el país, esta es una instalación compleja cuyos principales componentes son el irradiador industrial e irradiador autoblandado, estas instalaciones trabajarán de manera coordinada para lograr las diversas aplicaciones que tiene la irradiación gamma.

#### 3.4.2 Principios de la Tecnología

El principio de la tecnología empleada en estas instalaciones, Irradiador Industrial e Irradiador Autoblandado, es la exposición de materiales y productos de interés a la radiación gamma, que es producida por el decaimiento radiactivo (proceso espontáneo) de la fuente radiactiva, en este caso,  $^{60}_{27}\text{Co}$  (Cobalto-60). El  $^{60}\text{Co}$  es un isótopo inestable del cobalto que es producido en reactores nucleares mediante el bombardeo de neutrones en cobalto estable. El  $^{60}\text{Co}$  decae en  $^{60}\text{Ni}$  (Níquel-60) con la posterior emisión de un electrón y antineutrino de acuerdo con el esquema de la figura 9.

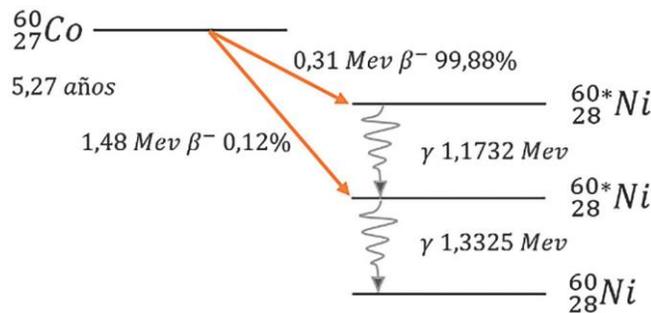
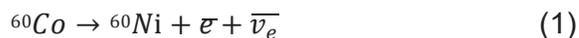


Figura 9 Esquema de desintegración radiactiva  $^{60}\text{Co}$  [10]

El níquel producido por el decaimiento beta negativo del  $^{60}\text{Co}$  (figura 9) se encuentra en un estado de excitación donde dependiendo del nivel de energía libera fotones a los cuales los denominamos rayos gamma. A continuación, se puede apreciar las diferentes reacciones nucleares que atraviesa el  $^{60}\text{Co}$  y el esquema de decaimiento del mismo.



Las principales diferencias entre el irradiador autoblandado e irradiador industrial es la capacidad de irradiación, cámara de irradiación de las muestras y/o productos, el diseño

que brinda la seguridad tecnológica y la forma de resguardo de las fuentes radiactivas. Todas estas características dan lugar a que los irradiadores tengan fines específicos, el irradiador autoblandado realizará trabajos de investigación e irradiará muestras de laboratorio, mientras que el irradiador industrial hará un trabajo de irradiación intensivo, es decir, irradiará grandes volúmenes de productos.

Antes de iniciar con la irradiación es necesario caracterizar los productos y determinar las dosis que vayan a requerir para obtener algún fin específico. En algunos casos estas dosis ya se encuentran determinadas en documentación bibliográfica, en otros casos esta información se desconoce y es necesario determinar la dosis de irradiación. Dependiendo del campo de aplicación existen métodos para determinar la dosis necesaria como, por ejemplo, podemos tomar los métodos para establecer la dosis de esterilización que se encuentran en la Organización Internacional de Normalización (ISO). Cuando se requiera alcanzar un cambio genético o modificación en propiedades físicas o químicas en algún producto alimentario o no alimentario es necesario basarse en investigaciones ya realizadas a fin de documentar los posibles resultados y con base en esta información se van realizando diferentes estudios como ser físicos, químicos, microbiológicos y genéticos.

La determinación de dosis se realiza en el irradiador autoblandado, aplicando las metodologías anteriormente mencionadas, una vez identificada la dosis máxima y mínima de irradiación del producto este es irradiado a mayor escala en el Irradiador Industrial. Para dar una idea de la capacidad de irradiación, se puede mencionar que el irradiador autoblandado cuenta con una cámara de irradiación de 3,7 litros y una actividad máxima de 12 kCi, en cambio el Irradiador Industrial cuenta con un volumen estándar aproximado de 114.000 litros por lote de irradiación y con una actividad máxima de 1000 kCi (características de diseño).

### 3.4.3 Unidades del CMI

El CMI está compuesto por 2 principales unidades:

1. Unidad del irradiador autoblandado
2. Unidad del irradiador industrial

#### 3.4.3.1 Unidad del irradiador autoblandado

En esta unidad se utiliza un equipo para irradiar muestras, materiales y productos de menor tamaño, que por sus características contractivas garantiza la protección a la radiación de

las fuentes de  $^{60}\text{Co}$  que aloja internamente, atenuando la radiación con el blindaje que posee a niveles aceptables para una operación segura.

El irradiador autoblandado cuenta con un bloque de protección superior, un bloque de protección inferior y una carcasa, las cuales son camisas de acero inoxidable rellenos de plomo, diseñados de tal forma que permitan la atenuación de la radiación gamma; asimismo, su diseño, permite el intercambio de aire y el montaje de un separador. Este separador es una estructura de wolframio con una cavidad donde se aloja un cilindro de acero inoxidable que cumple la tarea de contener la muestra a irradiar (cámara de irradiación).

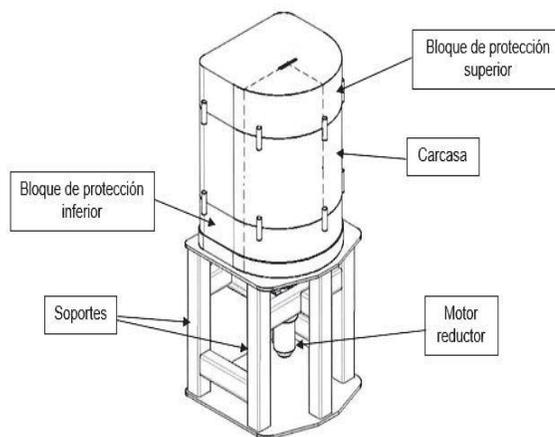


Figura 10 Esquema del Irradiador Autoblandado LGU-12 [9]

El cilindro se expone a la radiación cuando el separador gira de la posición de “carga de muestras” a la “posición de irradiación”. Una vez que el cilindro se encuentra en la “posición de irradiación” éste gira continuamente sobre su propio eje para uniformizar la dosis absorbida por la muestra, mientras que el separador rota  $180^\circ$  mediante el motor reductor del propulsor de rotación.

El irradiador autoblandado cuenta con conductos que permiten la circulación del aire, a fin de permitir el flujo de calor emitido por las fuentes radiactivas y los productos de la radiólisis del aire<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> Ozono y óxido de nitrógeno principalmente, estos productos no son radiactivos y el CMI cuenta con sistema de ventilación que garantiza la seguridad de los operadores.

El canal de fuentes radiactivas permite la carga y descarga de fuentes radiactivas al irradiador autoblandado, las cuales inmediatamente después de ser cargadas son cubiertas con tapones de wolframio.

### 3.4.3.2 Unidad del Irradiador Industrial

El Irradiador Industrial es una instalación que cuenta con diferentes componentes que permiten su funcionamiento, entre los principales se tienen los siguientes:

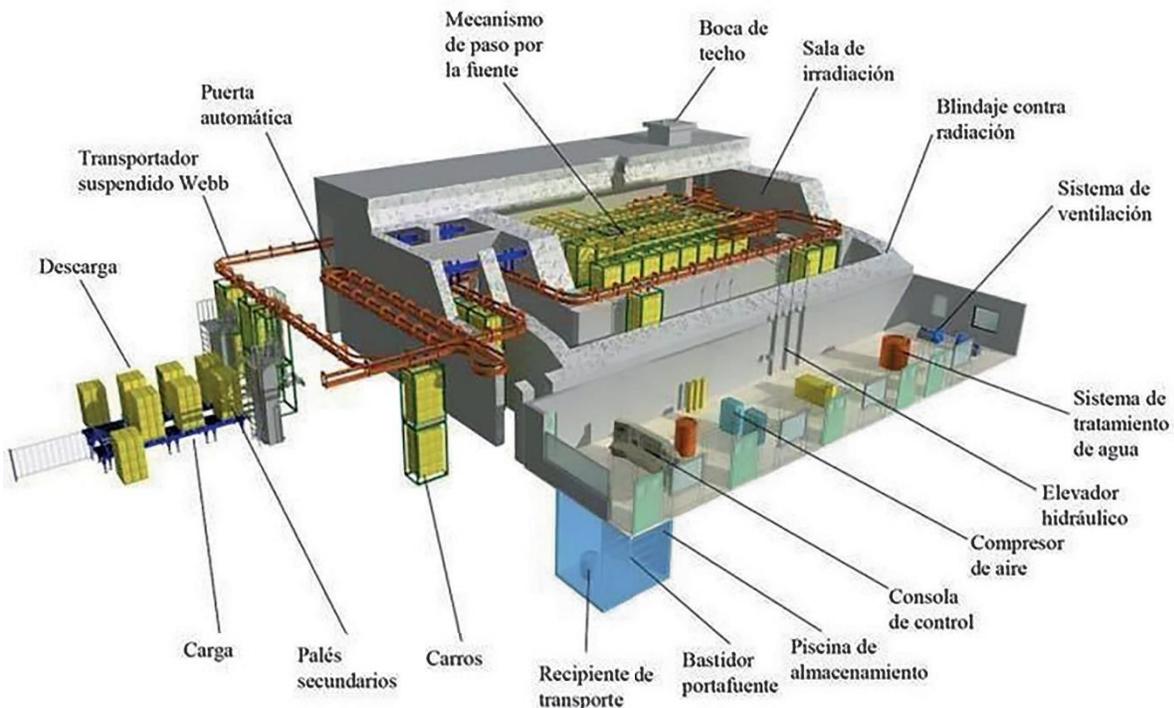


Figura 11 Infraestructura de ejemplo de un Irradiador Industrial. [10]

1. El sistema de transporte permite el ingreso de contenedores de aluminio con producto hacia la sala de irradiación mediante dispositivos de suspensión.
2. Las fuentes radiactivas se encuentran en una piscina de almacenamiento cuyo acceso se da a través de un laberinto hecho de concreto baritado especialmente diseñado para que los operadores no sean expuestos a la radiación más allá de los niveles permitidos por la normativa nacional vigente, garantizando la seguridad del personal en todo momento durante la operación del irradiador industrial.
3. Los bastidores de irradiación albergan a las fuentes radiactivas (las cuales tienen forma de varillas). El accionamiento del sistema de izaje de la fuente permite que los bastidores suban y bajen, dando lugar a sus dos posiciones: a) posición de

irradiación y b) posición de blindaje. Este sistema de izaje se encuentra situado en un ambiente encima de la sala de irradiación.

a) Durante la “posición de irradiación” los bastidores se encuentran suspendidos permitiendo que la radiación gamma proveniente de las fuentes radiactivas interactúe con los productos que son suspendidos en contenedores de aluminio dentro del laberinto.

b) La “posición de blindaje” ocurre cuando los bastidores se encuentran dentro de la piscina de agua del irradiador industrial.

4. El agua de la piscina funciona como blindaje que atenúa la radiación gamma a niveles seguros para permitir las inspecciones en el laberinto y trabajos de mantenimiento dentro de la sala de irradiación.
5. El agua que es contenida dentro de la piscina recircula a través del sistema de tratamiento y enfriamiento de agua, donde las impurezas, temperatura y niveles de agua y radiación son monitoreados continuamente.
6. El sistema de izaje de las fuentes radioactivas funciona a través de un sistema neumático que garantiza la seguridad y permite que el bastidor del irradiador baje a la posición de blindaje en la piscina por gravedad en caso de emergencias como ser el corte de energía eléctrica.

Es importante mencionar que el CMI cuenta con un sistema de ventilación específico para la extracción de productos de radiólisis del aire en el irradiador industrial e irradiador autoblandado.

#### 3.4.4 Aplicaciones, beneficios y líneas de investigación

Las aplicaciones del Centro Multipropósito de Irradiación son diversas, según el sector del que se hable a continuación se detalla las diferentes aplicaciones con sus respectivos beneficios para distintos sectores:

Mayor información en el siguiente link:  
[https://www.cnea.gob.ar/portaleducativo/uploads/2020/03/irradiacion\\_de\\_Alimentos\\_SL.mp4](https://www.cnea.gob.ar/portaleducativo/uploads/2020/03/irradiacion_de_Alimentos_SL.mp4) [12].

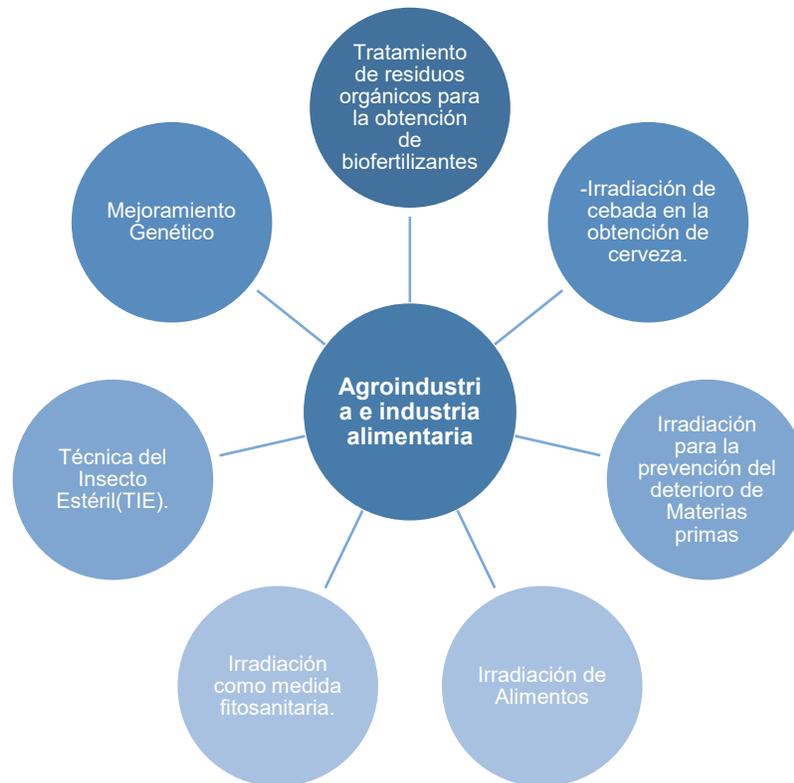


Figura 12 Aplicaciones del CMI en la agricultura e industria alimentaria Elaboración propia.

### Beneficios sector agroindustrial e industria alimentaria

- Eliminación de microorganismos alterantes, deterioro por plagas de insectos durante el almacenamiento, dando mayor valor agregado al producto prolongando su vida anaquel, reduciendo los desperdicios, sin elevar su temperatura como otros procesos físicos, y no deja ningún residuo químico.
- Prevención de Enfermedades Transmitidas por Alimentos (ETA's): Eliminando o minimizando los peligros biológicos en el alimento (parásitos causantes de enfermedades y microorganismos patógenos).
- Mayor garantía de inocuidad y menor incidencia de enfermedades transmitidas por los alimentos a la población.
- Mayor apertura de mercados internacionales para la exportación debido a que muchos clientes requieren de esta tecnología para asegurar la inocuidad del producto como, por ejemplo, los condimentos y especias en Europa.
- Evita la diseminación de plagas de Artrópodos perjudiciales y plagas cuarentenarias en productos Fruti-hortícolas para consumo interno.
- Reutilización de los residuos orgánicos con alto contenido de nutrientes para los

- cultivos eliminando cualquier microorganismo patógeno que pudiera estar presente.
- Control de las plagas que atacan a los cultivos de nuestro país, se puede realizar la reducción o la eliminación del insecto empleando la técnica del insecto estéril, según se determine lo ideal en cada caso particular por insecto, coadyuvando a una mayor producción agrícola.
  - Actualmente otros países logran producciones 4 veces mayores, usando la misma superficie de terreno (mayor rendimiento), por lo que la mejora genética de cultivos es una necesidad que busca resiliencia a factores adversos (sequía, falta de algunos nutrientes, salinidad, etc.) y manifestaciones fenotípicas deseables (tamaño, nutrientes, forma, color, etc.).

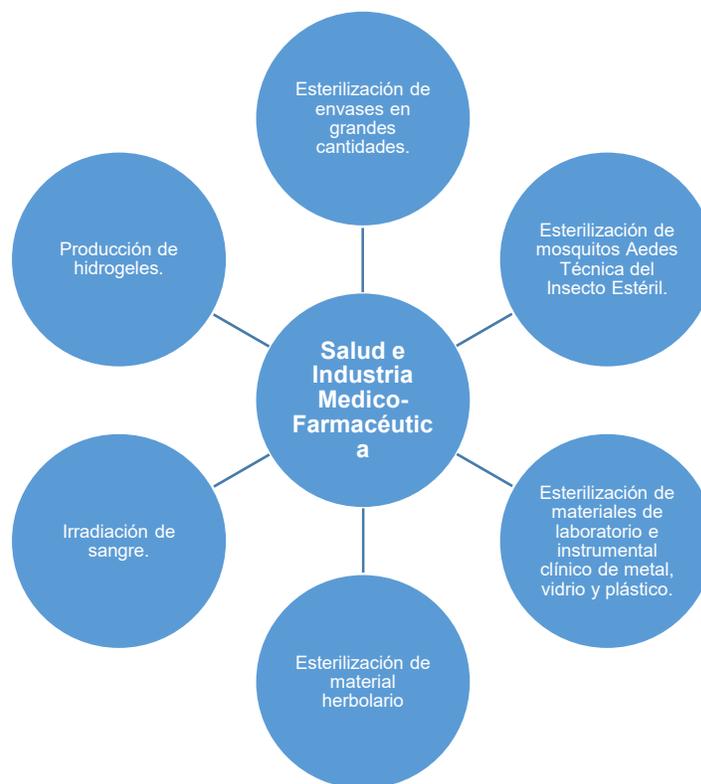


Figura 13 Aplicaciones del CMI en la salud e industria médico farmacéutica Elaboración propia.

### Beneficios sector salud e industria médico-farmacéutica

- Control del vector de enfermedades (mosquito Aedes aegypti): Dengue, Zika y Chikungunia en beneficio de la salud de la población.
- Permitirá a la industria médico-farmacéutica o a emprendimientos que deseen incursionar en la producción de materiales médico-quirúrgicos esterilizados, según normativa nacional e internacional a través de la radiación ionizante. Cabe

mencionar que actualmente este material es importado, por lo que la irradiación permitirá la reducción de costos a nivel país y aumentando el rédito a la industria boliviana. Se podrá irradiar: material médico desechable como gasas, jeringas, algodón, material de sutura, agujas de jeringas; catéteres, kits de infusión intravenosa y fluidos; indumentaria quirúrgica como batas, casquetes y botas; sábanas; injertos de tejidos; equipo hospitalario reutilizable, como bisturíes, tijeras y recipientes, y material farmacéutico.

- Desinfección o esterilización de envases para la producción de medicamentos naturales (infusiones, pomadas, ungüentos, cataplasma, etc.).
- La irradiación de componentes sanguíneos elimina la posibilidad de desarrollo de Enfermedad Injerto contra Huésped Asociada a Transfusión (EICH), la cual es mortal en el 95% de los casos, siendo el único método reconocido a nivel mundial para evitar el desarrollo de dicha enfermedad.
- Coadyuvará tanto a la esterilidad de los tejidos y órganos que se trasplantarán a pacientes como también en el proceso de almacenamiento que se realiza en los bancos de tejidos y órganos del país.

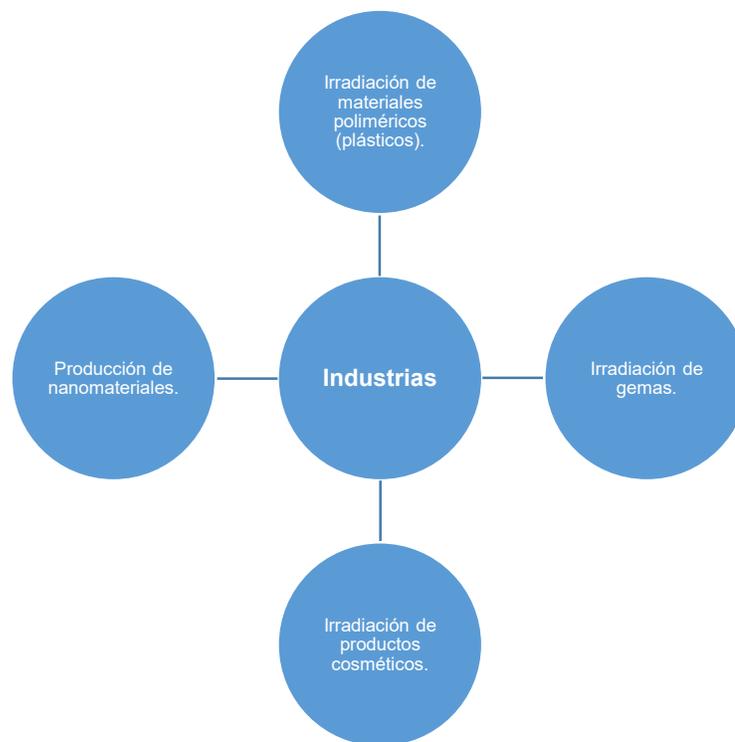
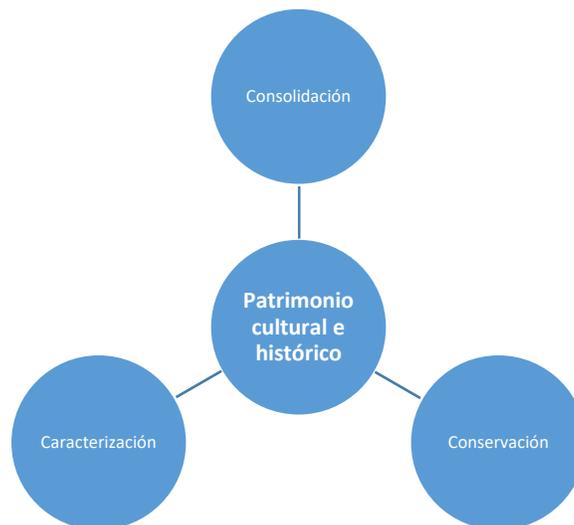


Figura 14 Aplicaciones del CMI en la industria Elaboración propia.

## Beneficios sector industria

- Mejoramiento de Materiales Poliméricos, modificando sus características físicas de resistencia a altas temperaturas y mecánica debido al entrecruzamiento tridimensional de las cadenas poliméricas. Esto da lugar a cables para autos, aviones e instalaciones industriales, pisos de plástico más resistentes, llantas de auto más resistentes, etc.
- La modificación de las estructuras de los plásticos, su aprovechamiento y reciclaje reduciendo sus residuos logrando una mejor disposición final y un menor impacto al medio ambiente.
- Avivamiento del color de piedras semipreciosas y preciosas.
- Descontaminación y/o esterilización de los productos, como ser: talcos, champús, lociones, cremas, geles, etc. y los instrumentos asociados como los aplicadores, esponjas, lápices, pinceles, cepillos, entre otros que se puedan producir en Bolivia.



*Figura 15 Aplicaciones del CMI en el patrimonio cultural e histórico Elaboración propia.*

## Beneficios sector patrimonio cultural

- Eliminación de microorganismos, hongos e insectos presentes en el material de valor cultural, para conservar éste, en combinación con las condiciones de almacenamiento postirradiación a fin de perpetuar el patrimonio cultural-histórico, tales como hojas, libros, pinturas, esculturas, tejidos, instrumentos, muebles, etc.

### 3.5 Complejo del Reactor Nuclear de Investigación (RNI)

#### 3.5.1 Generalidades

Los reactores nucleares son dispositivos donde se producen reacciones nucleares en cadena de forma controlada para diferentes usos. Dependiendo del tipo de reacción, estos pueden ser clasificados en reactores de fisión o de fusión. Actualmente, dada su madurez tecnológica, la amplia mayoría de los reactores nucleares en el mundo son reactores nucleares de fisión incluyendo todos los reactores comerciales que se usan para la generación de energía eléctrica. Aunque también existen varios reactores de fusión experimentales.

Los reactores nucleares de fisión a su vez se pueden clasificar de diferentes maneras dependiendo de: el uso, combustible nuclear, espectro de neutrones, refrigerante, circulación del refrigerante, moderador, entre otros (ver la Tabla 3).

*Tabla 3 Clasificación de los Reactores Nucleares de Fisión. Elaboración propia.*

Dependiendo del uso	Dependiendo del combustible
<b>Reactores de potencia / para la generación de energía eléctrica</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Reactor de agua presurizada</li> <li>- Reactor de agua a ebullición</li> <li>- Reactor de agua pesada presurizada</li> <li>- Reactor de agua moderado por grafito</li> <li>- Reactor refrigerado por gas</li> <li>- Reactor rápido reproductor</li> </ul>	Uranio natural Uranio enriquecido con Uranio-235 <ul style="list-style-type: none"> <li>- De bajo enriquecimiento (&lt;20%)</li> <li>- De alto enriquecimiento (&gt;20%)</li> </ul> Plutonio-239 Combustible nuclear de mezcla de óxidos MOX
<b>Reactores de propulsión</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Submarinos nucleares</li> <li>- Rompehielos nucleares</li> </ul>	
<b>Reactores de investigación</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo piscina</li> <li>- Tipo tanque</li> <li>- Tipo tanque-en-piscina</li> </ul>	
<b>Dependiendo del espectro<sup>8</sup> de neutrones</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Reactores de espectro de neutrones térmicos</li> <li>- Reactores de espectro de neutrones rápidos</li> </ul>	<b>Dependiendo de la circulación del refrigerante</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Refrigerado por convección natural</li> <li>- Refrigerado por circulación forzada</li> </ul>
<b>Dependiendo del refrigerante</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Refrigerado por Agua</li> <li>- Refrigerado por gas               <ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub></li> <li>- He</li> </ul> </li> <li>- Refrigerado por metal líquido</li> </ul>	<b>Dependiendo del moderador</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Moderado por agua pesada</li> <li>- Moderado por agua ligera</li> <li>- Moderado por grafito</li> <li>- Moderado por berilio</li> </ul>

<sup>8</sup> El espectro de neutrones, representa la distribución de energías de los neutrones en un medio.

En Bolivia, la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) está gestionando la construcción de un Reactor de Nuclear Investigación tipo piscina, con combustible nuclear de bajo enriquecimiento, de espectro de neutrones térmicos, refrigerado por agua ligera por convección natural, y moderado por agua ligera.

### 3.5.2 Objetivos del reactor nuclear de investigación

Tiene como objetivo principal aportar a diferentes áreas de desarrollo social y económico del país mediante la investigación científica, producción de radioisótopos, análisis por activación neutrónica y formación de recursos humanos en territorio nacional. La investigación y cada uno de estos servicios tienen un impacto en diversas áreas tales como salud, industria, gestión de recursos naturales, educación, minería, medio ambiente, entre otros.

Los principales objetivos del Reactor Nuclear de Investigación serán:

- a) Formación y capacitación de recursos humanos en el área de la ciencia y tecnología nuclear.
- b) Prestación de Servicios analíticos de química y física mediante el análisis por activación neutrónica (AAN) a empresas productivas tanto estatales como privadas; sector minero y geológico, agricultura e industria e institutos nacionales de servicio del sector salud y medio ambiente.
- c) Producción de radioisótopos para su aplicación como radiotrazadores en el sector minero, ambiental, agrícola, industrial, salud y otros.
- d) Contribuir al desarrollo de la investigación básica y aplicada, a la innovación y transferencia de nuevas tecnologías a través de la investigación en proyectos conjuntos con Instituciones nacionales y extranjeras.
- e) Sensibilizar y concientizar sobre el uso pacífico de la energía nuclear, mostrando sus usos, ventajas y beneficios de esta tecnología.
- f) Contribuir a la cultura de la seguridad nuclear en el Estado Plurinacional de Bolivia mediante el cumplimiento de tratados y convenios internacionales relacionados con la no proliferación de armas nucleares y salvaguardas nucleares.

### 3.5.3 Reactor Nuclear de Investigación (RNI)

Un Reactor Nuclear de Investigación (RNI) es un dispositivo con componentes altamente tecnológicos que permite controlar una reacción nuclear de fisión en cadena para así poder extraer neutrones provenientes del núcleo del reactor con diversos fines. Los Reactores de

Investigación son más sencillos en su diseño que los reactores de potencia, en la Tabla 4 se puede ver las diferencias en las características principales entre un reactor de investigación y uno de potencia.

El término general “Reactor de Investigación” cubre un rango amplio de reactores que no están destinados a la producción de energía eléctrica, desde conjuntos subcríticos, conjuntos críticos a reactores de investigación con cierta potencia térmica. La definición más utilizada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) se basa en el uso potencial del reactor:

*“Por ‘reactor de investigación’ se entiende un reactor nuclear empleado principalmente para la generación y utilización de flujos neutrónicos y radiaciones ionizantes con fines de investigación y de otro tipo” [13]*

Tabla 4 Comparación entre un reactor de potencia y uno de investigación [13]

Reactor de Investigación	Reactor de Potencia
Temperaturas de operación bajas	Temperaturas de operación altas 300 – 600 C°
Potencias desde los 0 MW hasta 10 MW	Potencias mayores a 100MW hasta 3000MW
No está destinado a la producción de electricidad	Produce electricidad
Se usa para entrenamiento y capacitación	No se usa para entrenamiento ni capacitación
Diseños menos complejos	Diseños complejos
Típicamente usan Uranio-235 enriquecido hasta un máximo de 20%	Típicamente usan Uranio-235 enriquecido en un rango de 3-5%
Usan menos combustible nuclear	Usan más combustible nuclear

#### 3.5.4 Funcionamiento de un Reactor Nuclear de Investigación

Como cualquier reactor nuclear de fisión, un RNI aprovecha de la fisión nuclear en cadena controlada para su funcionamiento. El proceso de fisión es inducido por los neutrones, y su probabilidad incrementa cuando éstos son térmicos, es decir, de baja energía cinética. Cuando la fisión ocurre, el núcleo de un átomo se divide en productos de fisión liberando en el proceso energía y de 2 a 3 neutrones rápidos - de alta energía cinética.

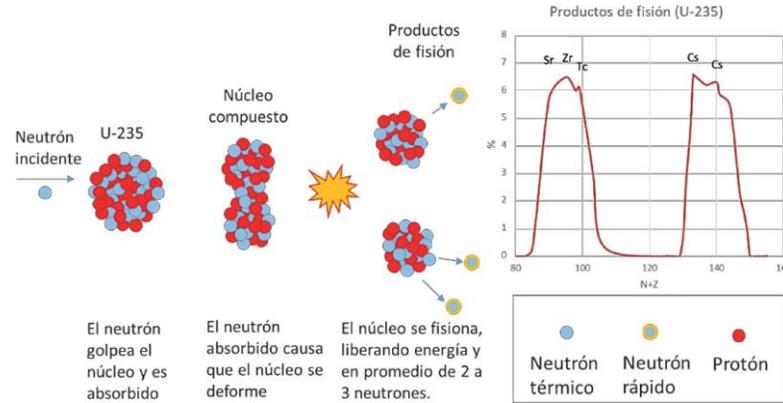


Figura 16 Fisión nuclear de un átomo de Uranio-235 y distribución de productos de fisión. Elaboración propia.

Dado que los neutrones rápidos de alta energía cinética provenientes de la fisión no presentan una gran probabilidad de causar eventos de fisión, éstos se ralentizan convirtiéndose en neutrones térmicos mediante colisiones con un “moderador” para incrementar su probabilidad de ocasionar una subsecuente reacción de fisión. En muchos reactores nucleares, el material moderador es el agua.

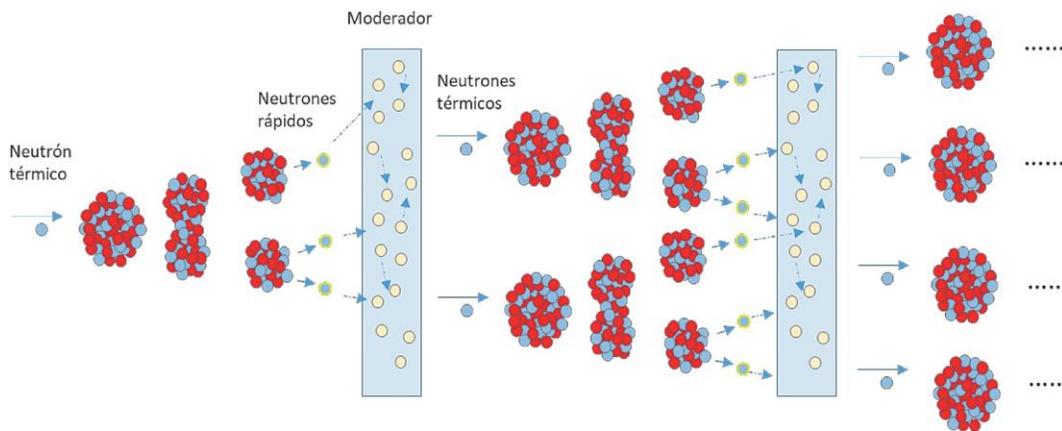


Figura 17 Reacción en cadena en un reactor nuclear. Elaboración Propia

Si consideramos el caso anterior, con un neutrón térmico podemos producir de 2 a 3 neutrones rápidos. Éstos al ser ralentizados<sup>9</sup> ocasionan subsecuentes eventos de fisión y de esa forma continuar sucesivamente. La producción de neutrones y la reacción en cadena crecen exponencialmente con cada generación. Para controlar la reacción en cadena, debemos controlar la población de neutrones en nuestro reactor. Para

<sup>9</sup> En física nuclear se utiliza el termino ralentizar neutrones, al proceso de reducir la energía de un neutrón del rango de energía rápida al térmico.

controlar la cantidad de neutrones en el reactor, se cuenta con barras de control (figura 17). Estas barras están hechas de un material capaz de absorber enormemente los neutrones térmicos responsables de los eventos de fisión.

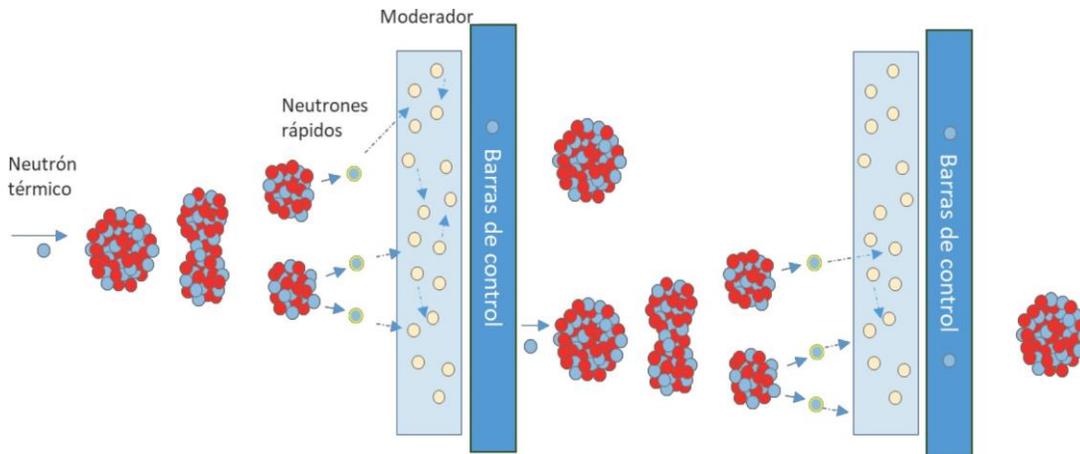


Figura 18 Control de la reacción en cadena en un reactor nuclear. Elaboración propia.

A diferencia de los reactores de potencia de las plantas nucleares, que se centran en la energía liberada en forma de calor, los reactores de investigación centran su funcionamiento en los neutrones liberados por la fisión. Por este motivo, los RNI no buscan altas temperaturas, sino un balanceado flujo de neutrones en rangos de energía útiles para inducir reacciones nucleares para diversas aplicaciones<sup>10</sup>.

### 3.5.5 Componentes de un Reactor Nuclear de Investigación tipo piscina

Dependiendo del tipo de reactor, los RNI requieren de diferentes componentes tecnológicos para su correcto funcionamiento.

Uno de los tipos de RNI más utilizados en el mundo, incluyendo el reactor a ser implementado en el CIDTN de El Alto, son los Reactores de Investigación tipo piscina. Típicamente, los RNI tipo piscina presentan los siguientes componentes mostrados en la figura 19:

**Barras de control** – Están hechas de un material altamente absorbente de neutrones; por ejemplo, carburo de boro, aleaciones de plata o cadmio. Las barras de control son de la misma longitud que las barras de combustible dentro del núcleo del reactor y se encuentran alojadas en canales verticales que permiten su inserción en el núcleo del reactor para así

<sup>10</sup> Las aplicaciones de los Reactores de Investigación se describen en subtítulo 3.5.3 del presente tema.

controlar la población de neutrones. La población de neutrones en un reactor nuclear disminuye con la inserción de las barras de control e incrementa con la extracción de las mismas, controlando así los eventos de fisión dentro del núcleo. Por lo tanto, las barras de control constituyen un sistema que permite iniciar o detener los eventos de fisiones en un reactor nuclear. (Figuras 18 y 19)

**Blindaje.**– Es un material que se ubica o establece entre una fuente de radiación ionizante y un punto determinado. Este material debe ser capaz de atenuar o frenar la radiación con el fin de proteger y resguardar a las personas que trabajan en la instalación nuclear. Los materiales más empleados son el plomo, hormigón y agua ligera. En el caso de un RNI tipo piscina, el agua de la piscina conjuntamente con la estructura de concreto conforman el blindaje. (Figura 19)

**Canales Experimentales Horizontales.**– Están diseñados para extraer haces de neutrones provenientes del núcleo. Estos canales experimentales se utilizan en conjunto con diversos dispositivos experimentales, donde se aprovecha de las reacciones nucleares que pueden ocasionar los neutrones provenientes del núcleo del reactor. (Figura 19)

**Canales Experimentales Verticales.**– Están diseñados para transportar muestras al interior del reactor e irradiarlas con los neutrones que se encuentran en el núcleo del reactor. (Figura 19)

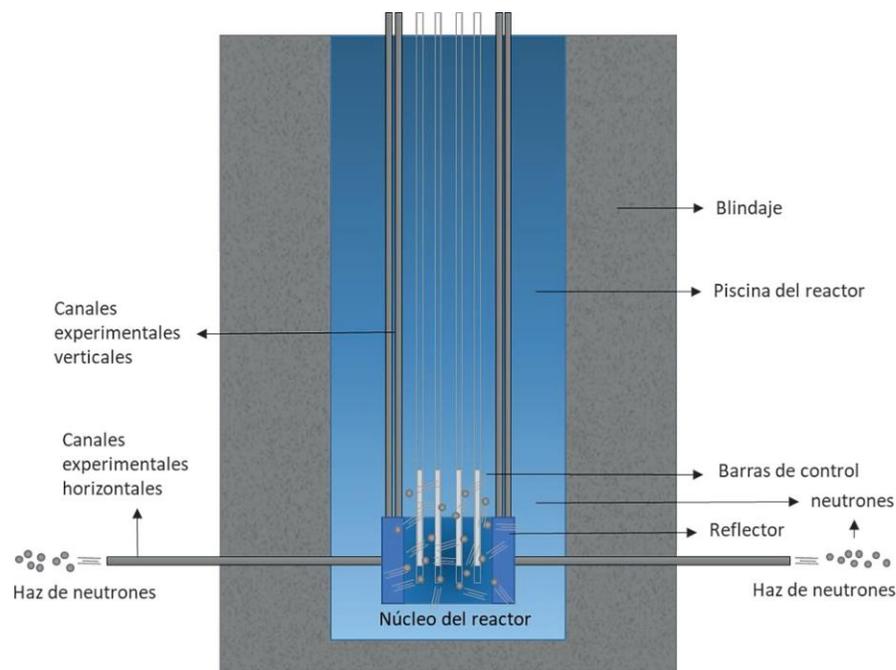


Figura 19 Diagrama esquemático de un Reactor de Investigación tipo piscina. Elaboración propia.

**Combustible nuclear.**– Comúnmente viene en forma de barras de combustible y el conjunto de estos conforman el núcleo del reactor. Es el material que da lugar a la fisión nuclear que alimenta al reactor. Usualmente se trata de un material capaz de producir una reacción nuclear de fisión de manera sostenida. El combustible nuclear más utilizado es el isótopo  $^{235}\text{U}$  (Uranio-235).

**Piscina del reactor.** – Es los RNI tipo piscina, se trata del cuerpo del reactor. Aloja al núcleo del reactor y se encuentra llena de agua ligera ( $\text{H}_2\text{O}$ ). El agua sirve como refrigerante, moderador de neutrones y blindaje de la radiación.

**Moderador.**– Es un material capaz de disminuir la energía cinética (velocidad) de los neutrones producidos en la fisión nuclear y así aumentar la probabilidad de que éstos interactúen con otro núcleo fisionable por lo que no se rompe la reacción nuclear en cadena (Figuras 17 y 18). En los RNI tipo piscina, el moderador es comúnmente el agua ligera ( $\text{H}_2\text{O}$ ) de la piscina misma.

**Núcleo del reactor.**– Este se encuentra sumergido en el fondo de la piscina del RNI. El núcleo del reactor es la parte fundamental del mismo. Es donde se encuentra el combustible nuclear y donde ocurre la fisión nuclear en cadena. (Figura 18)

**Refrigerante.**– Es un fluido con una gran capacidad para la transferencia de calor. Su función es retirar y transferir el calor generado en el núcleo del reactor hacia un sistema de intercambiador de calor donde el fluido es enfriado y luego retorna al reactor. El refrigerante más usual en RNI tipo piscina es el agua ligera y dependiendo de la potencia del reactor, el mecanismo de refrigeración puede ser por convección natural o circulación forzada.

**Reflector.**– Parte del reactor en forma de capa alrededor del núcleo tiene por finalidad reflejar los neutrones que tienden a escapar del núcleo del reactor, aumentando la eficiencia del mismo. Diferentes materiales son utilizados como reflector, tales como el grafito o el berilio. Tras las interacciones entre los componentes del reflector, los neutrones tienden a dispersarse rápidamente, produciendo regiones locales con poblaciones relativamente grandes de neutrones térmicos. Estas regiones a menudo se explotan para uso experimental al transportar los neutrones por los puertos del haz según sea necesario.

Mayor información en el siguiente link:

<https://3d.energyencyclopedia.com/npp-pwr/?scene=reactor-core> [14].

### 3.5.6 Instalaciones y aplicaciones

Las instalaciones del RNI en Bolivia incluirán los siguientes laboratorios:

- Laboratorio de Radioisótopos (LRI).
- Laboratorio de Análisis de Activación de Neutrones (LAAN).
- Laboratorio Químico (LQ).

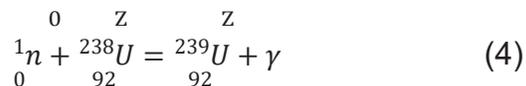
Y las aplicaciones que ofrecerá el Reactor de Investigación a través de las instalaciones mencionadas serán:

- Producción de radioisótopos.
- Análisis por Activación neutrónica.
- Capacitación y Entrenamiento.

Las instalaciones y aplicaciones del RNI se detallan a continuación.

#### 3.5.6.1 Laboratorio de producción de radioisótopos

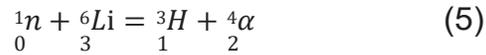
El principio de la producción de radioisótopos en reactores de investigación es la absorción de los neutrones provenientes del RNI por un blanco determinado. Existen diferentes resultados de reacción a partir de la absorción de un neutrón en el núcleo de un átomo. La reacción más común es la  $(n, \gamma)$ , donde “n” representa al neutrón incidente y “ $\gamma$ ” la radiación gamma que se libera. En esta reacción, el blanco absorbe un neutrón produciendo elementos con distinta masa atómica “A” pero con el mismo número atómico “Z”, en un estado excitado, el cual emite radiación gama para llegar a un estado de menor energía, como se describe en el siguiente esquema.



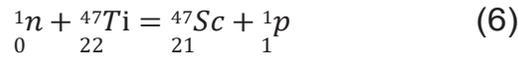
(a) Esquema de la reacción de captura neutrónica, (b) Para el elemento Uranio-238

Sin embargo, este tipo de reacción  $(n, \gamma)$  no es la única reacción nuclear que permite la producción de radioisótopos en un reactor de nuclear de investigación. A continuación, se muestran otras reacciones posibles que se dan a lugar debido a la absorción del neutrón en el blanco:

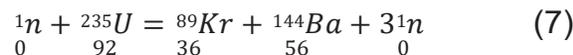
- $(n, \alpha)$ : consiste en reacciones en donde el blanco absorbe un neutrón y el nuevo estado al que llega decae muy rápido emitiendo una partícula alfa ( ${}^4_2He$ )



- (n, p): consiste en reacciones en donde el blanco absorbe un neutrón y el nuevo estado al que llega emite un protón



- (n, f): Consiste en la colisión de un neutrón con un material fisible, el cual se divide en dos nuevos elementos llamados productos de fisión, emitiendo de 2 a 3 neutrones



La probabilidad de ocurrencia (sección eficaz) de estas reacciones depende del material a irradiar y de la energía del neutrón incidente [15].

En el laboratorio de producción de radioisótopos se llevarán a cabo tareas desde el acondicionamiento y preparación del blanco para su irradiación hasta el procesamiento radio químico del producto y su preparación para su entrega, como se muestra en el siguiente Diagrama 1.

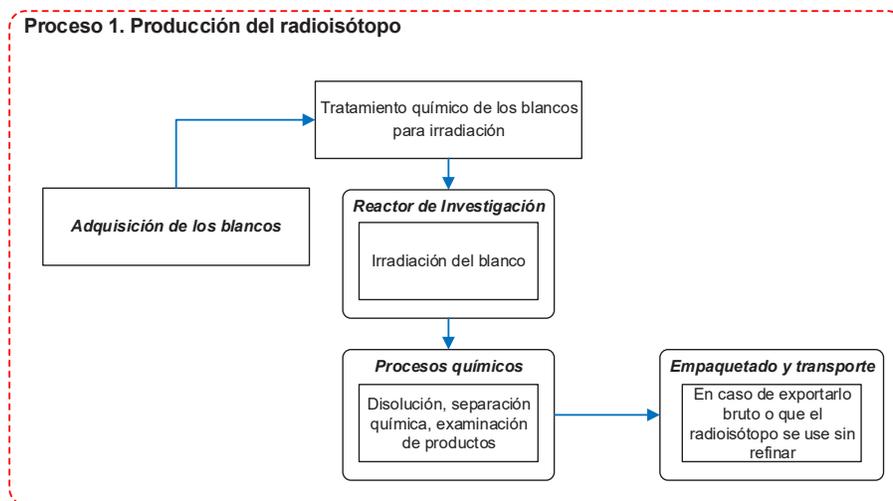


Diagrama 1 Producción de radioisótopos en el laboratorio. Elaboración propia

Los radioisótopos son empleados en distintas áreas como:

- Medicina nuclear. Son empleados para diagnóstico y tratamiento de enfermedades.
- La industria. Permiten controlar y regular procesos mejorando la calidad de los productos y brindando un mejor aprovechamiento de las materias primas.

- c) La agricultura. Permiten realizar el seguimiento de producción de productos agrícolas.
- d) Hidrología. Se emplean para la localización y datación de fuentes de agua, además de la determinación de contaminantes presentes en el agua.

Mayor información en el siguiente link:  
[https://phet.colorado.edu/sims/html/isotopes-and-atomic-mass/latest/isotopes-and-atomic-mass\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/isotopes-and-atomic-mass/latest/isotopes-and-atomic-mass_en.html) [16]

### 3.5.6.2 Laboratorio de análisis por activación neutrónica (LAAN)

El laboratorio de análisis por activación neutrónica consta de las siguientes secciones independientes:

- 1) Análisis por activación neutrónica instrumental;
- 2) Análisis de rayos gamma instantáneos (Emisión pronta)

El principio del análisis por activación neutrónica consiste en la irradiación de una muestra desconocida mediante un haz de neutrones producidos por una fuente (Reactor de investigación), la absorción de los neutrones por los elementos de la muestra produce reacciones nucleares que forman isótopos radiactivos. Las emisiones radiactivas y las rutas de desintegración radiactiva de cada elemento son bien conocidas. Utilizando esta información es posible estudiar los espectros de las emisiones de la muestra radioactiva y determinar las concentraciones de los elementos dentro de la muestra. (Figura 20)

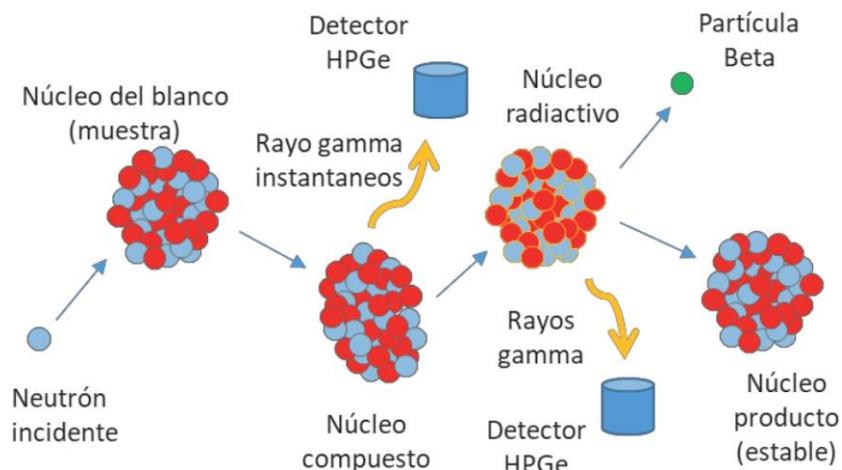


Figura 20 Principio de funcionamiento del AAN. Elaboración propia.

Cuando las mediciones de las emisiones radiactivas de la muestra se hacen al momento de la irradiación, el análisis se denomina **Análisis de Activación Neutrónica por Emisión Gatán** (Prompt Gamma Analysis, **PGA**), y estas se realizan después de la irradiación se denomina **Análisis de Activación Neutrónica Instrumental** (Neutron Activation Analysis, **INAA**).

En el siguiente Diagrama 2 se muestra el proceso para el análisis de activación neutrónica en forma general.

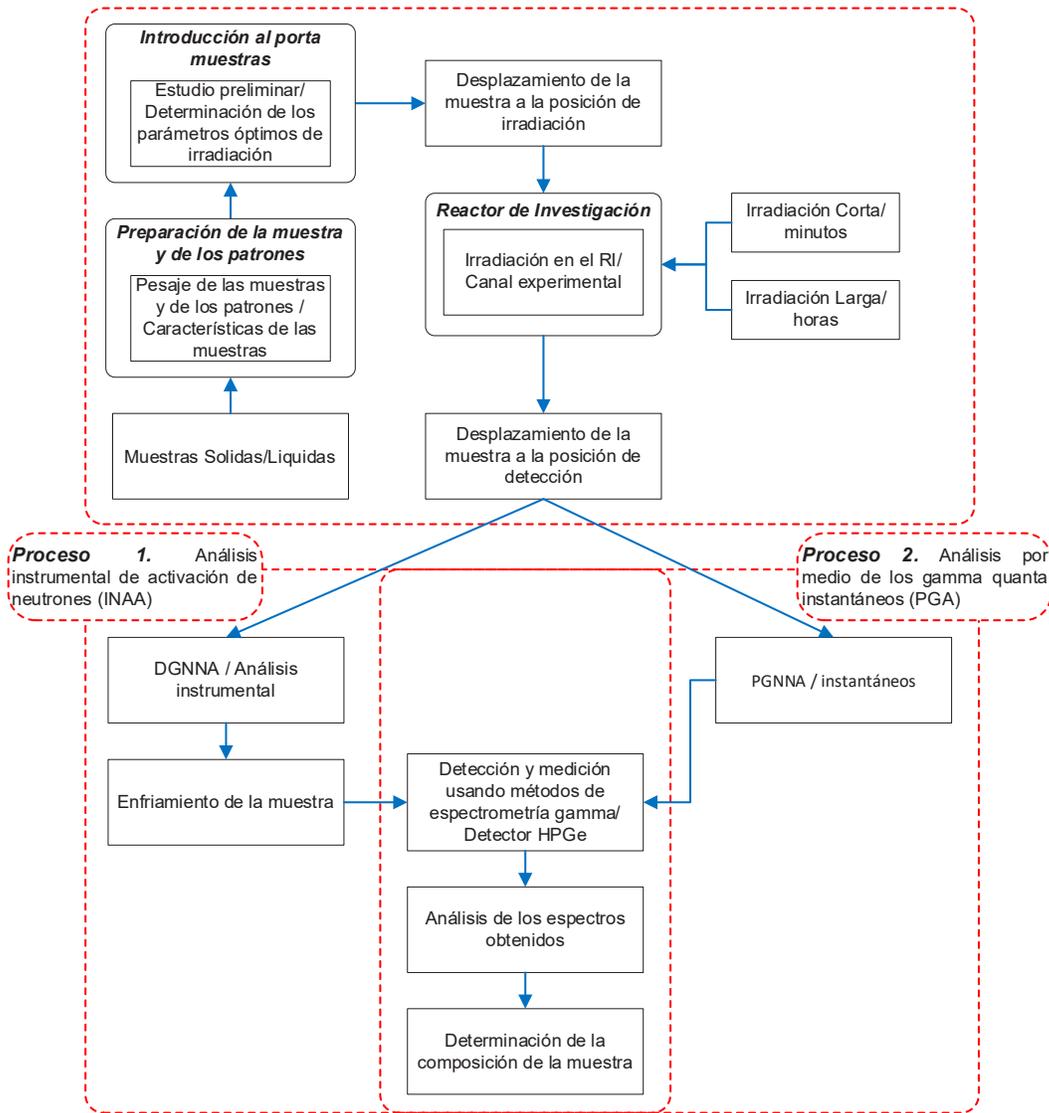


Diagrama 2 Funcionamiento del laboratorio de activación neutrónica. Elaboración Propia

El método de AAN tiene aplicaciones en diferentes campos como: Arqueología, Minería, Medicina, Ciencias geológicas, Agricultura y Ciencia Forense.

La técnica de AAN en: Arqueología, se emplea para la caracterización y de especies (cerámica, obsidianas, caliza y basalto); Minería, para la determinación de elementos químicos en muestras de minerales; Medicina, para la verificación del uso de radioindicadores in-situ de medicinas y dosificación para distribución comercial; Ciencias geológicas, para la investigación y caracterización de minerales como tierras raras y otros elementos traza; Agricultura, para la cuantificación de elementos químicos agrícolas presentes en el suelo y en medio ambiente, y en Ciencia Forense, para el análisis y comparación de muestras prueba.

En comparación con la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX<sup>11</sup>) que también es una técnica para determinación de elementos químicos, la técnica AAN demuestra una mayor sensibilidad pudiendo detectar hasta picogramos por cada kilogramo de algunos elementos, en cambio la FRX solo detecta un rango de miligramos por cada kilogramo.

#### 3.5.6.3 Laboratorio Químico

Un laboratorio químico en un RNI está diseñado para controlar la calidad del agua de alimentación (sistema de agua de reposición de la piscina del reactor) y del agua del reactor (agua de refrigeración del reactor), así como para controlar la calidad de los filtros absorbentes del tratamiento químico del agua. Las operaciones del laboratorio químico se detallan a continuación:

- Preparación de las muestras de agua del reactor.
- Análisis de las muestras de agua de reposición del reactor:
  - Por indicador de pH y conductividad eléctrica específica.
  - Por impurezas de cationes no activos, catiónicas y aniónicos.
  - Para medición del contenido de impurezas de radionúclidos, incluidos los productos de fisión.

#### 3.5.6.4 Capacitación y entrenamiento

El objetivo es desarrollar actividades formativas a través de capacitación y entrenamiento por medio de visitas guiadas en el Complejo del Reactor a civiles, estudiantes de colegio,

---

<sup>11</sup> FRX consiste en la emisión de rayos X secundarios característicos de un material que ha sido excitado al ser bombardeado con rayos X de alta energía.

profesores, estudiantes universitarios. En general, las visitas guiadas están dirigidas al público que estén interesados en conocer las aplicaciones del reactor de investigación.

También se llevará a cabo la formación y capacitación de personal técnico, desarrollo de capacidades en investigación y la divulgación de prácticas usando tecnologías nucleares. La enseñanza y la formación en ciencias nucleares es de gran importancia para nuestro país, ya que nos encontramos en una etapa de ampliación de nuestras estructuras científicas y tecnológicas que impulsará los avances científicos y tecnológicos del país.

### 3.6 Laboratorios especializados

#### 3.6.1 Generalidades

Los laboratorios de Radiobiología y Radioecología (LRR) tienen como objetivo:

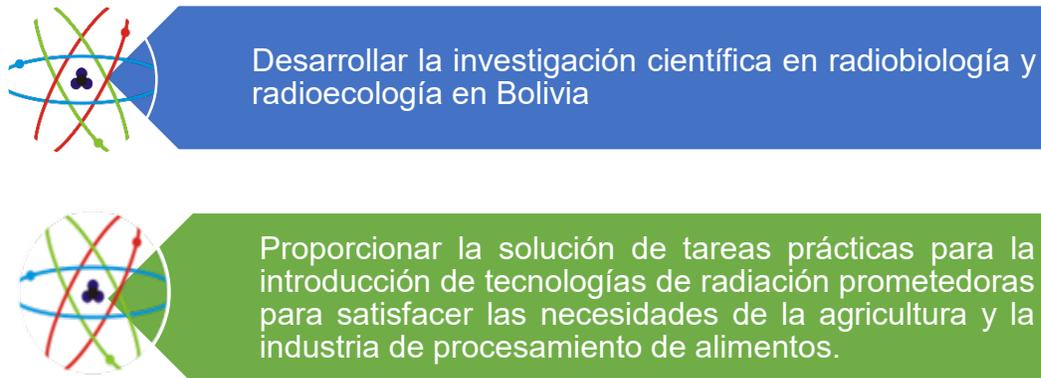


Figura 21 Objetivos del LRR. Elaboración propia.

La **investigación en radiobiología** es una rama de la ciencia que estudia los efectos de las radiaciones ionizantes sobre el tejido biológico y organismos vitales. Abarca fenómenos que se producen en los seres vivos luego de la absorción de dicha radiación y la respuesta del organismo como los mecanismos de reparación para compensar los efectos y posibles daños. [3]

La **investigación en radioecología** que abarca el estudio del comportamiento de los radionucleidos en el medio ambiente; aplicación de métodos de trazadores radiactivos para estudiar la asimilación de elementos de nutrición mineral en cultivos agrícolas y el mecanismo de migración de radionucleidos.

En los ambientes del LRR se cuenta con la sala de "**Invernadero**", que está destinada a realizar una amplia gama de investigaciones de la vegetación, en particular, el estudio del efecto de las radiaciones ionizantes en el crecimiento de cultivos agrícolas, la investigación en plantas, entre otras.

#### 3.6.2 Principios de la tecnología

Principalmente los laboratorios de Radiobiología y Radioecología están enfocados en estudiar los efectos de la radiación en alimentos, en especies vegetales, entre otros estudios, mediante la implementación de métodos de análisis para el cual el equipo de trabajo será capacitado y se podrán realizar estos análisis gracias al equipamiento con el que contarán los laboratorios.

### 3.6.3 Instalación

Los LRR tienen en su estructura siete grupos de investigación, cada grupo tiene tareas independientes, varios métodos de investigación, equipos especiales, requisitos especiales para el personal, etc.

#### 3.6.3.1 Laboratorios

##### 3.6.3.1.1 Grupo de Microbiología

Alcance	Objetivos
Realizar una investigación para estudiar el efecto de las radiaciones ionizantes en los microorganismos y evaluar la eficacia del procesamiento por radiación de las materias primas agrícolas y los productos alimenticios.	Estudio de los efectos de las radiaciones ionizantes sobre los microorganismos.
	Evaluación de la radiosensibilidad de microorganismos.
	Evaluación de la radiosensibilidad de microorganismos. Estudio de los cambios en la composición cuantitativa y cualitativa de varios grupos de microorganismos después de la irradiación.

##### 3.6.3.1.2 Grupo de Fitopatología y Entomología de las radiaciones

Alcance	Objetivos
Estudiar el efecto de las radiaciones ionizantes sobre las plagas de insectos para la desinsectación de cereales, productos de cereales y frutos secos, así como el efecto de las radiaciones ionizantes sobre patógenos de cultivos agrícolas.	Desarrollo y aplicación de tecnologías de radiación para la desinsectación de cereales, productos de cereales, frutos secos, etc.
	El uso de radiaciones ionizantes para combatir las enfermedades de las plantas.
	Estudios experimentales del uso de tecnologías de radiación para el control de plagas de insectos.

##### 3.6.3.1.3 Grupo de Radiobiología Vegetal

Alcance	Objetivos
Utilizar radiaciones ionizantes para aumentar el rendimiento de los cultivos y mejorar su calidad.	Análisis de los mecanismos de estimulación por radiación para aumentar el tamaño y la calidad de los cultivos agrícolas.
	Mutagénesis por radiación y selección de genotipos prometedores de cultivos agrícolas.

### 3.6.3.1.4 Grupo de Evaluación de la calidad de productos irradiados

Alcance	Objetivos
Estudio de la calidad de los productos agrícolas y alimentarios después de la irradiación.	Estudiar el efecto de la radiación en los indicadores de calidad del producto.
	Indicadores de calidad determinados en productos irradiados (cereales, hortalizas, frutas, etc.): Contenido de nitrógeno / proteínas; contenido de nitratos; contenido de fibra; contenido de caroteno (provitamina A); contenido de ácido ascórbico (vitamina C); contenido de glucosa; contenido de materia seca; almidón y contenido de cenizas.

### 3.6.3.1.5 Grupo de Investigación en Agroquímica

Alcance	Objetivos
Crear condiciones óptimas para la nutrición de las plantas, teniendo en cuenta las propiedades de los tipos y formas de fertilizantes, las peculiaridades de su interacción con el suelo para determinar las formas, métodos y métodos efectivos al momento del uso de fertilizantes.	Determinar los parámetros del ciclo de los nutrientes, teniendo en cuenta las condiciones agroclimáticas específicas y las características específicas de las plantas agrícolas.
	Estudiar el metabolismo en plantas.
	Determinar rápidamente el contenido de productos químicos en las plantas o el suelo, las propiedades del suelo, por ejemplo, la acidez y hacer ajustes rápidamente en la tasa de fertilización, análisis de laboratorio del suelo para determinar las tasas óptimas de aplicación del fertilizante principal y el posterior ajuste del tiempo de dosis, análisis de crecimiento después de analizar las plantas en el campo.

### 3.6.3.1.6 Grupo de Investigación en Radioecología

Alcance	Objetivos
Medir el contenido de radioisótopos y $^{15}\text{N}$ en muestras, utilizando el método de isótopos marcados.	Preparación de soluciones de trabajo de isótopos radiactivos $^{32}\text{P}$ , $^{35}\text{S}$ , $^{45}\text{Ca}$ , $^{14}\text{C}$ , $^{82}\text{Br}$ , $^{24}\text{Na}$ , $^{51}\text{Cr}$ , $^{46}\text{Sc}$ e isótopos no radiactivos $^{15}\text{N}$ .
	Marcar los isótopos radiactivos $^{32}\text{P}$ , $^{35}\text{S}$ , $^{45}\text{Ca}$ , $^{14}\text{C}$ , $^{82}\text{Br}$ , $^{24}\text{Na}$ , $^{51}\text{Cr}$ , $^{46}\text{Sc}$ y un isótopo estable $^{15}\text{N}$ e introducción de las soluciones de trabajo en muestras de suelo.
	Incubación de suelos con isótopos radiactivos introducidos $^{32}\text{P}$ , $^{35}\text{S}$ , $^{45}\text{Ca}$ , $^{14}\text{C}$ , $^{82}\text{Br}$ , $^{24}\text{Na}$ , $^{51}\text{Cr}$ , $^{46}\text{Sc}$ e isótopos no radiactivos $^{15}\text{N}$ (en colaboración con el Grupo de Investigación en Vegetación).
	Detección y determinación de los trazadores en el recuento de muestras de los suelos y plantas.

### 3.6.4 Aplicaciones

Se desarrollarán las siguientes aplicaciones:

- Investigación científica sobre el efecto de las radiaciones ionizantes en microorganismos.
- Realizar investigaciones científicas sobre el desarrollo y la implementación de tecnologías de irradiación para combatir las plagas de insectos.
- Desarrollo de modos tecnológicos de irradiación en una instalación gamma para varios tipos de productos agrícolas y alimenticios, implementación práctica de tecnologías de radiación para mejorar la seguridad microbiológica y fitosanitaria de los productos agrícolas y alimenticios (frutas, verduras, carne, pescado, etc.), aumentar el tiempo y reducir las pérdidas durante el transporte y almacenamiento; mantener y mejorar la calidad del producto.
- Estudio de la estimulación por radiación de semillas con el fin de lograr el mejoramiento de cultivos agrícolas para aumentar su rendimiento en las condiciones de Bolivia.
- Realizar investigaciones sobre radioecología mediante el estudio del comportamiento de los radionucleidos en el medio ambiente.
- Aplicación de isótopos marcados para estudiar la ingesta de elementos de nutrición mineral en cultivos agrícolas; la evaluación de la contaminación radiactiva de suelos, aguas y otros.

## 4 La Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia (CMNyR)

En la red de centros especializados, equipados con tecnología de punta, se realizan diagnósticos por imágenes de enfermedades oncológicas, cardíacas y neurológicas, así como su tratamiento y seguimiento. Uno de los centros está ubicado en la ciudad de El Alto, en la zona Parcopata del Distrito 8; el otro se encuentra en la ciudad de Santa Cruz, en la zona Pampa de la Isla. Y el último, próximo a inaugurarse, está en la zona de Achumani, de la ciudad de La Paz.



Figura 22. Centro de Medicina Nuclear y Radioterapia [17].

Cada uno de los CMNyR está compuesto por las siguientes áreas:

- Medicina nuclear
- Oncología clínica - quimioterapia
- Radioterapia

### 4.1 Objetivo de la Red de CMNyR

La Red de CMNyR tiene como objetivo principal luchar contra enfermedades que atacan a la población y que son difíciles de diagnosticar y tratar, como por ejemplo las enfermedades oncológicas, cardiovasculares y neurológicas.

Al poder realizar un diagnóstico temprano, será posible tratar estas enfermedades de manera efectiva. De igual manera se investigará y realizará estudios clínicos con los que se podrá evaluar la efectividad de diferentes radiofármacos empleados, cuyos resultados científicos podrían mejorar la calidad de vida de los pacientes.

A continuación, se brinda una breve información sobre las diferentes áreas con las que cuenta un CMNyR.

## 4.2 Las 3 principales áreas de un CMNyR

### a) Medicina nuclear<sup>12</sup>

Esta área permite diagnosticar y tratar el cáncer de manera anticipada y con un único estudio mediante el empleo de dos equipos de última tecnología: el Tomógrafo por emisión de positrones (PET/CT) y el Tomógrafo por emisión de fotón único (SPECT/CT). También se puede diagnosticar y tratar enfermedades cardíacas y neurológicas.

Los dos equipos más comunes son:

- SPECT/CT: Este equipo, viene de sus siglas en inglés de Tomografía Computarizada por Emisión de Fotones Únicos (SPECT) y Tomografía Computada (CT), brinda la posibilidad de adquirir las imágenes anatómicas CT y funcionales SPECT en un único estudio, además es capaz de aportar cada modalidad de imagen. Esta técnica híbrida ha mostrado que mejora la sensibilidad y la especificidad de los estudios, a la vez que acorta los tiempos de adquisición y brinda imágenes corregidas por atenuación que facilitan el mejor análisis de las mismas. Este tipo de estudio ha ido ganando cada vez más aplicaciones en el campo de la oncología, en las imágenes de enfermedades óseas malignas y benignas, en el estudio de los procesos infecciosos, en las imágenes de perfusión miocárdica y en el estudio de algunas enfermedades neurológicas.

La obtención de imágenes implica la rotación de una serie de detectores alrededor del paciente para recoger mediciones desde varios ángulos con el fin de determinar la distribución y la concentración del radioisótopo. Principalmente se usa el Tecnecio-99 metaestable, el cual tiene un tiempo de vida media de 6 horas aproximadamente. Esta técnica es muy usada para estudiar el cerebro, corazón y estudio del cáncer, pues se obtiene una mejor imagen comparada a otros métodos de diagnóstico por imagen como la tomografía computarizada o rayos X.

---

<sup>12</sup> Para un mayor detalle de los que es la medicina nuclear, leer el capítulo 1 de Fundamentos de Ciencia y Tecnología Nuclear Tomo 2



*Figura 23 Tomógrafo SPECT/CT CMNyR El Alto.*

- PET/CT: Este equipo utiliza una técnica de imágenes combinadas que permite fusionar la Tomografía por Emisión de Positrones (PET) y la Tomografía Computada (CT) que son adquiridas secuencialmente, permitiendo obtener imágenes tomográficas anatómicas y funcionales de la distribución del radiofármaco dentro del organismo humano, que aportan información anatómica al estudio metabólico, disminuyendo a su vez los tiempos de adquisición. Al desintegrarse los radioisótopos emiten positrones que penetran el tejido hasta colisionar con un electrón. Entonces, éstos se aniquilan liberando energía en forma de dos fotones gamma que se disparan en direcciones contrarias para detectarlos se usan anillos detectores de 360 grados. Tiene una gran utilidad en el área oncológica, neurológica y cardíaca.

Las aplicaciones clínicas del Tomógrafo por Emisión de Positrones (PET) se basan en la evaluación de un fenómeno metabólico mediante la utilización de radiofármacos. El radiofármaco más utilizado es Fluordesoxiglucosa (FDG) marcada con F-18. Éste permite evaluar la tasa de consumo de glucosa celular y se utiliza sobre todo en estudios oncológicos para el diagnóstico, estadiaje y control del tratamiento.



Figura 24 Tomógrafo PET/CT CMNyR El Alto.

Para una explicación más detalladas de cómo funcionan los radiofármacos en la medicina nuclear se recomienda ver el siguiente link: <http://educa.minedu.gob.bo/concyt/pagina/12> [13]

La diferencia esencial entre ambas técnicas es el tipo de radioisótopo utilizado para la producción de radiofármacos, siendo los de SPECT/CT los más variados dado que esta técnica viene desarrollándose hace muchos años encontrándose formas comerciales de fácil empleo las cuales son marcadas con Tecnecio-99m obtenido de la elución de un generador; sin embargo, en la técnica PET/CT los radioisótopos son producidos esencialmente en ciclotrones, donde se debe contar con una infraestructura especial que cumpla con la regulación radiológica y sanitaria, como ser: celdas calientes, módulos de síntesis, laboratorios de control de calidad y otras.

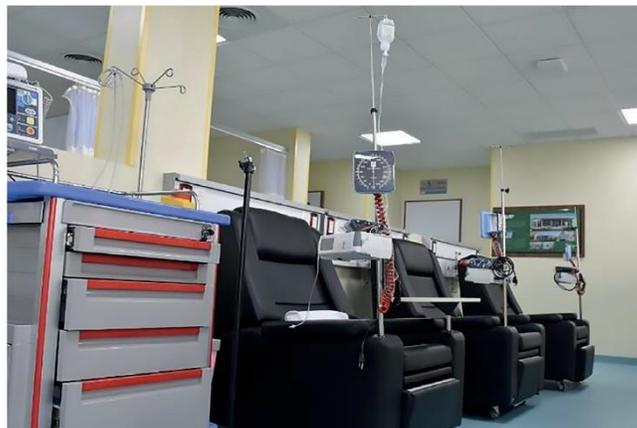
En cuanto a la calidad de imágenes, la técnica PET/CT entrega una imagen de mucha mayor resolución respecto al SPECT/CT, facilitando así el trabajo de los profesionales para la elaboración de los informes médico nucleares, ya que brinda mayor información para su interpretación. Sin embargo, para la técnica de SPECT/CT se tiene un mayor número de radiofármacos como opción a utilizar por lo que en esta se podría realizar un diagnóstico de la función fisiológica de todos los órganos y células del cuerpo humano, a diferencia del PET/CT donde el número de radiofármacos es más limitado.

Por lo que la elección de la técnica siempre debe estar justificada en función al beneficio del paciente y la patología a ser diagnosticada.

### **b) Área de Quimioterapia**

Esta área se encarga del tratamiento del cáncer con el empleo de fármacos quimioterapéuticos. Está compuesto por consultorios, laboratorios de fraccionamiento, enfermería y sala de inyectores.

La quimioterapia es el uso de fármacos que se emplean en el tratamiento del cáncer. La quimioterapia clásica se ha dirigido esencialmente a eliminar las células con alta tasa proliferativa mediante interferencias con procesos metabólicos que incluyen la síntesis de ADN, ARN y proteínas, de modo que su especificidad frente a las células neoplásicas es relativa, la quimioterapia se administra por la boca, en inyección, por infusión o sobre la piel, según el tipo de cáncer y el estadio en que este se encuentra.



*Figura 25 Áreas de quimioterapia del CMNyR El Alto.*

La quimioterapia se administra tanto sola como en combinación con otros tratamientos como cirugía, radioterapia o terapia biológica. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los fármacos utilizados en estos tratamientos son potentes y pueden afectar a las células sanas. Es precisamente este daño a las células sanas lo que provoca los efectos secundarios asociados con la quimioterapia.

### **c) Área de Radioterapia**

Esta área cuenta con la especialidad médica que aplica la radiación ionizante de manera localizada para evitar la multiplicación de las células tumorales, para lo cual se emplea dos métodos: radioterapia externa con el uso del acelerador lineal y radioterapia interna o

braquiterapia (para más información sobre estos métodos revisar el Tomo 1 de Fundamentos de Ciencia y Tecnología capítulo 1).



*Figura26 Acelerador lineal.*

Esta área está equipada con 2 aceleradores lineales, tomógrafo simulador y braquiterapia de alta tasa de dosis (HDR).



*Figura27 Braquiterapia de alta tasa de dosis.*

### 4.3 Tipos de investigación en un CMNyR

En función a la investigación y gracias a la capacidad técnica instalada en estos centros de alto nivel, se pretende la formación de profesionales en diversas especialidades y en función a los investigadores se podrá realizar los siguientes tipos de investigación clínica [18]:

- **Tratamiento:** La investigación de tratamiento (también llamada “ensayo clínico”) generalmente implica una intervención, tal como medicación, psicoterapia, nuevos dispositivos o nuevos enfoques quirúrgicos o radioterapéuticos.
- **Prevención:** La investigación preventiva busca mejores formas de prevenir la aparición o reincidencia de las enfermedades. Con diferentes tipos de investigación preventiva se pueden estudiar medicinas, vitaminas, vacunas, minerales o cambios de estilo de vida.
- **Diagnóstico:** Esto se refiere a la práctica de buscar mejores maneras de identificar un determinado trastorno o padecimiento.
- **Examen de detección:** La investigación de detección aspira a encontrar la mejor manera de detectar ciertos trastornos o padecimientos de salud, en especial mediante el uso de tecnología nuclear aplicada a la salud.
- **Calidad de vida:** También conocida como “cuidados paliativos”, este tipo de investigación explora las formas de hacer sentir más cómodas y mejorar la calidad de vida de las personas con enfermedades crónicas.
- **Estudios genéticos:** Los estudios genéticos aspiran a mejorar la predicción de trastornos al identificar y entender cómo los genes y las enfermedades pueden estar relacionados. La investigación en este campo puede explorar las maneras en que los genes de una persona la hacen más o menos propensa a manifestar un trastorno. Esto puede conducir al desarrollo de tratamientos a la medida, según la composición genética de un paciente.
- **Estudios epidemiológicos:** Los estudios epidemiológicos procuran identificar las pautas, causas y control de trastornos en grupos de personas.

Algunas investigaciones clínicas son “ambulatorias”, lo que significa que los participantes no pasan la noche en el hospital. Algunas implican “hospitalización”, lo que significa que los participantes deberán permanecer al menos por una noche en el hospital o centro de investigación.

Fases de los ensayos clínicos: cuando la investigación clínica se utiliza para evaluar medicamentos y dispositivos. Los ensayos clínicos son un tipo de investigación clínica diseñada para evaluar y probar nuevas intervenciones, tales como psicoterapias o medicamentos. Los ensayos clínicos con frecuencia se efectúan en cuatro fases [18]. Los ensayos de cada una de las fases tienen un propósito diferente y ayudan a los científicos a responder a preguntas diferentes.

- **Ensayos de Fase I:** Los investigadores prueban por primera vez un medicamento o tratamiento experimental en un grupo reducido de personas. Los investigadores evalúan la seguridad del tratamiento, determinan un intervalo de dosificación seguro e identifican los efectos secundarios.
- **Ensayos de Fase II:** El medicamento o tratamiento experimental se proporciona a un grupo de personas más amplio para valorar su eficacia y continuar evaluando su seguridad.
- **Ensayos de Fase III:** El medicamento o tratamiento del estudio experimental se proporciona a grandes grupos de personas. Los investigadores confirman su eficacia, vigilan sus efectos secundarios, lo comparan con tratamientos de uso común y recaban información que permitirá que el medicamento o tratamiento experimental se use de manera segura.
- **Ensayos de Fase IV:** Los estudios posteriores a la comercialización, los cuales se realizan después de que el uso de un tratamiento es aprobado por la FDA [18], aportan información adicional, incluyendo los riesgos, los beneficios y el uso recomendado del tratamiento o medicamento.

### Otros tipos de investigación clínica

Se cree que toda la investigación clínica consiste en poner a prueba nuevos medicamentos o dispositivos. Sin embargo, algunos estudios no incluyen pruebas de medicamentos y es posible que la persona no tenga que cambiar su medicación normal. De igual manera se necesitan voluntarios sanos para que los investigadores pueden comparar sus resultados con los de personas que padecen la enfermedad bajo estudio. Por ejemplo:

- Un estudio a largo plazo que consista en pruebas psicológicas o exploraciones del cerebro.
- Un estudio genético que involucre análisis de sangre, pero no cambios en la medicación.
- Un estudio de la historia familiar que consista en hablar con miembros de la familia para conocer el historial y las necesidades médicas de las personas.

Todas estas *investigaciones* coadyuvarán *al diagnóstico temprano y tratamiento de enfermedades con una mayor eficacia y precisión*, algunos de estos estudios se detallarán en la línea de investigación “salud humana y nutrición”.

## 5 Conclusiones

La introducción de la tecnología nuclear inicia en Bolivia desde el año 1960 con la incorporación como Estado Miembro ante el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), dando los primeros pasos en el ámbito nuclear. En la década de los 70 se inicia una planta piloto de producción de yellow cake; este proyecto termina pronto debido a falta de recursos financieros. En la década de los 90 se incorpora el uso de ciertos radioisótopos en la medicina nuclear, se puede observar que durante todo ese tiempo no se realizaron grandes avances en el desarrollo de la tecnología nuclear debido a una falta de inversión y políticas que apoyen este sector, hasta que finalmente en el año 2015 con una determinación alta y políticas claras se publica el Programa Nuclear Boliviano (PNB) enmarcado en la Agenda Patriótica 2025 del Gobierno nacional, y un año después se crea la Agencia Boliviana de Energía Nuclear, siendo la encargada de la implementación y operación de los centros nucleares como el Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Nuclear (CIDTN) y la Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia (CMNyR).

El CIDTN beneficiará a los sectores de salud, industria, ciencia y tecnología, aportará en la formación y capacitación de recursos humanos para la aplicación de la tecnología nuclear buscando dar solución a diferentes problemáticas del país a través de sus diferentes componentes y laboratorios especializados:

- a) **Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica:** Producirá radioisótopos y radiofármacos de distribución a nivel nacional, los cuales serán usados para el diagnóstico de enfermedades oncológicas, cardiológicas y neurológicas, de igual manera se combinará el conocimiento ancestral con técnicas modernas para la síntesis de nuevos radiofármacos.
- b) **Centro Multipropósito de Irradiación:** Este centro contará con dos principales componentes: el irradiador industrial e irradiador autoblandado, cuya principal diferencia es su capacidad de irradiación. Tendrá varias aplicaciones en diversas áreas como: la agroindustria e industria alimentaria, donde se dará un mayor tiempo de vida a los alimentos y desarrollando variantes con mejores características. En el campo de la salud esterilizando insumos médicos. En la industria, por ejemplo de los polímeros; se desarrollarán polímeros con mejores características físicas y químicas. En el sector histórico y patrimonio cultural, donde se eliminarán microorganismos y plagas, revirtiendo la mala condición presente y perpetuando el patrimonio cultural.

- c) **Complejo del Reactor Nuclear de Investigación:** Aportará a diferentes áreas de desarrollo social y económico del país mediante la investigación científica, producción de radioisótopos; estos radioisótopos se utilizarán en varias líneas de investigación como en la medicina, hidrología, agricultura, etc. El análisis por activación neutrónica, realizando análisis de alta precisión siendo capaz de detectar elementos que otros métodos no logran detectar. La formación de recursos humanos en territorio nacional, logrando desarrollar una comunidad científica en varios ámbitos de investigación nuclear.
- d) **Laboratorios especializados:** Estarán enfocados en estudiar los efectos de la radiación en alimentos, en especies vegetales, entre otros estudios, mediante la implementación de métodos de análisis para el cual el equipo de trabajo será capacitado, y se podrán realizar estos análisis gracias al equipamiento con el que contarán los laboratorios.

La Red de Centros de Medicina Nuclear y Radioterapia constará de 3 centros con las mismas capacidades que prestarán servicios en 3 ciudades: El Alto, Santa Cruz y La Paz. Cada uno de ellos contará con 3 principales áreas:

### 1) **Medicina nuclear**

Esta área permite diagnosticar y tratar el cáncer de manera anticipada y con un único estudio mediante el empleo de dos equipos de última tecnología: el Tomógrafo por emisión de positrones (PET/CT) y el Tomógrafo por emisión de fotón único (SPECT/CT). También se puede diagnosticar y tratar enfermedades cardíacas y neurológicas.

### 2) **Área de Quimioterapia**

Esta área se encarga del tratamiento del cáncer con el empleo de fármacos quimioterapéuticos. Está compuesto por consultorios, laboratorios de fraccionamiento, enfermería y sala de inyectores.

### 3) **Área de Radioterapia**

Esta área cuenta con la especialidad médica que aplica la radiación ionizante de manera localizada para evitar la multiplicación de las células tumorales, para lo cual, se emplea dos métodos: radioterapia externa con el uso del acelerador lineal y radioterapia interna o braquiterapia.

De igual manera que en el CIDTN, la Red de CMNyRs realizará diversas investigaciones siempre buscando mejorar el vivir bien de las y los bolivianos.

Fundamentos de Ciencia y Tecnología en su Tomo 3 tiene el propósito de brindar al lector un pequeño resumen sobre la tecnología nuclear en Bolivia desde los años 60 hasta la actualidad, explicando detalladamente los grandes beneficios que traerán los centros nucleares para la población boliviana de manera segura y cumpliendo con todos los estándares internacionales de seguridad.

## Bibliografía

- [1] Ministerio Hidrocarburos y Energía Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas, Programa Nuclear Boliviano, La Paz, 2015.
- [2] Rosatom, «Rosatom-Latinoamerica,» 27 10 2020. [En línea]. Available: <https://rosatom-latinamerica.com/press-centre/news/rosatom-y-aben-realizaron-un-webinar-conjunto-sobre-los-reactores-de-investigaci-n/>. [Último acceso: 07 06 2022].
- [3] Comisión Nacional de Energía Atómica, *Irradiación de alimentos*.
- [4] ibagroup, «IBA radiopharmaceutical production solutions,» [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=L1wvxYj0UGY>.
- [5] M. N. Chacon, «Seminario universidad Centro de Investigación en Ciencias Atómicas, Nucleares y Moleculares» 30 10 2018. [En línea]. Available: <https://semanariouniversidad.com/universitarias/diagnostico-de-cancer-sera-mas-eficaz-con-nuevo-ciclotron-de-ucr/>. [Último acceso: 07 06 2022].
- [6] N. S. C. ltd, «<http://www.nuclearsystem.com/>,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.nuclearsystem.com/tr-30-cyclotrons/>. [Último acceso: septiembre 2021].
- [7] Agencia de noticias de la República Islámica, «Agencia de noticias de la República Islámica,» 11 06 2021. [En línea]. Available: <https://es.irna.ir/news/84291180/Salehi-Ir%C3%A1n-es-uno-de-los-escasos-pa%C3%ADses-del-mundo-exportadores>. [Último acceso: 06 06 2022].
- [8] M. B.V., «<https://www.milabs.com/>,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.milabs.com/milabs-installs-first-fully-integrated-petspectoict-molecular-imaging-platform-erasmus-mc/>. [Último acceso: septiembre 2021].
- [9] L. Z. Sophie Lancelot, «Small-animal positron emission tomography as a tool for neuropharmacology,» *Trends in Pharmacological Sciences*, vol. 31, nº 9, pp. 411-417, 2010.
- [10] Freepng.es, «<https://www.freepng.es/>,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.freepng.es/hd-png/esquema-de-decaimiento.html>. [Último acceso: octubre 2021].
- [11] ROSATOM, State Atomic Energy corporation "ROSATOM", Joint Stock Company "State specialized Design institute", MAnnual de Operación LGU-12, 2019.
- [12] Comisión Nacional de Energía Atómica, *Irradiación de alimentos*.
- [13] Organismo Internacional de Energía Atómica, Seguridad de los reactores de investigación, Viena: Organismo Internacional de Energía Atómica, 2017.

- [14] 3d energyencyclopedia, «3d energyencyclopedia,» [En línea]. Available: <https://3d.energyencyclopedia.com/npp-pwr/?scene=reactor-core>. [Último acceso: 30 06 2022].
- [15] Ciemat, «Ciemat,» 2009. [En línea]. Available: [https://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros\\_md/133100241\\_2411200913036.pdf](https://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/133100241_2411200913036.pdf). [Último acceso: 08 06 2022].
- [16] University of Colorado , «PHET Interactive simulation,» [En línea]. Available: [https://phet.colorado.edu/sims/html/isotopes-and-atomic-mass/latest/isotopes-and-atomic-mass\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/isotopes-and-atomic-mass/latest/isotopes-and-atomic-mass_en.html). [Último acceso: 28 06 2022].
- [17] H. Yapu, «Radio Splendid,» 04 02 2021. [En línea]. Available: <https://www.radiosplendid.bo/2021/02/04/el-centro-de-medicina-nuclear-y-radioterapia-iniciara-operaciones-desde-marzo-en-el-alto/>. [Último acceso: 01 06 2021].





ESTADO PLURINACIONAL DE  
**BOLIVIA**

MINISTERIO DE  
HIDROCARBUROS Y ENERGÍAS

