



MINISTERIO DE EDUCACIÓN

3 Cuaderno de Formación Continua:

TECNOLOGÍA NUCLEAR EN BOLIVIA

Itinerarios Formativos para Maestras y Maestros







Ciclo: "La Tecnología Nuclear en Procesos Educativos"

Cuaderno: "Tecnología Nuclear en Bolivia"

Coordinación:

Dirección General de Formación de Maestros - DGFM Unidad Especializada de Formación Continua – UNEFCO Agencia Boliviana de Energía Nuclear - ABEN

Equipo de Redacción y Dirección:

Agencia Boliviana de Energía Nuclear – ABEN Batuani, R. A. Ortiz, D. Roman, R. Luque, J.C. Vásquez, E. Villalobos, X. Poma, I.

Apoyo Técnico y Revisión:

Zuleida Laime Mamani Directora de Planificación de la Investigación y Desarrollo Tecnológico – ABEN

Luis Fernando Cáceres Director de Aplicaciones de la Tecnología Nuclear – ABEN Pabon, V. W.

Pacheco, T. M.

Ilustración y Diagramación:

Agencia Boliviana de Energía Nuclear - ABEN

Cómo citar este documento:

Ministerio de Educación (2021). "La Tecnología Nuclear en Procesos Educativos" Cuaderno de Formación Continua. ABEN - UNEFCO.

La venta de este documento está prohibida. Denuncie al vendedor a la Dirección General de Formación de Maestros, Tel. 2442144 o a la Unidad Especializada de Formación Continua: unefco@unefco.edu.bo

www.minedu.gob.bo http://unefco.minedu.gob.bo/ https://unefco.edu.bo www.aben.gob.bo Cuaderno de Formación Continua:

TECNOLOGÍA NUCLEAR EN BOLIVIA

Índice

	ación	
Datos ge	nerales de la guía de estudio	V
Objetivo	Holístico del Ciclo	V
Objetivo	Holístico del Curso	V
	o 1: Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica (CCRP)	
	les de Inicio	
1.1.	Generalidades	
1.2.	Principio de la Tecnología	
1.3.	Instalaciones	
1.3.1.	Laboratorios	
1.3.2.	Equipamiento	6
1.3.2.1.	Ciclotrón	
	Radiofarmacia	
	Preclínica	
1.4.	Aplicaciones del CCRP	
Actividad	l Sugerida	12
Capítulo	2: Centro Multipropósito De Irradiación (CMI)	13
	les de Inicio	
2.1.	Generalidades	
2.2.	Principios de la Tecnología	
2.3.	Instalación	
2.3.1.	Irradiador Autoblindado	
2.3.2.	Irradiador Industrial	
2.4.	Aplicaciones, beneficios y líneas de investigación	
Actividad	l Sugerida	22
	3: Reactor Nuclear De Investigación (RNI)	
	les de Inicio	
3.1.	Generalidades	
3.2.	Reactor de Nuclear de Investigación (RNI)	
3.3.	Propósitos del reactor nuclear de investigación	
3.4.	Potencia del reactor nuclear de investigación	
3.5.	Reactores nucleares de investigación en América del Sur	
3.6.	Principio de funcionamiento de un RNI	
3.6.1.	Componentes de un reactor nuclear de investigación tipo piscina	
3.7.	Instalaciones	
3.7.1.	Laboratorio de producción de radioisótopos	
3.7.2.	Laboratorio de análisis por activación neutrónica (LAAN)	
3.7.3.	Laboratorio Químico	
3.8.	Aplicaciones	39

Producción de radioisótopos	39
· ·	
'	
d sugerida	
o 4: Laboratorios Especializados	43
•	
Generalidades	
Principios de la tecnología	45
Laboratorios	
Grupo de Microbiología	46
Grupo de Fitopatología y Entomología de las radiaciones	46
Grupo de Radiobiología Vegetal	47
Grupo de Evaluación de la calidad de productos irradiados	
Grupo de Investigación en Vegetación	47
Grupo de Investigación en Agroquímica	48
Equipamiento	
Aplicaciones	
afía	5/1
	o 4: Laboratorios Especializados des de Inicio Generalidades Principios de la tecnología Instalación Laboratorios Grupo de Microbiología Grupo de Fitopatología y Entomología de las radiaciones Grupo de Radiobiología Vegetal Grupo de Evaluación de la calidad de productos irradiados Grupo de Investigación en Vegetación Grupo de Investigación en Agroquímica Grupo de Investigación en Radioecología Equipamiento

Presentación

Con la Agenda Patriótica 2025 se llegará al Bicentenario del Estado Plurinacional de Bolivia con un país transformado y listo para avanzar en el siglo XXI como uno de los más grandes del continente. En ese sentido el Programa Nuclear Boliviano (PNB), llevado a cabo por la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) se hace presente en el proceso docente educativo de todo el país, sobre la base de un modelo profesional enseñanza - aprendizaje enfocado en la curricula educativa de los maestros y futuros maestros, quienes además tendran la tarea de transmitir los conocimientos adquiridos en el área nuclear a los estudiantes de todos los colegios de nuestro país; maestros capacitados con el empleo de cartillas impresas y digitales y recursos audiovisuales e informáticos modernos.

El PNB es el instrumento y mecanismo mediante el cual se desarrolla el cuarto pilar de la Agenda Patriótica del Bicentenario 2025 "Soberania científica y tecnológica con identidad propia".

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

Uno de los factores más importantes para la calidad educativa es el trabajo de las maestras y maestros, asumido con compromiso, profesionalidad y dedicación.

En el "2021 AÑO POR LA RECUPERACIÓN DEL DERECHO A LA EDUCACIÓN", el Ministerio de Educación de acuerdo a lo establecido en la Constitución Política del Estado (Arts. 78, I, II y III; 96, II) y en el marco del Sistema Plurinacional de Formación de Maestros (D.S. Nº 156/2009) viene implementando una estrategia sistemática y sostenible de Formación Continua para garantizar que maestras y maestros de todo el país tengan posibilidades de fortalecer sus cualidades, habilidades y actualizarse en forma permanente.

Los Itinerarios Formativos para Maestros son una modalidad formativa desarrollada por el Ministerio de Educación, a través de la UNEFCO enfocada en la práctica educativa, y la mejora de los procesos, con el objeto de fortalecer la implementación de la Ley de Educación N° 070/ "Avelino Siñani — Elizardo Pérez" y el Modelo Educativo, según los niveles, especialidades y pertinencia tanto cultural como lingüística.

Lic. Rosa Amanda Calisaya Flores
COORDINADORA NACIONAL UNEFCO

Los Cuadernos del Ciclo Formativo "La Tecnología Nuclear en Procesos Educativos", en el campo de las aplicaciones pacificas de la energía nuclear, constituyen importantes materiales de apoyo para los procesos formativos, que desarrollarán aspectos teórico-prácticos para una educación de calidad, a partir de los lineamientos establacidos por el actual Modelo Educativo.

Sobre la base de estos Documentos de Trabajo, facilitadoras, facilitadores y participantes en general, podrán adecuar contenidos, o estrategias formativas de acuerdo a la realidad de cada contexto.

Datos generales de la guía de estudio

CICLO	CURSO		
"La Tecnología	CURSO 1	Energía Nuclear y Universo	
Nuclear en Procesos	CURSO 2	Aplicaciones de la Tecnología Nuclear	
Educativos"	CURSO 3	Tecnología Nuclear en Bolivia	

Objetivo Holístico del Ciclo

Promovemos la valoración y concientización sobre nuevas tecnologías científicas, comprendiendo los alcances de las aplicaciones de la tecnología nuclear con fines pacíficos, mediante el análisis y desarrollo de prácticas educativas para fortalecer la seguridad y cultura nuclear, que aporte a la soberanía científica y tecnológica del Estado Plurinacional.

Objetivo Holístico del Curso

Desarrollamos una actitud responsable y consciente, conociendo las bases físicas y químicas de las ciencias nucleares y su presencia en el mundo que nos rodea, a través de leyes fundamentales, explicaciones comparativas y desarrollo de ejercicios, valorizando la importancia del conocimiento científico en el desarrollo de aplicaciones nucleares que contribuyen a la soberanía científica y tecnológica del país.



Capítulo 1:

Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica (CCRP)

Actividades de Inicio

PLANTEAMIENTO DE INTERROGANTES	RESPUESTAS
Defina el concepto de radiofármaco	
¿Qué aplicaciones tienen los radiofármacos?	
¿En Bolivia actualmente se producen radiofármacos?	

1.1 Generalidades

El Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica (CCRP) tiene el objetivo de producir radioisótopos y radiofármacos de distribución a nivel nacional, constituyéndose en el primer laboratorio industrial de radiofármacos de Bolivia que posibilita el acceso a estos insumos fundamentales en estudios de Medicina Nuclear.

Este complejo forma parte del Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Nuclear (CIDTN), implementado con la finalidad de:



Figura 1. Radiofármaco en su vial y blindaje.

- Producir radiofármacos utilizados en el diagnóstico de enfermedades oncológicas, cardiológicas y neurológicas a través de las técnicas de PET y SPECT implementadas en centros médicos que requieran de estos insumos;
- Realizar estudios preclínicos con nuevos radiofármacos, considerando la fusión entre el milenario conocimiento de la medicina tradicional con la novedosa ciencia y tecnología nuclear aplicada a salud para desarrollar estudios de diagnóstico y tratamiento.

1.2 Principio de la Tecnología

El ciclotrón implementado en el CIDTN, modelo TR-24, de la empresa canadiense ACSI, acelera iones hidruro (H-) y es capaz de operar con energías modulares entre 18 a 24 MeV y con corriente de hasta 300 µA. Cuando los iones hidruro pasan a través de láminas de carbono, pierden por el medio reductor sus electrones, generando un haz de protones (H+) que, al impactar con el material blanco, produce radioisótopos; el TR-24 posee seis líneas de irradiación, pudiendo operar simultáneamente con doble haz de extracción, irradiando dos blancos en estado sólido, líquido y/o gaseoso.

Los radioisótopos a ser producidos por el ciclotrón inicialmente son:

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

Radioisótopo	Reacción / estado del blanco	Capacidad de producción / Tiempo de irradiación (h)
18 F	¹⁸ O (p,n) ¹⁸ F / Líquido	9 Ci / 2 h (alta potencia) 6 Ci / 2 h (baja potencia)
¹¹ C	¹⁴ N (p,α) ¹¹ C / Gaseoso	3,5/1,2 Ci de CO ₂ /CH ₄ / 0,5 h
⁶⁴ Cu	⁶⁴ Ni (p,n) ⁶⁴ Cu / Sólido	250 mCi / 4 h
⁶⁸ Ga	⁶⁸ Zn(p,n) ⁶⁸ Ga / Sólido	200 mCi / 1 h
⁹⁹ mTc	¹⁰⁰ Mo (p,2n) ^{99m} Tc / Sólido	10 Ci / 6 h
123	¹²⁴ Xe (p,pn) ¹²³ Xe - ¹²³ I / Gaseoso	200 mCi / 4 h
124	¹²⁴ Te(p,n) ¹²⁴ I / Sólido	10 mCi / 4 h
⁸⁹ Zr	⁸⁹ Y (p,n) ⁸⁹ Zr / Sólido	65 mCi / 4 h

[Ci]= Unidad física de la radioactividad, Curie.

Una vez que se produce el radioisótopo, este es enviado a través de líneas de transferencia a las celdas que contienen los diferentes módulos de procesamiento y síntesis de radiofármaco, estos módulos vienen con los insumos necesarios para producir el radiofármaco sin la intervención directa del operador, protegiéndolo así de la radiación durante la etapa de producción.

Figura 2. Celda de síntesis blindada [64]

1.3 Instalaciones

1.3.1 Laboratorios

El Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica consta de las siguientes unidades operativas dentro de sus instalaciones:

- Área destinada al personal administrativo de las instalaciones.
- Área de producción de radioisótopos
- Área de producción y control de calidad de radiofármacos
- Área de investigación preclínica

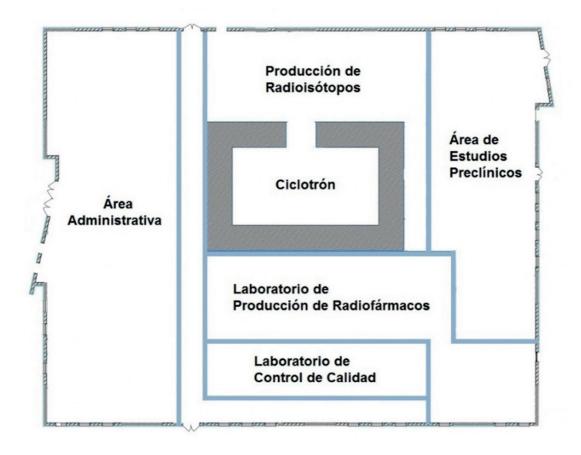


Figura 3. Esquema de Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclinica. Elaboración propia.

Las áreas más importantes del CCRP se encuentran en el área de producción de radioisótopos y el área de producción de radiofármacos.

Dentro del área de producción de radioisótopos se encuentra el bunker del ciclotrón, cuyos muros de concreto tienen un espesor de 2,5 m para atenuar las radiaciones que se generaran dentro de esta sala cuando el equipo está en plena operación.

La unidad de producción de radiofármacos (Radiofarmacia) está conformado por 4 laboratorios de producción descritos en la Tabla 2.

Tabla 2. Producción de radioisótopos y radiofármacos. Elaboración propia

Radioisótopo	Radiofármaco	Tipo Radiofármaco
	FDG	Rutinario
¹⁸ F	NaF	No rutinario
	PSMA	No rutinario
^{99m} Tc	99mTc (*)	Rutinario
	DOTA	No rutinario
68 ()	DOTATATE	No rutinario
⁶⁸ Ga	DOTATOC	No rutinario
	PSMA	No rutinario
11C	Colina	No rutinario
	Metionina	No rutinario
⁶⁴ Cu	ATSM	No rutinario
124	Nal	No rutinario
⁸⁹ Zr	Marcación de anticuerpos monoclonales	No rutinario
123	Nal, MIBG	No rutinario

^(*) En el caso del 99mTc, este radioisótopo es aplicado directamente en el paciente, por lo que se constituye también en el radiofármaco.

Cada laboratorio está destinado al procesamiento y síntesis de radiofármacos específicos para estos, siendo los principales laboratorios el de producción de ¹⁸F-FDG y el laboratorio de producción de ^{99m}Tc.

1.3.2 Equipamiento

1.3.2.1 Ciclotrón

Es el principal equipamiento del CCRP, con el cual se producirán los distintos Radioisótopos planificados en el complejo.

Entre los principales componentes en esta área tenemos:

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

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

Tabla 3. Reacciones de obtención de radioisótopos. Elaboración propia

Radioisótopo	Reacción Nuclear
¹⁸ F	¹⁸ ₈ O + ⁰ ₁ p → 189F + 10n
¹¹ C	$^{14}_{7}N + ^{1}_{1}p \rightarrow ^{11}_{6}C + ^{4}_{2}\alpha$
⁶⁴ Cu	$^{64}_{28}$ Ni + $^{1}_{1}$ p $\rightarrow ^{64}_{29}$ Cu + $^{1}_{0}$ n
⁶⁸ Ga	⁶⁸ ₃₀ Zn + ¹₁p → ⁶⁸ ₃₁Ga + ¹₀n
^{99m} Tc	$^{100}_{42}$ Mo + $^{1}_{1}$ p $\rightarrow ^{99}_{43}$ Tc + 2^{1}_{0} n
123	$^{124}_{54}$ Xe + $^{1}_{1}$ p $\rightarrow ^{123}_{54}$ Xe + $^{1}_{1}$ p + $^{1}_{0}$ n $\rightarrow ^{123}_{53}$ I
124	$^{124}_{52}$ Te+ $^{1}_{1}$ p $\rightarrow ^{124}_{53}$ I + $^{1}_{0}$ n
⁸⁹ Zr	$^{89}_{39}$ Y + $^{1}_{1}$ p $\rightarrow ^{89}_{40}$ Zr + $^{1}_{0}$ n

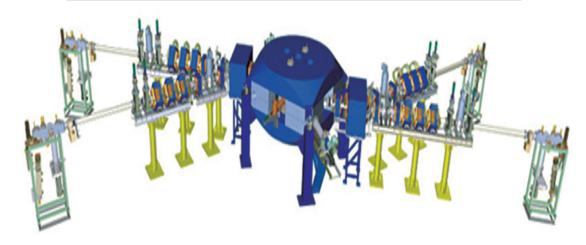


Figura 4. Ciclotrón TR-24



Figura 5. Estación de blanco gaseoso



Figura 6. Estación de blanco sólido

1.3.2.2 Radiofarmacia

Los laboratorios contarán con celdas de la marca COMECER, de diversos modelos (celdas de la serie BBS, MIP y Phaedra) y para la síntesis se utilizarán los módulos sintetizadores FastLab2, Tracerlab XF2-C y Tracerlab XF2-N, sistema de procesamiento de blancos sólidos Alceo y un módulo de síntesis Taddeo. Para el fraccionamiento y dispensado se utilizarán Sistemas de dispensado Argo dentro de las celdas Phaedra.



Figura 7. Distintos Celdas calientes.

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.

Entre los análisis de control de calidad de los radiofármacos a ser producidos, se tienen a los siguientes equipos:

- Cromatógrafo de Gases (GC), de líquidos (HPLC) y Escáner de Cromatografía de Capa Delgada (TLC).
- Espectrómetro Multicanal gamma con detector de germanio Hiperpuro (HPGe).
- Equipamiento para la medición de Endotoxinas Endosafe.
- Calibradores de Dosis.
- pH-metros, purificadores de agua, balanzas analíticas, campanas de flujo laminar.



Figura 8. Cromatógrafo de líquidos, HPLC



Figura 9. Cromatógrafo de gases, GC



Figura 10. Escáner de capa fina, TLC



Figura 11. Calibrador de dosis.



Figura 12. Espectrómetro gamma con HPGe



Figura 13. Campana de flujo laminar

1.3.2.3 Preclínica

El CCRP contará con instalaciones para desarrollar estudios e investigaciones preclínicas en el área de radiofarmacia.

El laboratorio de investigación, cuenta con equipamiento para cumplir estos objetivos en el área preclínica. Destacan las celdas calientes y equipos analíticos de laboratorio para la ejecución de seguimiento y control de calidad.

El equipo principal de esta unidad es el MiniPET Vector 5, que permite obtener imágenes PET / SPECT / CT para estudios en animales.

Esta unidad será de vital importancia para realizar investigación en preclínica, entre las principales líneas de estudio, se tienen:

- Evaluación del metabolismo de moléculas con acción terapéutica (nuevas, existentes) a través del marcaje 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,

nivel mundial para el área de salud.

valles y llanos).



Figura 14. MiniPet de Estudios Preclínicos

Investigación y evaluación de nuevas aplicaciones de radioisótopos emergentes a

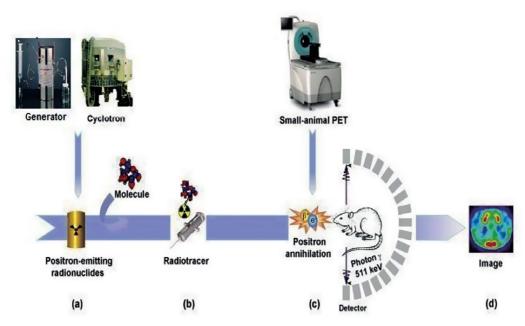


Figura 15. Esquema de trabajo de investigación con el MiniPet.

Algunos ejemplos de nuevos radioisótopos emergentes son:

⁸⁹Zr, El Zirconio-89 es un radioisótopo utilizado en estudios PET generalmente para estudios con anticuerpos marcados, La importancia del zirconio-89 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.

- 61Cu, muchas moléculas pueden ser marcadas con isotopos del cobre, entre algunos de sus usos se tiene el marcado de tumores tipo fibrosarcomas y marcado en células blancas o rojas.
- ⁴³Sc, y ⁴⁴Sc: puede ser utilizados moléculas similares al Galio, por lo que tiene futuras aplicaciones en tumores neuroendocrinos.
- 86Y: es utilizado para el marcado de péptidos dirigidos al receptor de somatostatina (Tumores neuroendocrinos), y también el marcado en anticuerpos para estudio.

1.4 Aplicaciones del CCRP

El Complejo Ciclotrón Radiofarmacia Preclínica tiene como principal función la de proveer radiofármacos seguros, eficaces y de calidad a los centros de medicina nuclear del país, para poder fortalecer los servicios de diagnóstico y tratamiento de enfermedades como el cáncer, que aquejan a la población boliviana.

Adicionalmente, y gracias a las capacidades tecnológicas del CCRP, se podrá desarrollar de gran manera el área investigativa del centro, con el desarrollo de nuevos radiofármacos que en un futuro puedan utilizarse para proporcionar mejores diagnósticos a los pacientes que acudan a los centros médicos.

Con la incorporación de profesionales formados y especializados en la operación del CCRP, se posibilita la enseñanza, educación y formación de nuevos recursos humanos, que permitirá que profesionales bolivianos puedan operar a lo largo de la vida del CCRP, garantizando la calidad de los productos obtenidos en este complejo.

Uno de los principales beneficios de poder contar con el CCRP en el territorio boliviano,

es el de poder proporcionar brindar radiofármacos que permitan el diagnóstico temprano de enfermedades oncológicas, neurológicas y cardiológicas entre otras, posibilitando acceder tratamientos en etapas tempranas de la enfermedad, de tal forma que se reduzca el índice de mortalidad de la población nacional.

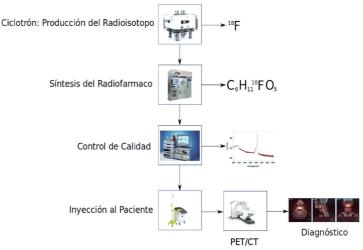
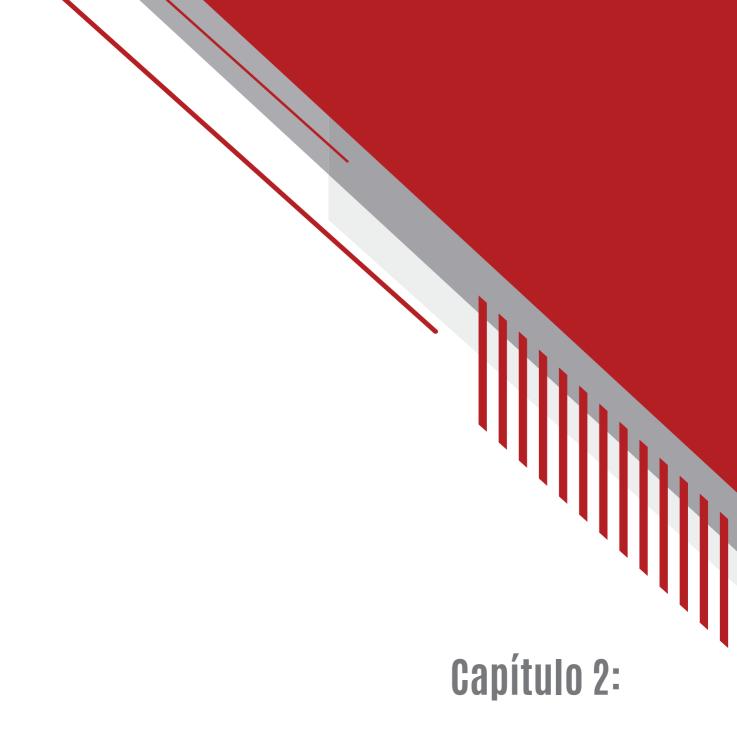


Figura 16. Esquema de trabajo Ciclotrón desde la producción del radioisótopo hasta la obtención del diagnóstico. [65]

Actividades sugeridas

PLANTEAMIENTO DE INTERROGANTES	RESPUESTAS
¿De qué capacidad será el Ciclotrón con el que contará Bolivia?	
¿Cuáles con los radiofármacos que inicialmente se producirán a nivel Bolivia?	
¿Consideras que se puede realizar investigación en el área de radiofármacos en Bolivia?	



Centro Multipropósito de Irradiación (CMI)

Actividades de Inicio

PLANTEAMIENTO DE INTERROGANTES	RESPUESTAS
¿Cuánto tiempo dura la fruta y/o la verdura sin ningún conservante?	
¿Qué formas de preservar los alimentos conoces?	
¿Conoces qué son los alimentos mutagénicos?, ¿Cuál es tu opinión respecto a ellos?	

2.1 Generalidades

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

2.2 Principios de la Tecnología

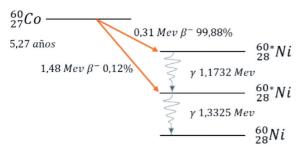


Figura 17. Esquema de decaimiento 60 Co.

El principio de la tecnología empleada en estas instalaciones, Irradiador Industrial e Irradiador Autoblindado, es la irradiación gamma que es producida por decaimiento radiactivo (proceso espontáneo). Se emplean fuentes radiactivas de ⁶⁰Co para irradiar materiales y productos de interés. El ⁶⁰Co es un isótopo inestable del cobalto que es producido en reactores de investigación

mediante el bombardeo de neutrones en cobalto estable. El ⁶⁰Co decae en ⁶⁰Ni con la posterior emisión de un electrón y antineutrino.

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

$$^{60}_{\text{III}}Co \rightarrow ^{60*}_{\text{III}}Ni+\overline{e}+\overline{v}_{e}$$

$$^{60*}_{\text{III}}Ni \rightarrow ^{60}_{\text{III}}Ni+\gamma$$

La principal diferencia entre el irradiador autoblindado e irradiador industrial es la capacidad de irradiación.

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 ISO 11137-2:2006. Cuando se requiera alcanzar un cambio genético u modificación en propiedades físicas, químicas en algún producto

alimentario o no alimentario es necesario basarse en investigaciones ya realizadas a fin de documentar los posibles resultados y en base a esta información se van realizando diferentes estudios como ser físicos, químicos, microbiológicos y genéticos.

La determinación de dosis se realiza en el irradiador autoblindado, 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 en el irradiador autoblindado es de 3,8 litros con una actividad máxima de 12 kCi, en cambio el Irradiador Industrial cuenta con un volumen aproximado de 11,2 m3 por lote de irradiación y una actividad máxima de 1000 kCi.

2.3 Instalación

2.3.1 Irradiador Autoblindado

Es un equipo utilizado para irradiar muestras, materiales y productos de menor tamaño, que garantiza la protección a la radiación de las fuentes de 60Co que aloja internamente, atenuando la radiación con el diseño y blindaje que posee, a niveles aceptables para una operación segura.

El irradiador autoblindado 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 instalación de las fuentes radiactivas y atenúen la radiación gamma, también permiten el intercambio de aire y el montaje del separador y un cilindro. El separador es una estructura de wolfram con una cavidad donde se aloja un cilindro de acero inoxidable que cumple la tarea de alojar la muestra a irradiar.

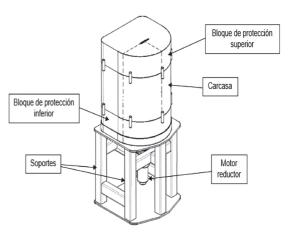


Figura 18. Esquema del Irradiador Autoblindado. [67]

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° mediante el motor reductor del propulsor de rotación.

El irradiador autoblindado 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 ¹.

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

2.3.2 Irradiador Industrial

El Irradiador Industrial, es una instalación que cuenta con diferentes componentes que permiten su funcionamiento, destacan los siguientes:

- 1. El sistema de transporte permite el ingreso de contenedores de aluminio con producto dentro de la sala de irradiación mediante dispositivos de suspensión.
- 2. Las fuentes radiactivas se encuentran dentro 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 contienen en su interior a las fuentes radiactivas permitiendo subir y bajar a través del guía de los bastidores y el sistema de izaje que se encuentra encima de la sala de irradiación. Los bastidores tienen dos posiciones: a) posición de irradiación y b) posición de blindaje.
 - a) Durante la "posición de irradiación" los bastidores se encuentran suspendidos permitiendo que la radiación gamma proveniente de las fuentes radiactivas interactúa 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. 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 del mismo.
- 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.

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

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 autoblindado.

2.4 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 una tabla que resume las diferentes aplicaciones con sus respectivos beneficios para distintos sectores:

Tabla 4. Principales Productos y Servicios que brindará el Centro de Irradiación. Elaboración propia.

Sector Agroindústria e Industria Alimentaria		Sector Salud e Industria Medico-Farmacéutica:		
Aplicaciones	Beneficios	Aplicaciones	Beneficios	
-Irradiación para la prevención del deterioro de Materias primas: Procesos Fisiológicos en vegetales (Brote y maduración).	-Eliminación de microorga- nismos alterantes, deterio- ro por plagas de insectos durante el almacenamien- to, dando mayor valor agre- gado al producto prolon- gando su vida anaquel, reduciendo los desperdi- cios, sin elevar su tempera- tura como otros procesos físicos, y no deja ningún re- siduo químico.	-Esterilización de envases en grandes cantidades.(*)	-Disponibilidad del servicio para hospitales, para esterilizar sus envasesPermitirá a la industria Medico-Farmacéutica producir nuevos productos que actualmente reduciendo grandemente los costos a nivel país y aumentando el redito a la industria boliviana.	
-Irradiación de Alimentos.	-Prevención de Enferme- dades Transmitidas por Alimentos (ETA's): Elimi- nando o minimizando los peligros biológicos en el alimento (parásitos cau- santes de enfermedades y microorganismos pató- genos). -Mayor garantía de inocui- dad y menor incidencia de enfermedades transmiti- das por los alimentos para la población.	-Esterilización de mosquitos Aedes para la aplicación de la técnica del insecto estéril. (*)	Control del vector (mosquitos Aedes) de enfermedades: Dengue, Zika y Chikungunia en beneficio de la salud de la población.	

-Irradiación de piensos alimenticios para el ganado y alimentos para bioterios.	-Descontaminación y eliminación de microorganismos de descomposición presentes en el alimento para el ganado dando una mayor duración en el almacenamiento e inocuidadDesinfección de las raciones de alimento utilizado para estudios de laboratorio en bioterios.	-Esterilización de materiales de laboratorio e instrumental clínico de metal, vidrio y plástico.	- Servicio disponible para hospitales para poder esterilizar sus materiales reutilizables como metal o indumentaria.
-Irradiación como medida fitosanitaria.(*)	-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 EuropaEvita la diseminación de plagas de Artrópodos perjudiciales y plagas cuarentenarias en productos Fruti-hortícolas para consumo interno -Mayor conservación de los productos Fruti-hortícolas para la comercialización, almacenamiento y/o exportación.		-Permitirá a la industria Medico-Farmacéutica o emprendimientos que deseen incursionar en la producción de materiales-medico quirúrgicos debido a que la radiación ionizante, en algunos productos, es el único medio para la esterilización según normativa nacional e internacional, que actualmente solo se importan, reduciendo grandemente los costos a nivel país y aumentando el redito 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.
-Tratamiento de residuos orgánicos para la obtención de biofertilizantes. (*)	-Reutilización de los residuos orgánicos con alto contenido de nutrientes para los cultivos eliminando cualquier microorganismo patógeno que pudiera estar presente.	-Esterilización de material herbolario.	-Desinfección o esteriliza- ción para la producción de medicamentos natu- rales (infusiones, poma- das, ungüentos, cataplas- ma, etc.).

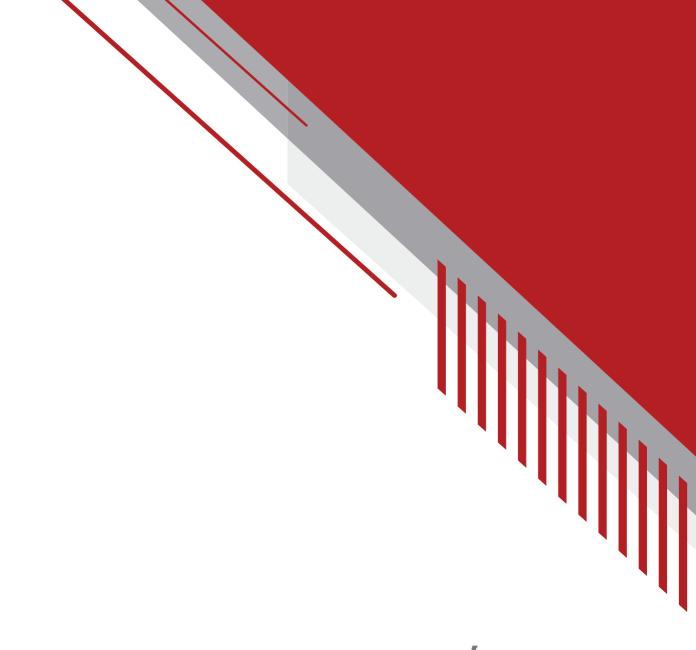
-Técnica del Insecto	-Control de las plagas que atacan a los cultivos de nuestro país, se pue- de realizar la reducción o la eliminación del insecto según se determine lo ideal en cada caso parti- cular por insecto, coad- yuvando a una produc- ción mayor.	-Irradiación de sangre.	-La irradiación de compo- nentes sanguíneos elimina la posibilidad de desarro- llo de Enfermedad Injerto contra Huésped Asociada a Transfusión (EICH), la cual es mortal en el 95% de los casos, siendo el único mé- todo reconocido a nivel mundial para evitar el de- sarrollo de dicha enferme- dad.
Estéril(TIE). (*)	-Con la eliminación de plagas empleando esta técnica se podría dar la apertura a mercados internacionales para exportación de productos alimentarios (frutales, hortalizas, etc.) que evitan la importación de dichos productos evitando así el riesgo de ingreso de la plaga a su país.	-Esterilización de tejidos y órganos.	-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, como, por ejemplo, de corneas para los trasplantes en ojos.
-Degradación de residuos de la caña de azúcar para obtención de bioetanol. (*)	-Utilización de residuos de la agroindustria am- pliando el redito para las empresas y reduciendo los desperdicios.	-Producción de hidrogeles.(*)	-Tratamiento alternativo para personas quema- das, con leishmaniosis, heridas de diabetes y otros.
-Irradiación de cebada en la obtención de cerveza. (*)	-Reducción de los tiem- pos de producción para la obtención de la cerve- za al acelerar la fermen- tación y mayor tiempo conservación de la mate- ria prima para el almace- namiento.		
-Mejoramiento Genético. (*)	-Actualmente otros países producen en la misma por una misma hectárea de producción 4 veces más cantidad, por lo que la mejora genética de cultivos busca resiliencia a factores adversos (sequía, falta de algunos nutrientes, salinidad, etc.) y manifestaciones fenotípicas deseables (tamaño, nutrientes, forma, color, etc.).		

Sector Patrimonio Cultural e Histórico		SECTOR INDUSTRIAS	
Aplicaciones	Beneficios	Aplicaciones	Beneficios
-Irradiación de materiales histórico culturales que han sido declarados patrimonio nacional y en algunos casos mundial.	-Eliminación de microorga- nismos y plagas presentes en el material para rever- tir la mala condición que presente y combinarlo con medios de almacenamien- to especializado para per- petuar el patrimonio cul- tural-histórico, tales como hojas, libros, pinturas, es- culturas, tejidos, instrumen- tos, muebles, etc.	-Irradiación de materiales poliméricos (plásticos). (*)	-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 los residuos plásticos logrando una mejor disposición final y un menor impacto al medio ambiente.
		-Irradiación de gemas.(*)	-Avivamiento del color de piedras semiprecio- sas como por ejemplo la "Bolivianita" (Ametrino), cuarzos, topacios, beri- los, espodumenas, fluori- tas, etc.
		-Irradiación de productos cosméticos.	etc. y los instrumentos asociados como los apli- cadores, esponjas, lápi- ces, pinceles, cepillos, en- tre otros que se puedan producir en Bolivia.
		-Producción de nanomateriales.	-Incursión del país en un nuevo campo del conoci- miento científico como lo es la nanotecnología.

^(*) Aplicación que por su grado de complejidad ha sido definida como línea de investigación para su desarrollo a corto y mediano plazo en el Centro Multipropósito de Irradiación.

Actividades sugeridas

PLANTEAMIENTO DE INTERROGANTES	RESPUESTAS
Identifica la mayor ventaja y desventaja del tratamiento de alimentos por irradiación.	
¿Cuál es tipo de planta de irradiación en Bolivia? ¿Es importante su consolidación?	
¿Cuál es el símbolo que indica los alimentos irradiados?	



Capítulo 3:

Reactor Nuclear de Investigación (RNI)

Actividades de Inicio

PLANTEAMIENTO DE INTERROGANTES	RESPUESTAS
¿Crees que un Reactor Nuclear nos brinda beneficios? ¿Cuáles?	
¿Cuál es la diferencia entre un Reactor Nuclear de Investigación y un Reactor Nuclear de Potencia?	
Visita el simulador de isotopos en la siguiente dirección: https://phet.colorado.edu/sims/html/isotopes-and-atomic-mass/latest/isotopes-and-atomic-mass_es.html	
Menciona el porcentaje de abundancia en la naturaleza del ¹¹ B, luego quítale un neutrón e indica ¿cuál es el Isótopo resultante? y ¿en qué porcentaje de abundancia en la naturaleza se encuentra?	

3.1 Generalidades

Los reactores nucleares son dispositivos que aprovechan las reacciones nucleares 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 de 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 su uso, combustible, espectro de neutrones, refrigerante, circulación del refrigerante, moderador, entre otros.

Tabla 5 - Clasificación de los Reactores Nucleares de Fisión [1, 2].

Dependiendo al uso	Dependiendo al combustible
Reactores de potencia / generación de energía - Pressurised Water-cooled Reactor - Boiling Water Reactor - Presssurised Heavy-Water Reactor - Light Water Graphite-moderated Reactor - Gas-Cooled Reactor - Fast Breeder Reactor Reactores de propulsión - submarinos nucleares - rompehielos nucleares Reactores de investigación - Tipo piscina - Tipo tanque - Tipo tanque-en-piscina	Uranio natural Uranio enriquecido con Uranio-235 - De bajo enriquecimiento (<20%) - De alto enriquecimiento (>20%) Plutonio-239 Combustible nuclear de mezcla de óxidos MOX
Dependiendo al espectro de neutrones	Dependiendo a la circulación del refrigerante
Reactores de espectro de neutrones térmicos Reactores de espectro de neutrones rápidos	Refrigerado por convección natural Refrigerado por circulación forzada
Dependiendo al refrigerante	Dependiendo al moderador
Refrigerado por Agua Refrigerado por gas - CO ₂ - He Refrigerado por metal líquido	Moderado por agua pesada Moderado por agua ligera Moderado por grafito Moderado por berilio

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

3.2 Reactor de 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 poder extraer neutrones provenientes del núcleo del reactor con diversos fines. Los Reactores de Investigación son más sencillos que los reactores de potencia, operan a bajas temperaturas y necesitan mucho menos combustible que sus contrapartes para la generación de energía eléctrica.

El término general "Reactor de Investigación" cubre un rango amplio de reactores que no están destinados a la producción de energía eléctrica, desde conjuntos sub-críticos, 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" [3].

3.3 Propósitos del reactor nuclear de investigación

El Reactor Nuclear de Investigación tiene como objetivo principal aportar a diferentes áreas de desarrollo social y económico del país mediante la investigación científica, y los servicios de 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, educación, minería, medio ambiente, entre otros.

Los mayores 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 que busca el Estado Plurinacional de Bolivia con el cumplimiento de tratados y convenios internacionales relacionados a la no proliferación de armas nucleares y salvaguardas.

3.4 Potencia del reactor nuclear de investigación

El reactor de investigación del Centro Nuclear de Investigación y Desarrollo Nuclear (CIDTN) tendrá una potencia nominal de 200 kW (la unidad de la potencia es el Watt o Vatio, 1 kW = 1000 Watt). Cabe aclarar que el valor de 200 kW es muy inferior a la potencia que tienen los reactores denominados "reactores de potencia" (aquí no se describen este tipo de reactores), los cuales típicamente tienen una potencia de 3000 MW (1MW = 1000kW).

3.5 Reactores nucleares de investigación en América del Sur

Actualmente existen 17 reactores de investigación operativos en distintos países de América del Sur [1]. En la Tabla 6 se resumen el estado y el número de reactores.

Tabla 6 - Reactores de investigación en países de América del Sur [1].

País	Nombre de la instalación	Potencia (kW)	Estado	Ubicación
	RA-10	30000	En construcción	Buenos Aires
	RA-4	0,001	Operacional	Rosario
	RA-6	500	Operacional	San Carlos de Bariloche
Argentina	RA-1	40	Operacional	San Martin
	RA-3	10000	Operacional	Buenos Aires
	RA-8	0,01	Temporalmente	San Carlos de
		·	fuera de servicio	Bariloche
	RA-2	0,01	Desmantelado	San Martin
	RMB	30000	Planeado	Ipero
	IEA-R1	5000	Operacional	Sao Paulo
Brasil	IPR-R1	100	Operacional	Belo Horizonte
	Argonauta	0,2	Operacional	Rio de Janeiro
	IPEN/MB-01	0,1	Operacional	Sao Paulo
Chile	RECH-1	5.000	Operacional	Santiago
Crille	RECH-2	2.000	Cierre extendido	Santiago
Colombia	IAN-R1	30	Operacional	Bogotá (Distrito Capital)
Don's	RP-0	0,001	Operacional	Lima
Perú	RP-10	10.000	Operacional	Lima
Uruguay	RU-1	10	Desmantelado	Montevideo
Venezuela			Cierre definitivo	San Antonio
	RV-1	3.000		de los Altos
				(Caracas)
Bolivia	-	200	En construcción	El Alto

3.6 Principio de funcionamiento de un RNI

Como cualquier reactor nuclear de fisión, un RNI aprovecha de la fisión nuclear en cadena controlada para su funcionamiento². 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.

² Para más detalles sobre la reacción nuclear en cadena revisar el subtítulo 2.3.2.1 reacción nuclear en cadena de la cartilla 1 Energía nuclear y Universo

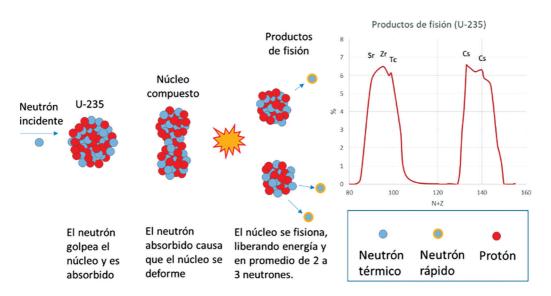


Figura 19. Fisión nuclear de un átomo de Uranio-235 y distribución de productos de fisión. Los neutrones térmicos o lentos son los responsables de inducir la fisión en el Uranio – 235.

Dado que los neutrones rápidos provenientes de la fisión no presentan una gran probabilidad de causar eventos de fisión, estos se ralentizan convirtiéndose en neutrones térmicos mediante colisiones con un "moderador" para incrementar su probabilidad de ocasionar una subsecuente reacción de fisión.

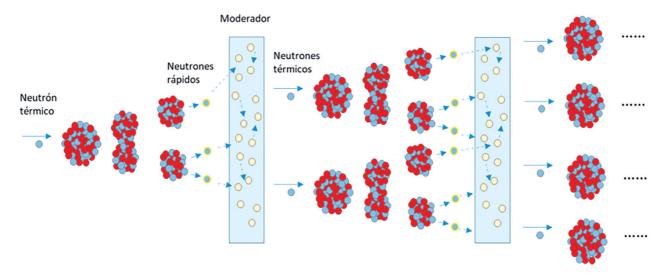


Figura 20. Reacción en cadena en un reactor nuclear. Los neutrones térmicos impactan los núcleos del uranio-235 en el combustible, haciéndolos fisionar liberando energía y de 2 a 3 neutrones rápidos. Los neutrones rápidos son ralentizados por colisiones con los núcleos de los átomos del moderador, lo cual incrementa la probabilidad de que continúen con una subsiguiente reacción de fisión.

Si consideramos el caso anterior, con un neutrón térmico podemos producir de 2 a 3 neutrones rápidos. Éstos pueden ser ralentizados y ocasionar subsecuentes eventos de fisión y continuar así sucesivamente. En este caso, la producción de neutrones y

la reacción en cadena crecen exponencialmente con cada generación. Para poder controlar la reacción en cadena, debemos controlar la población de neutrones en nuestro reactor. Para poder controlar la población de neutrones en el RNI, se cuenta con barras de control. Estas barras están hechas de un material capaz de absorber enormemente los neutrones térmicos responsables de los eventos de fisión.

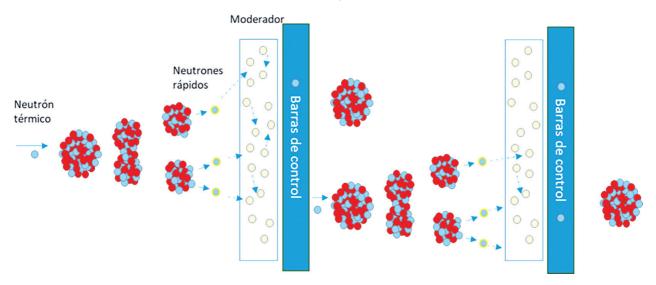


Figura 21. Control de la reacción en cadena en un reactor nuclear. Mediante la inserción de barras de control se absorben los neutrones térmicos responsables de inducir los eventos de fisión. Esto impide que estos neutrones sigan generando subsecuentes eventos de fisión.

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.

3.6.1 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 establecidos en el mundo, y del tipo de 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 22:

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 hasta el núcleo del reactor. Éstas son insertadas entre las barras de combustible y su función primordial es controlar la población de neutrones. Las barras de control constituyen un sistema

que permite iniciar o detener las fisiones nucleares en cadena ya que capturan los neutrones evitando que se produzcan más neutrones (Figura 22).

Blindaje – Es un material que se ubica o establece entre una fuente de radiación ionizante y un punto determinado, el 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 22).

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 22).

Canales Experimentales Verticales– Están diseñados para poder transportar muestras al interior del reactor e irradiarlas con los neutrones que se encuentran en el núcleo del reactor (Figura 22).

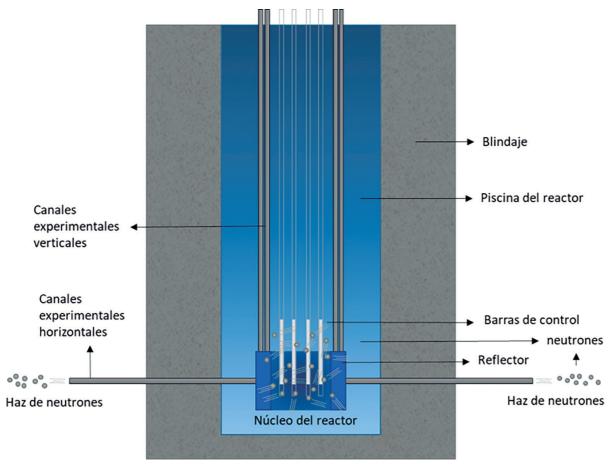


Figura 22. Diagrama esquemático de un Reactor de Investigación tipo piscina.

Combustible nuclear – Comúnmente viene en forma de barras de combustible en el núcleo del reactor. Es el material que da lugar a la fisión nuclear que alimentar 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 isotopo ²³⁵U.

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 (H₂O). 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. En los RNI tipo piscina, el moderador es comúnmente el agua ligera (H₂O) 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 22).

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 retener y devolver al núcleo los neutrones que tienden a escapar, aumentando la eficiencia del reactor. Suele utilizarse agua ligera como reflector, dependiendo el tipo de reactor, aunque en nuestro caso el material utilizado como reflector es 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 y al experimentador según sea necesario.

3.7 Instalaciones

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).

3.7.1 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 en el blanco a irradiar. Existen diferentes resultados a partir de la absorción de un neutrón en el núcleo de un átomo. La reacción más común es la (n, γ), donde "n" representa al neutrón incidente y "γ" la radiación gamma que se libera. E 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 la figura 23.

$${}_{0}^{1}n + {}_{7}^{A}X => {}_{7}^{A+1}X) * => {}_{7}^{A+1}X + \gamma$$
 (a)

$$_{0}^{1}n + _{92}^{238}U => _{92}^{239}U + \gamma$$
 (b)

Figura 23. (a) Esquema de la reacción de captura neutrónica, (b) Para el elemento Uranio-238

Sin embargo, también este tipo de reacción (n, y) no es la única reacción nuclear que permite la producción de radioisótopos en el 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, α): consiste en reacciones en la cuales el blanco absorbe un neutrón y el nuevo estado al que llega decae muy rápido emitiendo una partícula alfa ⁴/₂He

$$_{0}^{1}$$
 n + $_{3}^{6}$ Li => $_{1}^{3}$ H+ $_{2}^{4}$ α

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

$$_{0}^{1}$$
 $n + _{22}^{47}$ $Ti = > _{21}^{47}$ $Sc + _{1}^{1}$ p

• (n, f): Consiste en la colisión de un neutrón con un material fisil, el cual se divide en dos nuevos elementos llamados productos de fisión y algunos neutrones

$$_{0}^{1}n + _{92}^{235}U = >_{36}^{89}Kr + _{56}^{144}Ba + 3_{0}^{1}n$$

La probabilidad de ocurrencia (sección eficaz) de estas reacciones depende del material a irradiar y de la energía del neutrón incidente [4].

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 la figura 24.

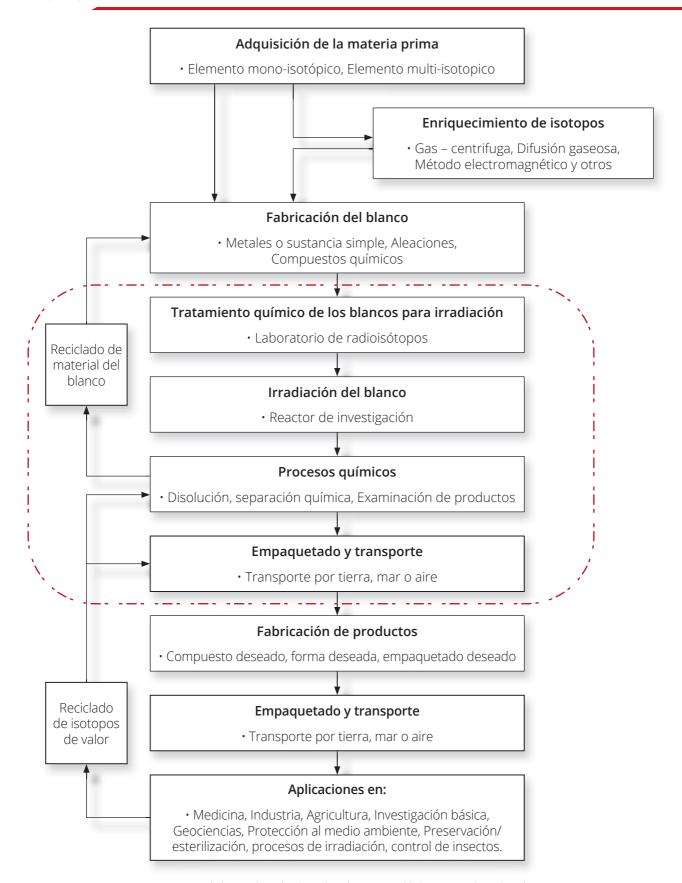


Figura 24. Diagrama de la producción de radioisótopos en el laboratorio de radioisótopos (LRI)

Tabla 7. Equipamiento instrumental del laboratorio de radioisótopos (LRI)

Sala	Operación	Equipamiento	
Equipamiento para el sitio de producción de LRI			
Cámara protectora	- Apertura del blanco irradiado	Manipuladores con asas, Sistema de visualización de protección, Dispositivo para abrir un equipo de irradiación estándar con blancos irradiados trasladados desde el reactor	
Cabinas protectoras	 Disolución del material objetivo; Limpieza de impurezas químicas y de radionúclidos; Acondicionamiento del radionúclido objetivo; Toma de muestras para el control de calidad y control tecnológico; Sellado de los viales con una solución de un isótopo radiactivo; Distribución de los viales en los conjuntos de embalaje de transporte. 	Aparato de apertura de blancos, equipos para la disolución del blanco y de limpieza, Placas calientes, Tanques de vidrio y cuarzo para las soluciones, Paletas de plástico y de acero inoxidable	
	Equipo para el sitio tecnológ	ico LRI	
Almacén de materiales	Almacenamiento de consumibles, materiales de estantería y reactivos químicos	Cabinas de extracción, Estanterías	
Salas de grupos analíticos	Preparación de la muestra y determinación del contenido de radionúclidos e impurezas inactivas	Cabina de protección, campana extractora, Espectrómetro de difusión atómica de plasma acoplado inductivamente, Espectrómetro gamma basado en detector de baja energía, Espectrómetro de centelleo líquido alfa-beta, Dosímetro universal con cámara de ionización, Dosímetro de centelleo, Contador de actividad específica de ácidos, Bomba de vacío y refrigerador	

3.7.2 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 de funcionamiento del análisis por activación neutrónica consiste en la irradiación de una muestra mediante un haz de neutrones producidos por una fuente (Reactor de investigación), la absorción de los neutrones producirá reacciones nucleares en la muestra, haciendo que se emitan partículas cargadas o fotones de alta energía (ver Figura 25). Estás emisiones pueden ser detectadas y sus energías características medidas.

Cuando las mediciones de la radiación resultante de la muestra se las realizan al momento de la irradiación el análisis se denomina Análisis de Activación Neutrónica por Emisión Gama Instantáneos (Prompt Gamma Analysis, PGA), y cuando estas se realizan después de la irradiación se denomina Análisis Instrumental de Activación Neutrónica (Instrumental Neutron Activation Analysis, INAA).

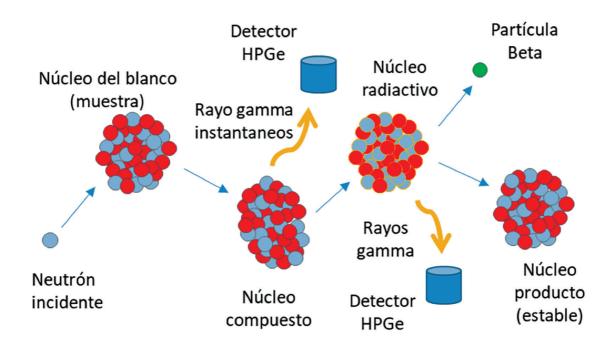


Figura 25. Principio de funcionamiento del AAN

En la figura 25 se muestra el proceso para el análisis de activación neutrónica en forma general.

El laboratorio de análisis por activación neutrónica presenta el siguiente equipamiento instrumental.

Tabla 8. Equipamiento instrumental del laboratorio de análisis por activación neutrónica

Sala	Operación	Equipamiento	
Sala de preparación de muestras	Preparación de muestras mediante molienda, homogeneización, secado, pesaje y envasado (encapsulado) en contenedores estándares	Campana extractora, balanzas analíticas, horno de mufla, molino vibratorio, molino ultrafino de impacto, conjunto de análisis por fluorescencia de rayos X	
Sala de control de AAN		Ordenador	
Sala de detectores de AAN	Medición, obtención de los espectros.	Detectores HPGe	
Sala de almacenaje de muestras	 Transporte neumático de la muestra al reactor; Transporte neumático de la muestra del canal del reactor a la sala 	Unidad de alimentación de muestras automático con sistema de control	
Sala del grupo analítico	Investigación de muestras irradiadas mediante métodos de espectrometría gamma	Espectrómetro alfa con 2 cámaras y detectores de Silicio, espectrómetro beta.	
	eparación de la uestra y de los patrones Introducción al porta muestras	Desplazamiento de la muestra a la posición de irradiación Irradiación Corta/	
r	Pesaje de las nuestras y de os patrones / cterísticas de las muestras	Irradiación en el RI/ Canal experimental Irradiación Larga/ horas Desplazamiento de la muestra a la posición de detección	
	DGNNA / Análisis instrumental	PGNNA / instantáneos	
	Enfriamiento de la muestra	Detección y medición usando métodos de espectrometría gamma/ Detector HPGe	
Proceso 1. Análisis instrumental de activación de neutrones (INAA); Proceso 2. Análisis por medio de los gamma quanta instantáneos (PGA);		Análisis de los espectros obtenidos Determinación de la composición de la muestra	

Figura 26. Diagrama del proceso para el análisis por activación neutrónica

3.7.3 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 y el equipamiento del laboratorio químico se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9 – Equipamiento del laboratorio químico

Operaciones	Equipamiento
Preparación de las muestras de agua del reactor	Cabina de protección, cabina de secado
Análisis de las muestras de agua de	- Campana extractora, termostato, agitador
reposición del reactor:	magnético, refrigerador, bombas, balanzas
- Por oxígeno, hidrógeno,	- Oxímetro, Conjunto espectrométrico de
- Por indicador de pH y conductividad	centelleo líquido,
eléctrica específica,	- pH-metro,
- Por impurezas de cationes no activos,	- Instalación de espectrómetro de masas
catiónicas y aniónicos,	con un módulo para el análisis de matrices
- Para medición del contenido de impurezas	con alto contenido en sal, Cromatógrafo
de radionúclidos, incluidos los productos de	iónico, Fotómetro fotoeléctrico, Unidad de
fisión.	filtro para la detección de turbidez,
	- Analizador de fluidos, Espectrómetro
	gamma.

3.8 Aplicaciones

Las aplicaciones que ofrecerá el Reactor de Investigación que se construye en el CIDTN serán:

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

Como se explicó en la sección 3 sobre los principios y diagramas de procesos del Laboratorio de Producción de Radioisótopos y del Laboratorio de Análisis por Activación Neutrónica. A continuación, se darán ejemplos de estas aplicaciones y por último se especificará las áreas de Capacitación y Entrenamiento que se realizarán en el Reactor de Investigación.

3.9 Producción de radioisótopos

Los radioisótopos son empleados en distintas áreas como en medicina nuclear, industria, agricultura e hidrología.

Los radioisótopos en:

- a) Medicina nuclear, son empleados para diagnóstico y tratamiento de enfermedades;
- b) 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, permite 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.

Por ejemplo, el Lutecio-177 es un radioisótopo que después de un proceso radioquímico se convierte en el radiofármaco Lutecio-177-DOTATE, y se emplea para tratamiento de tumores neuroendocrinos, que son un tipo letal de cáncer del aparato digestivo [9]. Por otro lado, la emisión gama que emite el ¹⁷⁷Lu en el radiofármaco se emplea para la obtención de imágenes de órganos [10]. El proceso de producción del radioisótopo ¹⁷⁷Lu se da con la irradiación del "blanco" ¹⁷⁶Lu, y su proceso se describe como:

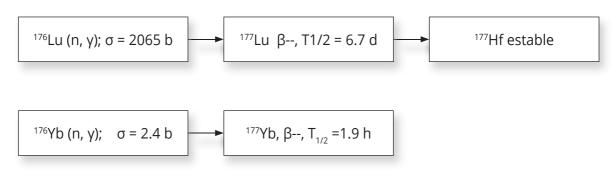


Figura 27. Esquema de la producción Lutecio-177

La figura 17 representa esquemáticamente la producción de ¹⁷⁷Lu empleando el método directo por irradiación de un blanco enriquecido de ¹⁷⁶Lu y el método indirecto a través de la irradiación de un blanco enriquecido de Iterbio-176 (¹⁷⁶Yb). Además, también se puede observar el decaimiento espontáneo de ¹⁷⁷Lu, que se da en un tiempo aproximado de 7 días (6.71 días) y decae en un isotopo estable, Hafnio-177 (¹⁷⁷Hf).

3.10 Análisis por activación neutrónica

El método de AAN puede desarrollarse en diferentes campos como: Arqueología, Minería, Medicina, Ciencias geológicas, y Agricultura.

La técnica de AAN en: Arqueología, se emplea para la caracterización y de especies (cerámica, obsidianas, caliza y basalto); Minería, para la determinación de componentes químicos en muestras minerales; Medicina, para la verificación del uso de radioindicadores in-situ de medicinas y dosificación para distribución comercial; Ciencias geológicas, para la investigación 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.

En comparación de la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX) que también es una técnica para determinación de elementos químicos, la técnica AAN demostró mayor alcance de detección de elementos químicos, como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Comparación de resultados de análisis de muestras minerales entre los métodos de AAN y FRX [12].

Flomente	Energía de radiación gamma (MeV)		
Elemento	ANN	FRX	
Al %	17.2 ± 1	14.1	
Ca%	22.8 ± 6	20.5	
Fe%	5.5 ± 2	5.7	
Ti%	1.9 ± 1	1.4	
Hf (ppm)	62 ± 1	ND	
La (ppm)	63 ± 3	ND	
U (ppm)	1.6 ± 1	ND	
Zr (ppm)	387 ± 4	ND	
ppm, partes por millón			
ND, No Detectado			

4.3 Capacitación y entrenamiento

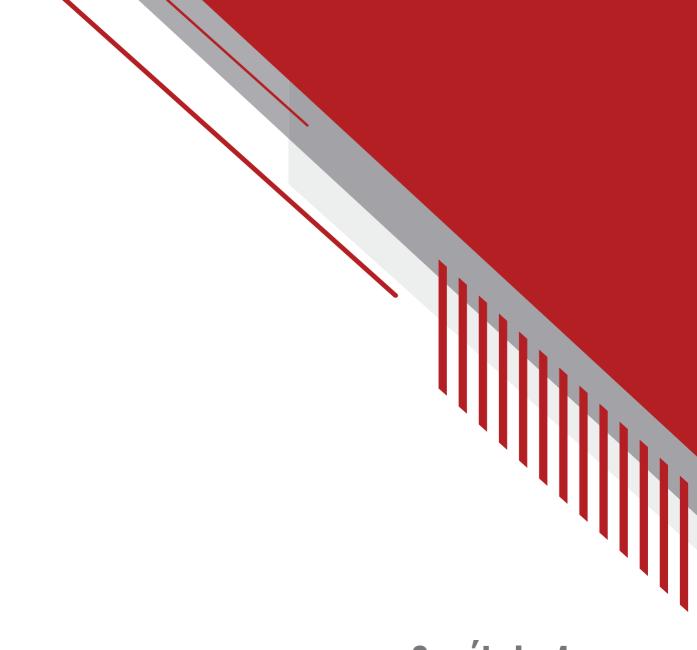
El objetivo del Reactor de Investigación es desarrollar actividades formativas a través de capacitación y entrenamiento por medio de visitas guiadas en el Complejo del Reactor a civiles, estudiantes de colegio, profesores, estudiantes universitarios. En general, las visitas guiadas están dirigidos al público que estén interesados en conocer las aplicaciones del reactor de investigación.

Por otro lado, también se llevará a cabo la formación y capacitación de personal técnico, desarrollo de programas de formación, desarrollo de capacidades en investigación y por último 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.

Actividades sugeridas

PLANTEAMIENTO DE INTERROGANTES	RESPUESTAS
¿Qué radioisótopos son utilizados en medio ambiente?	
¿Cuáles son las aplicaciones de la Activación Neutrónica?	
Describe el funcionamiento de un Reactor Nuclear de Investigación	



Capítulo 4:

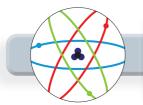
Laboratorios Especializados

Actividades de Inicio

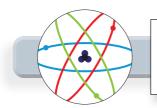
PLANTEAMIENTO DE INTERROGANTES	RESPUESTAS
¿En qué consiste el laboratorio de Radioecología?	
¿En qué consiste el laboratorio de Radiobiología?	

4.1 Generalidades

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



Desarrollar la investigación científica en radiobiología y radioecología en Bolivia



Proporcionar la solución de tareas prácticas para la introducción de tecnologías de radiación prometedoras para satisfacer las necesidades de la agricultura y la industria de procesamiento de alimentos.

Figura 28. 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 incluye el estudio del comportamiento de los radionucleídos 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 radionucleídos.

En los ambientes del LRR, se cuenta con la sala de "Invernadero", que está destinado 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.

4.2 Principios de la tecnología

Principalmente los laboratorios de Radiobiología y radioecología están enfocadas 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.

4.3 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.

4.3.1 Laboratorios

4.3.1.1 Grupo de Microbiología

Alcance

 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.

Objetivos

- Estudio de los efectos de las radiaciones ionizantes sobre los 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.

4.3.1.2 Grupo de Fitopatología y Entomología de las radiaciones

Alcance

• 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.

Objetivos

- Desarrollo y aplicación de tecnologías de radiación para la desinsectación de cereales, pro-ductos 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.

4.3.1.3 Grupo de Radiobiología Vegetal

Alcance

• Utilizar radiaciones ionizantes para aumentar el rendimiento de los cultivos y mejorar su calidad.

Objetivos

- 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.

4.3.1.4 Grupo de Evaluación de la calidad de productos irradiados

Alcance

• Estudio de la calidad de los productos agrícolas y alimentarios después de la irradiación.

Objetivos

- Estudiar el efecto de la radiación en los indicadores de calidad del producto.
- İndicadores 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

4.3.1.5 Grupo de Investigación en Vegetación

Alcance

• Organizar y realizar investigaciones sobre vegetación en el módulo "Invernadero".

Objetivos

 Garantizar la realización de experimentos de vegetación, que incluyen: preparación de suelo para experimentos, pedido de fertilizantes, adherencia al régimen de riego para plantas, cuidado de cultivos, control del funcionamiento del sistema de microclima, organización de la recolección de residuos.

4.3.1.6 Grupo de Investigación en Agroquímica

Alcance

 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.

Objetivos

- 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.

4.3.1.7 Grupo de Investigación en Radioecología

Alcance

 Medir el contenido de radioisótopos y ¹⁵N en muestras, utilizando el método de isótopos marcados.

Objetivos

- Incluir el dominio de las siguientes habilidades laborales:
- Preparación de soluciones de trabajo de isótopos radiactivos ³²P, ³⁵S, ⁴⁵Ca, ¹⁴C, ⁸²Br, ²⁴Na, ⁵¹Cr, ⁴⁶Sc e isótopos no radiactivos ¹⁵N.
- Marcar los isótopos radiactivos ³²P, ³⁵S, ⁴⁵Ca, ¹⁴C, ⁸²Br, ²⁴Na, ⁵¹Cr, ⁴⁶Sc y un isótopo estable ¹⁵N e introducción de las soluciones de trabajo en muestras de suelo
- Incubación de suelos con isótopos radiactivos introducidos ³²P, ³⁵S, ⁴⁵Ca, ¹⁴C, ⁸²Br, ²⁴Na, ⁵¹Cr, ⁴⁶Sc e isótopos no radiactivos ¹⁵N (en colaboración con el Grupo de Investigación en Vegetación).
- Detección y determinación de ³²P, ³⁵S, ⁴⁵Ca, ¹⁴C, ⁸²Br, ²⁴Na, ⁵¹Cr, ⁴⁶Sc, ¹⁵N en el recuento de muestras de los suelos y plantas.

4.3.2 Equipamiento

Grupo de Microbiología



Figura 29. Analizador microbiano de respuesta rápida BakTrak 4300

Grupo de Investigación en Radioecología



Figura 30. Analizador de amplitud de pulso CANBERRA

Grupo de Fitopatología y Entomología de las radiaciones



Figura 31. Cabina de flujo laminar de seguridad bilógica de clase II Safe 2020

Grupo de Radiobiología Vegetal



Figura 32. Cromatógrafo líquido Agilent InfinityLab.



Figura 33. Espectrómetro de masas Agilent

Grupo de Evaluación de la calidad de productos irradiados



Figura 34. Campana de extracción LAB PROShVKP-150-LOIP

Grupo de Investigación en Vegetación



Figura 35. Campana extractora radioquímica ShV-2RA

Grupo de Investigación en Agroquímica



Figura 36. Radiómetro Geiger alfa-beta para medir pequeñas actividades UMF-2000

4.4 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.

Consignas de Aplicación

Realizar un diagrama de flujo que describa los objetivos, alcances y aplicaciones en Bolivia de uno de los componentes expuestos en este presente cuaderno.

El contenido debe estar solamente en una hoja y debe ser presentado en formato PDF, con los datos del participante.

Bibliografía

- 1. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la Ciencia y la Tecnología de México., [En línea].
- 2. C. Moreira, «PREZI,» 11 Septiembre 2018. [En línea]. Available: https://prezi.com/30rk8vivto-x/radiobiologia/. [Último acceso: 29 Septiembre 2021].
- 3. C.d. Universo, «Meteorología,» 2021. [En línea]. Available: https://www.meteorologiaenred.com/que-es-el-universo.html.
- 4. C. d. Universo, «Definiciones,» Mariana Perez, Junio 2021. [En línea]. Available: https://conceptodefinicion.de/universo/.
- 5. U. d. Chile, «El átomo,» Santiago.
- 6. J. M. Pohlhammer, «Energía nuclear fundamentos,» p. 10.
- 7. p. y. c. Modelo atómico de Thomson, «Energía Nuclear,» Mayo 2021. [En línea]. Available: https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/atomo/modelos-atomicos/modelo-atomico-de-thomson.
- 8. R. M. Fernandez, «Instituto de estructura de la materia,» Consejo superior de investigaciones científicas, [En línea]. Available: https://www.iem.csic.es/semanaciencia/semanaciencia15/semciencia15-molina.pdf.
- 9. C. INGENIO, «¿Qué es la física nuclear?,» Centro Nacional de Fisica de partículas, [En línea]. Available: https://www.i-cpan.es/es/content/%C2%BFqu%C3%A9-es-la-f%C3%ADsica-nuclear.
- 10. P. elementales, «Física de partículas,» Generaciones de fermiones, [En línea]. Available: https://ayudahispano-3000.blogspot.com/2014/10/fisica-de-particulas_58.html.
- 11. o. d. l. materia, «Partículas fundamentales,» Niveles de organización dde la materia, [En línea]. Available: https://sites.google.com/site/trabajosubmodulo/home/actividades-deaprendizaje.
- 12. E. nuclear, «Consejo de seguridad nuclear,» [En línea]. Available: https://www.csn.es/la-energia-nuclear.
- 13. F. y. s. caracteristicas, «Energía solar,» [En línea]. Available: https://solar-energia.net/blog/foton.

- 14. f. y. d. d. energía, «The laser adventure,» Universidad de Murcia, España, [En línea]. Available: https://www.um.es/LEQ/laser/Ch-2/F2s2p1.htm.
- 15. P. A. Observatory, «los rayos cósmicos,» [En línea].
- 16. C. N. d. S. Ambiental, «Radiación UV,» [En línea]. Available: https://www.cdc.gov/spanish/nceh/especiales/radiacionuv/index.html.
- 17. HyperPhysics, «physicsworld.com,» agosto 2000. [En línea]. Available: http://hyperphysics. phy-astr.gsu.edu/hbase/index.html. [Último acceso: julio 2021].
- 18. L. w. d. F. vBulletin®, «La web de Física,» 2003. [En línea]. Available: https://forum.lawebdefisica. com/forum/el-aula/teor%C3%ADa-cu%C3%A1ntica-de-campos-f%C3%ADsica-nuclear-y-de-part%C3%ADculas/18882-reacci%C3%B3n-de-fusi%C3%B3n-fision-segun-la-energia-de-enlace-por-nucle%C3%B3n-hay-algo-que-no-comprendo-bien. [Último acceso: junio 2021].
- 19. E. Oliva, Curso básico de fusión nuclear, Madrid, España: Sociedad Nuclear Española, 2017.
- 20. J.-L. R. J. S. M. Basdevant, Fundamentals in Nuclear Physics, France: Springer Science+Business Media, Inc., 2005.
- 21. V. C. y. H. Cerecetto, Una introducción, Montevideo, Uruguay: Publicaciones-Comisión Sectorial de Enseñanza, Universidad de la República, 2018.
- 22. T.-L. Químico, «TP-LAboratorio Químico,» 2021. [En línea]. Available: https://www.tplaboratorioquimico.com/quimica-general/quimica-nuclear/la-fusion-nuclear.html. [Último acceso: mayo 2021].
- 23. C. C. R.-N.-S. 4.0, «culturacientifica.com/,» 2011. [En línea]. Available: https://culturacientifica.com/2021/03/09/fusion-nuclear-en-el-sol/. [Último acceso: julio 2021].
- 24. Bienes Comunes A. C. ©, «nergias como bienes comunes,» julio 2012. [En línea]. Available: http://www.energias.bienescomunes.org/2012/07/12/que-es-la-fusion-nuclear/. [Último acceso: agosto 2021].
- 25. F. Alvarez, Curso Básico de Ciencia y Tecnología Nuclear, Madrid, España: Jóvenes Nucleares Sociedad Nuclear Española, 2013.
- 26. L. AGB, «Liceo AGB,» 2021. [En línea]. Available: https://www.liceoagb.es/quimigen/nuc6. html. [Último acceso: junio 2021].
- 27. L. S. Q. P. e. al, El gas Radón en el ámbito laboral, Madrid-España: Secretaría de Salud Laboral y Medio Ambiente UGT-CEC, 2019.

- 28. Bel Muñoz , «Radiactividad natural y artificial en nuestro entorno,» Revista Ciencia, vol. 1, pp. 6-16, 2004.
- 29. QuimiNet.com, «QuimiNet.com,» 2020. [En línea]. Available: https://www.quiminet.com/articulos/la-radiacion-en-la-vida-cotidiana-3570755.htm. [Último acceso: mayo 2021].
- 30. energia-nuclear.net, « energia-nuclear.net,» 2013. [En línea]. Available: https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/atomo/isotopo. [Último acceso: julio 2021].
- 31. Ricardo Guerrero y Mercedes Berlanga, «Isótopos estables: Fundamento y aplicaciones,» Actualidad SEM, vol. 1, pp. 17-23, 2018.
- 32. Copyright © INVDES., «Invdes.com,» 2021. [En línea]. Available: https://invdes.com.mx/los-investigadores/mas-alla-de-mendeleyev-la-tabla-de-nucleidos/. [Último acceso: junio 2021].
- 33. ForoNuclear, «Foronuclear.org,» 2021. [En línea]. Available: https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-fisica-nuclear/que-son-los-radioisotopos/. [Último acceso: mayo 2021].
- 34. EBD-CSIC, «EBD-CSIC,» [En línea]. Available: http://www.ebd.csic.es/laboratorio-de-isotopos-estables. [Último acceso: julio 2021].
- 35. ehu.eus, «/www.ehu.eus,» 2021. [En línea]. Available: http://www.ehu.eus/biomoleculas/isotopos/rad.htm. [Último acceso: mayo 2021].
- 36. E. A. S.A., «www.abc.com.oy,» 2021. [En línea]. Available: https://www.abc.com.py/edicion-impresa/suplementos/escolar/la-radiactividad-633070.html. [Último acceso: junio 2021].
- 37. Sergey Korenev, «Accelerators system for production of medical isotopes 18F for PET,» Proceeding of Science, vol. 1, pp. 2-17, 2014.
- 38. ULPGC, «Universidad de Las Palmas de Gran Canaria,» 2017. [En línea]. Available: https://www.ulpgc.es/sprlyupr/que-es-radiactividad.
- 39. L. Torres, «las radiaciones en la vida cotidiana,» Universidad Nacional de Cuyo, [En línea]. Available: http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/793/1/1Las_radiaciones_en_la_vida_cotidiana_2019.pdf.
- 40. Grupo2rbrp5, «efectos de la interacción de la radiación con la materia,» [En línea]. Available: https://grupo2rbrp5.wordpress.com/2012/06/22/efectos-de-la-interaccion-de-la-radiacion-con-la-materia-4/.
- 41. Y. Ayyad, «Introducción al laboratorio de Física nuclear,» Departamento de física de partículas, [En línea]. Available: http://www.usc.es/genp/docencia/Inter_Rad_Mat_2011_Ayyad.pdf.

- 42. i. d. radiobiología, «¿cuales son las dosis de radiación?,» [En línea]. Available: https://www.radiologyinfo.org/es/info/safety-hiw_09.
- 43. E. d. l. estrellas, «sistema solar, constelaciones,» Octubre 2018. [En línea]. Available: https://misistemasolar.com/evolucion-de-las-estrellas/#Clasificacion.
- 44. G. Portillo, «Modelo atómico de Rutherford,» Meteorología en Red, [En línea]. Available: https://www.meteorologiaenred.com/modelo-atomico-de-rutherford.html.
- 45. L. o. atómicos, «Química,» 2015. [En línea]. Available: https://labquimica.wordpress. com/2015/07/07/los-orbitales-atomicos/.
- 46. E. d. E. vector, «Tema 40, investigación y ciencia,» [En línea]. Available: https://www.google.com/search?q=famosa+ecuacion+de+einstein&sxsrf=ALeKk03DQX8n-mXKtKv5921clA5zAzpK7lg:1629828135054&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwimhqP4nsryAhW_pZUCHcOYCk0Q_AUoAXoECAEQAw&biw=958&bi-h=959#imgrc=gvdGRHt75tVYHM.
- 47. C. N. d. E. A. (CNEA), «energía atómica,» Estudio, desarrollo y aplicaciones en todos los aspectos pacíficos de la energía nuclear, [En línea]. Available: http://u-238.com.ar/hoy-se-celebra-el-dia-nacional-de-la-energia-atomica/.
- 48. e. electromagnetico. [En línea]. Available: https://cdn.educ.ar/dinamico/UnidadHtml_get_49690e2a-e366-41d2-834e-593e89deae06/rni.educ.ar/campos-electromagneticos/diferencia-campos-electromagneticos-no-ionizantes-radacion-ionizante.html.
- 49. F. y. T. Ruiza, «Enciclopedia biográfica en línea,» Barcelona, España, 2004. [En línea]. Available: https://www.biografiasyvidas.com/biografia/b/becquerel.htm.
- 50. J. G. Carrizo, «Interacción de la radiación con la materia,» [En línea]. Available: https://slideplayer.es/slide/14167937/.
- 51. Radiologyinfo, «dosis de radiación, safety,» [En línea]. Available: https://www.radiologyinfo. org/es/info/safety-hiw_09.
- 52. Q. |. Q. Inorganica, «fullquimica.com,» marzo 2013. [En línea]. Available: https://www.fullquimica.com/2013/03/energia-de-enlace-energia-de-ligadura-o.html. [Último acceso: julio 2021].
- 53. u. Gonzales, «ehu.eus,» [En línea]. Available: http://www.ehu.eus/biomoleculas/isotopos/isotopos2.htm. [Último acceso: julio 2022].

- 54. «inin.gob.mx,» julio 2013. [En línea]. Available: http://www.inin.gob.mx/temasdeinteres/energianuclear.cfm. [Último acceso: agosto 2021].
- 55. L. G. y. S. Escalante, «Ariculo Elemental,» Universidad Nacional Autónoma de México, [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/317435310_ El_origen_de_los_elementos_y_los_diversos_mecanismos_de_nucleosintesis/fulltext/5b4b8fb1a6fdccadaecef93e/El-origen-de-los-elementos-y-los-diversos-mecanismos-de-nucleosintesis.pdf.
- 56. P. y. M. G. Tipler, «Descripción de las partículas elementales,» Física para la ciencia y la tecnología. [En línea].
- 57. S. Pablo, «Espectro electromagnetico,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Espectro-electromagnetico-en-toda-su-amplitud_fig3_262935182.
- 58. R. QUIMICAS, «Pablo Turmero,» [En línea]. Available: https://www.monografias.com/trabajos106/reacciones-quimicas-ii/reacciones-quimicas-ii.shtml.
- 59. D. A. N. SSSR, «Radiación de Cherenkov,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_de_Cherenkov.
- 60. U. d. i. diagnósticas, «aplicaciones de los rayos X,» [En línea]. Available: https://uidirapuato.com/rayos-x/.
- 61. D. y. m. d. l. r. ionizantes, «Foro nuclear de la industria nuclear española,» [En línea]. Available: https://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/4deteccin_y_medida_de_las radiaciones ionizantes.html.
- 62. IRNA, «Agencia de Noticias de la República Islámica,» abril 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: junio 2021].
- 63. V. E. Group, «https://www.directindustry.es/,» 2021. [En línea]. Available: https://www.directindustry.es/prod/tema-sinergie-spa/product-139211-2260904.html. [Último acceso: agosto 2021].
- 64. S. Universidad, «https://semanariouniversidad.com/,» 2020. [En línea]. Available: https://semanariouniversidad.com/universitarias/diagnostico-de-cancer-sera-mas-eficaz-con-nuevo-ciclotron-de-ucr/. [Último acceso: agosto 2020].
- 65. H. Nuclear, «http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/,» 2021. [En línea]. Available: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/betaex.html. [Último acceso: mayo 2021].

- 66. ROSATOM, State Atomic Energy corporation "ROSATOM", Joint Stock Company "State specialized Design institute", MAnual de Operación LGU-12, 2019.
- 67. A. B. d. E. Nuclear.
- 68. E. B. Inc., «https://www.alamy.es/,» enero 2013. [En línea]. Available: https://www.alamy.es/foto-reactor-de-investigacion-84972828.html?pv=1&stamp=2&imageid=7E05A59E-4302-4A29-A491-E9D69F112E3B&p=262501&n=0&orientation=0&pn=1&searchtype=0&IsFromSearch=1&srch=foo%3dbar%26st%3d-0%26pn%3d1%26ps%3d100%26sortby%3d2%26resultview%3d. [Último acceso: agosto 2021].
- 69. CIENCIAS AGRARIAS, «CIENCIAS AGRARIAS Desinfección a hortalizas,» 20 03 2012. [En línea]. Available: https://www.agenciasinc.es/Noticias/Luz-ultravioleta-para-desinfectar-hortalizas. [Último acceso: 29 09 2021].
- 70. «pharmacological-sciences,» [En línea]. Available: https://www.cell.com/trends/pharmacological-sciences/fulltext/S0165-6147(10)00097-0. [Último acceso: agosto 2021].



MINISTERIO DE EDUCACIÓN

2021 año por la Recuperación del Derecho a la Educación





https://www.aben.gob.bo/

https://www.unefco.edu.bo/