

**MINISTERIO DE EDUCACIÓN**  
**VICEMINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**  
**DIRECCIÓN GENERAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**RED NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA NUCLEAR**



# PROGRAMA NUCLEAR DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Marzo de 2012

La Paz – Bolivia

## CONTENIDO

<b>Capítulo I: Estado de Situación de actividades en Energía Nuclear</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Reseña histórica de las actividades nucleares</i>	2
1.2 <i>Instituciones académicas y de investigación</i>	5
1.3 <i>Instituciones gubernamentales</i>	14
1.4 <i>Personalidades entrevistadas</i>	18
1.5 <i>Estado de situación de instituciones especiales</i>	21
1.6 <i>Análisis y conclusiones del Estado de Situación</i>	30
<b>Capítulo II: Lineamientos para un Plan Nacional de Formación de Recursos Humanos en Energía Nuclear</b>	<b>33</b>
2.1 <i>Introducción</i>	34
2.2 <i>Justificación para la formación y capacitación de recursos humanos</i>	35
2.3 <i>Objetivo del Plan</i>	38
2.4 <i>Propuesta de niveles de formación y capacitación de recursos humanos</i>	38
2.5 <i>Implementación del Plan</i>	56
2.6 <i>Conclusiones sobre la necesidad de formación de recursos humanos</i>	58
2.7 <i>Resumen de conclusiones</i>	59
<b>Capítulo III: Instalaciones Nucleares</b>	<b>62</b>
3.1 <i>Generalidades</i>	63
3.2 <i>Antecedentes históricos de los Radioisótopos, Reactores Nucleares y Aceleradores</i>	65
3.3 <i>Tipos de Instalaciones Nucleares o Equipamiento Nuclear</i>	67
3.4 <i>La física del Reactor Nuclear</i>	69

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

3.5	<i>Tipos de Reactores Nucleares</i>	71
3.6	<i>Reactores de Investigación o Experimentales</i>	72
3.7	<i>Reactores de investigación que por su diseño y tipo de aplicaciones que pueden ser aplicados para Bolivia</i>	74
3.8	<i>Alternativa de Reactor Nuclear o Facilidad Sub-Crítica</i>	79
3.9	<i>Reactores de Investigación en América Latina</i>	80
3.10	<i>Fabricantes de Reactores de Investigación</i>	80
3.11	<i>Aplicaciones de los Reactores de Investigación o Experimentos</i>	82
3.12	<i>Costo de los Reactores de Investigación</i>	84
3.13	<i>Reactores de Investigación Relevantes para Bolivia</i>	84
3.14	<i>Criterios para posibles Emplazamientos</i>	86
3.15	<i>Reactores Nucleares de Potencia</i>	88
3.16	<i>Resumen comparativo de tipos de reactores de investigación, costos y requerimientos</i>	90
3.17	<i>Física del Ciclotrón</i>	94
3.18	<i>Utilización de los Ciclotrones</i>	96
3.19	<i>Tipos de Ciclotrones producidos comercialmente</i>	100
3.20	<i>Ciclotrones relevantes para Bolivia</i>	101
3.21	<i>Posibles programas de utilización y criterios de emplazamiento de un Ciclotrón en Bolivia</i>	102
3.22	<i>Resumen Comparativo de tipo de Ciclotrones, costos y requerimientos.</i>	104
3.23	<i>Estrategia para la implementación de instalaciones nucleares</i>	122
3.24	<i>Planta de Irradiación</i>	124

<b>Capítulo IV: Lineamientos para el Programa Nuclear Boliviano</b>	<b>134</b>
4.1 <i>Introducción</i>	135
4.2 <i>Lineamientos básicos del Programa Nuclear Boliviano</i>	137
4.3 <i>Programas y Proyectos del Plan de Ciencia y Tecnología Nuclear</i>	140
4.4 <i>Relacionamiento y Cooperación Internacional</i>	142
4.5 <i>Conclusiones</i>	145
<b>Capítulo V: Aplicaciones Energéticas de la Energía Nuclear y Perspectivas en Bolivia</b>	<b>147</b>
5.1 <i>Introducción</i>	148
5.2 <i>Recursos Electro-Energéticos de Bolivia</i>	149
5.3 <i>El Potencial de Gas Natural</i>	149
5.4 <i>El Potencial Hidroeléctrico</i>	151
5.5 <i>El Potencial Solar</i>	154
5.6 <i>El Potencial Eólico</i>	155
5.7 <i>El Potencial Geotérmico</i>	156
5.8 <i>Comentarios – Perspectivas Nucleares y Nucleoeléctricas en Bolivia</i>	159
<b>Capítulo VI : Propuesta de Mecanismos de Implementación</b>	<b>163</b>
6.1 <i>Introducción</i>	164

## ANEXOS

- 1 *Lista de miembros de la Red Nacional de Investigación en Energía Nuclear*

## **Capítulo I**

# **Estado de Situación de actividades en Energía Nuclear**

## 1.1. Reseña histórica de las actividades nucleares

La situación actual está dirigida a las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear en los ámbitos energéticos y no energéticos, incluyendo una revisión y análisis de los roles, funciones y competencias de las estructuras existente en el país, disponibilidad de recursos humanos, enseñanza universitaria, instalaciones y laboratorios; como así también aspectos institucionales, regulatorios y la Ley de Seguridad y Protección Radiológica.

Las actividades en el ámbito nuclear en Bolivia se remontan hacia los comienzos de los años 60 del anterior siglo con la creación de la Comisión Boliviana de Energía Nuclear, COBOEN, creación que a su vez fue impulsada por las actividades de investigación que se desarrollaban en el Instituto de Física Cósmica de la UMSA.

La COBOEN fue creada por Decreto Supremo D.S. No. 5389 de 14 de enero de 1960 y cuya misión principal fue la de promover, dirigir, implementar y difundir el uso pacífico de la tecnología nuclear en el país. Al comienzo, muchas de las actividades nucleares se iniciaron o fueron promovidas por la necesidad de medir y monitorear las radiaciones provenientes de las pruebas nucleares que Francia y otros países, que se estaban haciendo por aquellos años en el Pacífico.

Otro hito histórico de gran importancia en el país también en los años 60, fueron las actividades en torno al uso de isótopos radioactivos, o también llamados radioisótopos, en la medicina, muy en particular, el empleo del Fósforo-32 y el Iodo-131, dos radioisótopos de extrema utilidad y muy utilizado ya por más de 70 años en todo el mundo para tratar un desorden sanguíneo como la policitemia-vera y estudiar desórdenes de la glándula tiroides respectivamente. Es interesante señalar que con el uso del iodo radioactivo, muchos países, incluido Bolivia, dieron inicio al uso de la energía nuclear con fines pacíficos, en este caso particular, al inicio de la especialidad que hoy conocemos como medicina nuclear.

Estas actividades de utilización de radioisótopos en la medicina fueron apoyadas en buena medida por la cooperación de Argentina y Brasil que culminó con la fundación del Instituto de Medicina Nuclear en el año 1963 dependiente de la recientemente creada

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

COBOEN, con lo que se impulsó de manera significativa las actividades de la utilización pacífica de la energía nuclear en el país.

Las actividades de la COBOEN abarcaron varios ámbitos de la actividad nuclear incluyendo la organización de estructuras regulatorias relativas al uso de las radiaciones ionizantes y de los radioisótopos, como o así también la formación de recursos humanos con la cooperación internacional, tanto de países vecinos como Argentina y Brasil, además de Francia, Estados Unidos y del Organismo Internacional de Energía Atómica.

En el año 1967, la COBOEN en representación de Bolivia es reconocida oficialmente como miembro de la OIEA y en el año 1969 Bolivia se incorpora como estado miembro de La Comisión Interamericana de Energía Nuclear (CIEN) organismo especializado de la Organización de Estados Americanos (OEA).

En el año 1977 se inaugura el Centro de Investigaciones Nucleares (CIN) de COBOEN en la vecina localidad de Viacha constituida por las divisiones de física nuclear, radioquímica y aplicaciones de radioisótopos, el mismo que a partir del 2010, empieza a denominarse Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares (CIAN).

Entre las actividades más sobresalientes de la COBOEN se pueden señalar la búsqueda de minerales de uranio en el territorio nacional que se desarrolló a los comienzos del año 1974 y que culminó con la operación de una planta piloto en Cotaje de producción de la 'torta amarilla' (yellow cake) en 1977, llegándose a producir algunos kilogramos de este material durante los siguientes 5 a 6 años que duró esta operación que se la denominó piloto. La prospección y exploración de minerales radioactivos continuó muy activa y con fuerte soporte estatal hasta que estos programas pasaron a GEOBOL como consecuencia de la cesación de COBOEN y la creación del IBTEN.

Bajo la dirección del Departamento de Materias Primas de la COBOEN, una buena parte del territorio nacional en la zona andina fue explorado llegando a identificar varias decenas de 'ocurrencias' radioactivas, 51 en total según los datos proporcionados por el SERGEOTECMIN. También durante este periodo se firmaron contratos de exploración de uranio con empresas extranjeras como la italiana AGIP y la francesa COGEMA:

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

También en los años 70, el Departamento de Ingeniería Nuclear de la COBOEN llegó a plantear la instalación de un reactor nuclear de investigaciones para su utilización en la producción de radioisótopos para la medicina, industria y agricultura, como también para aplicaciones analíticas y la formación de recursos humanos. Esta iniciativa no prosperó por no contarse con los recursos necesarios, a pesar que la Dirección Ejecutiva de aquella época decidió asignar los terrenos del Centro Nuclear de Viacha para este fin.

Ley de Seguridad y Protección Radiológica fue aprobada mediante Decreto Ley No 19172 de septiembre de 1982 y el Decreto Supremo No. 24483 del 29 de enero de 1997 aprueba la reglamentación de esta ley y reconoce al IBTEN como la Autoridad Nacional Competente encargada de hacer cumplir la Ley de Seguridad y Protección Radiológica y su respectiva Reglamentación. Estas funciones son ampliadas mediante Decreto Supremo No. 28544 del 22 de diciembre de 2005 de la siguiente manera: "El IBTEN se constituye en el brazo técnico de la Autoridad Ambiental Competente y/u otras instancias nacionales, departamentales y/o Gobiernos Municipales"

Otro aspecto sobresaliente es que se dio fuerte impulso a la formación de recursos humanos mediante becas que se consiguieron a través de convenios de cooperación con países amigos como Argentina, Brasil, Francia, Italia y el Organismo Internacional de Energía Atómica.

En el año 1983, la COBOEN es reemplazada por el Instituto Boliviano de Ciencias y Tecnología Nuclear mediante el Decreto Supremo 19583 del 3 de junio de 1983, como la institución científico técnica descentralizada con personería jurídica, patrimonio propio, autonomía administrativa y financiera dependiente de la Presidencia de la República.

El Estatuto Orgánico del IBTEN es aprobado mediante Resolución Suprema del 7 de mayo de 1992. En esta resolución se decide que la supervisión de las actividades del IBTEN será ejercida por Ministerio de la Presidencia.

Sin embargo, mediante otro Decreto Supremo No. 24206 del 29 de diciembre de 1995, se dispone que pase a depender del Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. El Estatuto Orgánico del IBTEN es aprobado mediante Resolución Suprema del 7 de mayo de 1992.

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

Mediante el Decreto Supremo No. 0429 del 10 de febrero de 2010, el IBTEN pasa a ser parte del Vice Ministerio de Ciencia y Tecnología del Ministerio de Educación, dependencia que se rige hasta el presente.

Para la recopilación y análisis de la información se han diseñado encuestas para cada tipo de institución a visitar y entrevistar, con el fin de tomar conocimiento de la situación de las actividades, programas o proyectos en el ámbito nuclear que pudieron haber tenido o tener al presente, o bien sobre posibles planes futuros, a la vez de recabar opiniones y pareceres. Estas preguntas sirvieron sobre todo, como una referencia que enmarcó la discusión y la colección de información de las entidades visitadas y entrevistadas.

A continuación presentamos los resultados de las entrevistas a investigadores y autoridades de entidades e instituciones vinculadas a la Energía Nuclear y sus Aplicaciones.

## **1.2. Instituciones Académicas y de Investigación**

**Universidad Mayor de San Andrés, UMSA, La Paz, Bolivia**

***Facultad de Ciencias Puras y Naturales:***

***Carrera de Ciencias Físicas***

**Personas asistentes:** Dr. Willy Tavera, Director de la Carrera de Física, Dr. Miguel Peñafiel, Director del Instituto de Investigaciones Físicas y otros 30 asistentes entre docentes y alumnos.

**Documentación recogida:** Plan de Estudios 2010 de la Carrera de Física

### **Resultados:**

- Es necesario la formulación de un Plan Nacional de Formación de Recursos Humanos, siempre y cuando el Gobierno formule, apruebe y adopte un Programa Nuclear con alcances de corto, mediano y largo plazo. Si no existiera un Programa Nuclear, no se ve la necesidad ni la justificación de formar profesionales con

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

especialidad en temas nucleares, porque simplemente no habría el mercado profesional correspondiente.

- Dentro de políticas expresas y concretas del Gobierno puestas en evidencia mediante un Programa Nuclear Boliviano, la Carrera de Física estaría en condiciones de ampliar la cobertura de la enseñanza de la Física Nuclear. En la actualidad, se dictan las materias de Física Nuclear I ( FIS 503) y II (FIS 603) que tienen una modesta parte experimental ( Laboratorio Avanzado FIS 372), la que será necesario reforzarla con nuevo equipo.
- Existen solo 4 profesionales docentes con formación en Física Nuclear. Sin embargo, para cursos más avanzados será necesario la contribución de otros profesionales y/o de la formación avanzada de los ya existentes.
- La Carrera de Física ya tiene aprobadas oficialmente varias asignaturas que se relacionan con la energía nuclear, las que hasta la fecha no son dictadas por la escasa disponibilidad de docentes. Entre las materias electivas, se puede mencionar el Módulo de Concentración en Física Médica, dentro del cual figuran las siguientes materias: Física de Radiaciones y Dosimetría, Seguridad y Protección Radiológica, Física de la Radiobiología, Física de la Radioterapia y Medicina Nuclear.
- Los participantes manifestaron su gran interés y ven como de mayor importancia, que el Gobierno estudie seriamente la implementación de alguna instalación nuclear, como lo podría ser una reactor de investigación o un ciclotrón. Además de contribuir a la sostenibilidad en la formación académica de recursos humanos, estas instalaciones nucleares contribuirán definitivamente a la investigación en el ámbito nuclear y a la prestación de servicios a la medicina, industria y otras actividades económicas.

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

## ***Carrera de Ciencias Químicas***

**Personas asistentes:** Lic. Germán Llanos Rojas, Director y otros 10 personas entre docentes y alumnos

### **Resultados:**

- La mayoría de los participantes señalaron que el Programa Nuclear debe ser articulado, dando énfasis en las aplicaciones pacíficas como ser en la medicina, industria, etc., y con menor énfasis en el corto plazo, en las aplicaciones energéticas, puesto que las aplicaciones energéticas tendrían que ser para un futuro largo.
- Es evidente que no se imparte enseñanza en temas nucleares y que tampoco existe ninguna instrumentación nuclear en los laboratorios de química, aunque en algunas materias, como las de química inorgánica, se dan de manera elemental, algunos conceptos de radioquímica y aplicaciones de radioisótopos como temas libres.
- En un futuro inmediato es necesario contemplar la introducción de temas nucleares en la currícula de las carreras de Física y Química.
- Mejorar la coordinación entre gobierno y universidad, y que en otros proyectos de envergadura nacional, como es el Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología.
- En cuanto a la idea de proponer el establecimiento de instalaciones nucleares, la mayoría estuvieron de acuerdo, sin embargo identificaron como una limitante, el costo de implementación y operación de las mismas.
- Finalmente, se opina que el Estado debe demostrar la necesidad de la formación universitaria a niveles superiores creando un mercado profesional mediante la implementación efectiva y con recursos económicos suficientes y adecuados de un Programa Nuclear Boliviano, y que solo sobre esta base, las Universidades podrían llenar este vacío.

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

## Facultad de Ciencias Geológicas

### *Decanato de la Facultad*

**Personas Asistentes:** Ing. Germán W. Núñez Aramayo

**Documentación Recogida:** Malla curricular de la carrera de Ingeniería Geológica

### **Resultados:**

- Es fundamental que los países conozcan sus recursos minerales a través de programas de prospección y exploración, como lo hacen numerosos países a través de sus servicios geológicos. En lo que respecta a los minerales radioactivos, a pesar de que en la época de COBOEN se hicieron muchos y numerosos estudios, quedan aún extensas áreas dentro de nuestro territorio que necesitan ser explorados. Esta será una importante tarea a completarse con el apoyo del Gobierno y que debe tomar conciencia en que proyectos de prospección y exploración son proyectos de largo alcance que necesitan recursos financieros de consideración de una manera continuada y sostenida.
- La carrera de Ingeniería Geológica apoya al presente dos proyectos relativamente pequeños de prospección y exploración de minerales de uranio, uno en Cotaje en el Departamento de Oruro en una extensión de 40 km<sup>2</sup> con el patrocinio de la Gobernación del Departamento, y otro en Refará en el Departamento de Tarija en una extensión de alrededor de 1000Km<sup>2</sup>, este último mediante un trabajo de tesis.
- En la carrera no se imparte enseñanza en temas nucleares por falta de interés de los estudiantes y por falta de docentes con la formación correspondiente. Sin embargo, ante un escenario en el que el Gobierno impulse nuevamente las actividades nucleares en el país, la carrera de Ciencias Geológicas estaría en condiciones, en un plazo adecuado, de establecer programas de enseñanza apropiados.
- Según la malla curricular de la carrera de Ingeniería Geológica, en las asignaturas que ya se imparten de Química Inorgánica, Geofísica y Prospección Geofísica se podría introducir conceptos de energía nuclear y temas como datación radiométrica y otros temas de interés para los geólogos.

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

## Facultad de Ingeniería

### *Carreras de Ingeniería Química, Industrial y Electrónica, Mecánica*

**Personas Entrevistadas mediante encuesta:** Ing. Mario Salinas Perez- Director a.i , Ing. Roberto Parra Zeballos- Docente Investigador

**Lugar y Fecha:** Oficinas empresa Consultora, 24 octubre 2011.

## Resultados:

- El Programa Nuclear Boliviano contribuirá a estructurar el sistema de investigación, desarrollo, e innovación en el ámbito universitario con la activa participación de las instituciones del Estado, Universidades y Centros de Investigación.
- En la carrera de Ingeniería no existe asignaturas estrictamente relacionada a la energía nuclear, sin embargo se ha identificado asignaturas que incorporan conceptos básicos de energía nuclear.
- El rol de la Universidad podría consistir en iniciar diplomados y grados académicos más avanzados en el ámbito nuclear. Al igual que el resultado de otras entrevistas la iniciación de planes de formación de recursos humanos en el ámbito nuclear tiene que ser incentivado desde el Estado asignando alta prioridad en sus planes estratégicos.

## Facultad de Medicina

### *Carrera de Tecnología Médica*

**Personas Asistentes:** Dr. Roberto Dalenz, ex director de la Carrera y actual Director del Programa Médico Estudiantil (PROMES) del Seguro Social Universitario.

El Dr. Roberto Dalenz es Médico Nuclear egresado de la Universidad de la República del Uruguay y tiene amplia experiencia en su especialidad y como Director de la Carrera de Tecnología Médica, impulsó la enseñanza universitaria de temas nucleares relacionados con la medicina y la biología.

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

## Resultados:

- Durante los últimos años se puso en evidencia a nivel nacional que para impulsar y orientar las aplicaciones de los radioisótopos y radiaciones en el país hace falta una política nacional de apoyo, por lo que la formulación e implementación efectiva del Programa Nuclear es necesario y oportuno.
- La enseñanza de temas nucleares en el ámbito universitario de las carreras del área biomédica no fue prioridad, a pesar de los ya demostrados beneficios y aplicaciones en la medicina. El Dr. Dalenz estima que se hace necesario retomar la enseñanza de materias relacionadas con la energía nuclear en todas las carreras del área de la salud.
- Es de prioridad e importancia que el gobierno considere la implementación de un ciclotrón para la producción de radioisótopos de vida media corta que permita la instalación de sistemas PET-CT.
- Aunque solo existen 4 centros de medicina nuclear públicos y dos privados en el país, se debe promover que la universidad considere la adopción de la especialidad de medicina nuclear como grado de especialización. Los pocos profesionales con especialidad en medicina nuclear que hay en el país fueron formados en centros del exterior.
- La universidad está considerando la posibilidad de incluir un servicio de la especialidad en un futuro hospital que forme parte de su infraestructura de formación académica. Esta es una excelente oportunidad para considerar la inclusión de la técnica PET-CT.

## **Escuela Militar de Ingeniería, EMI, La Paz, Bolivia**

### **Personas Asistentes:**

Cnel. DEAN Franz Novillo Torrico, Vice Rector, Postgrado

Cnel. Marco Barroso, Director

Cnel. DEAN Alfredo Marquina Lozada

Cnel. DEAN, Ilin Flores Corrales

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

**Fecha Y Lugar:** 11 octubre 2011, Sede Central, Av. Arce,

**Resultados:**

- Se debe realizar los esfuerzos necesarios para la formulación y aprobación de un Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología que apoye las políticas de desarrollo nacional y muy en particular las estrategias de posicionamiento de la energía nuclear en el contexto nacional.
- Se considera muy necesario la formación de recursos humanos en los que la EMI podría tener un rol muy importante; por un lado, la formación nuclear de personal militar, y por otro, de los estudiantes civiles de las carreras de ingeniería. Aunque se considera más importante por el momento a los oficiales de las fuerzas armadas.
- En la actualidad no se enseñan temas nucleares en ninguna de las materias que se imparten en la EMI. Sin embargo, si hay planes del gobierno, la institución estaría en condiciones de impartir enseñanza y formación en temas nucleares. Se debe tener en cuenta que no hay recursos a nivel de docentes, por lo que se debe considerar esta situación a la hora de programar seminarios, conferencias, cursos, etc.
- Se considera importante la implementación de instalaciones nucleares para facilitar la formación de recursos humanos.
- El programa nuclear debe considerar la necesidad de conocer el potencial de minerales de uranio del país mediante programas o proyectos de prospección y exploración.

**Universidad Católica de Bolivia UCB, La Paz, Bolivia**

**Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería**

**Personas Asistentes:** Dr. Ronalth Zavaleta y Lic. Javier Aliaga Lordeman, Director Instituto de Investigaciones Socio-Económicas

**Lugar y Fecha:** Sede Central, Av. 14 de septiembre

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

## Resultados:

- Se considera importante que las actividades nucleares puedan estar enmarcadas dentro de un Programa Nuclear, el mismo que debe considerar como línea central estratégica, los aspectos de generación de electricidad para apoyar la matriz energética del país en el futuro.
- Impulsar y fortalecer la formación de profesionales en la programación y planificación energética que incluya la energía nuclear como opción en la matriz energética del futuro.
- La UCB está programando la iniciación de un programa de maestría en planificación energética y matriz energética, y que dentro de esta especialidad, se podría considerar la inclusión de aspectos especiales de la energía nuclear.

## Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia

### *Facultad de Ciencia y Tecnología*

#### **Carrera de Física**

**Personas asistentes:** Marcelo Lucano, Director de la Carrera y Dr. José Roberto Soto, Director de la Carrera de Química y otros 12 participantes entre docentes y alumnos.

**Documentación Recogida:** Malla Curricular de la Carrera de Licenciatura en Física

## Resultados:

- En la Carrera de Física se imparte la materia Introducción a la Física Nuclear y Partículas, que es una asignatura semestral obligatoria y es parte de la malla curricular en la Carrera. En promedio se tienen 3 estudiantes por semestre.
- La razón que se da a esta baja participación e interés, es que falta mayor difusión e información a los estudiantes de las carreras de ingeniería y ciencias. Se estima que con mayor difusión, este número puede aumentar considerablemente.
- La opinión general es que es un momento muy adecuado y oportuno de discutir y finalmente establecer un Programa Nuclear capaz de orientar y guiar las acciones

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

nucleares del futuro, sobre todo que impulse las aplicaciones no energéticas de la energía nuclear y que vaya acompañada de un plan de formación de recursos humanos de alto nivel.

- Las carreras de ciencias de la UMSS estarían en principio muy dispuestas a considerar la expansión de las actividades docentes en el ámbito nuclear
- Se apoya la idea de que la formación de recursos humanos, el Estado debe establecer e implementar en el futuro instalaciones nucleares, como un reactor nuclear de investigación e inclusive un ciclotrón y/o una planta de irradiación de alimentos.

### **Universidad Autónoma Tomás Frías, Potosí, Bolivia**

#### ***Carrera de Física***

**Personas asistentes:** El Lic. Raúl Mamani, Docente de la Carrera de Física

**Documentación Recogida:** Contenido curricular de la materia Física Nuclear (FIS 382)

#### **Resultados**

- Existe una necesidad evidente de promover, orientar y apoyar las actividades nucleares en el país en sus aspectos de utilización de los radioisótopos y radiaciones y que vaya acompañados con la formación de recursos humanos en varios niveles universitarios y no universitarios.
- En la Carrera de Física se dicta una asignatura: Introducción a la Física Nuclear a nivel del 8avo semestre con duración de un semestre. Por semestre solo son en promedio unos 5 estudiantes que toman esta materia. La razón es aparente falta de interés por parte de los estudiantes es que no existe actividades de promoción y de divulgación en temas nucleares en la universidad.
- La UATF y en particular la Carrera de Física estaría en posición de iniciar actividades de promoción y divulgación como lo sería la organización seminarios y cursos cortos, siempre y cuando se cuente con el apoyo del Viceministerio de Ciencia y Tecnología y del IBTEN.

## 1.3. Instituciones Gubernamentales

### **Vice Ministerio de Ciencia y Tecnología**

**Instituto Boliviano de Tecnología Nuclear, IBTEN, La Paz, Bolivia**

**Personas Asistentes: Ing. Luis Romero, Director Ejecutivo**

Documentación Recogida: Memoria Anual 1977, COBOEN, La Paz, Bolivia

Actualidad Informativa, COBOEN, 1981, La Paz, Bolivia

### **Resultados:**

- Se afirma que para dar impulso y vigor a las actividades en el ámbito de las aplicaciones de la energía nuclear, y que posicione al país para enfrentar los retos tecnológicos de este siglo XXI, es fundamental que se establezca un programa nuclear nacional. Este Programa Nuclear debe abarcar necesariamente las aplicaciones energéticas en el largo plazo, y más inmediatamente, las aplicaciones en la medicina, industria, medioambiente, hidrología, etc.
- El Estado debe apoyar decididamente la formación de recursos humanos de una manera programada, organizada y sostenida, recurriendo a las universidades del sistema nacional de universidades y, poniendo a disposición profesionales y laboratorios especializados el IBTEN participará activamente en la formación de recursos humanos. Por otra parte, el IBTEN se vería altamente beneficiado con la capacitación de sus propios profesionales.
- La instalación de un reactor nuclear de investigación o un ciclotrón, es altamente deseable toda vez que estas instalaciones contribuirán a la formación de recursos humanos de alta calificación, promoción de la investigación y a proveer servicios a la comunidad.
- El Estado debe promover la firma de convenios con países vecinos en la formación de recursos humanos y establecer programas conjuntos de investigación. En el pasado, la cooperación de Argentina y Brasil fue importante para apoyar a la COBOEN y al IBTEN.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- En la actualidad a través de un convenio, profesionales de de la Universidad Mayor Tomas Frías de Potosí, realizan prácticas en los laboratorios del CIAN-Viacha. Este tipo de actividades puede servir de modelo para que otras universidades del país se beneficien de las instalaciones del IBTEN y se pueda contribuir eficientemente a la formación de recursos humanos a nivel nacional.

### **Ministerio de Ciencia y Tecnología**

#### **Instituto Boliviano de Tecnología Nuclear, IBTEN, La Paz, Bolivia**

#### ***Centro de Investigaciones Nucleares, CIAN, Viacha***

**Personas asistentes:** Ing. Luis Romero, Director Ejecutivo del IBTEN e Ing. José Honingblum, Director CIAN-Viacha y otros 11 profesionales

**Fecha y Lugar:** CIAN, Viacha, 7 de octubre 2011.

En una presentación en las instalaciones del CIAN-Viacha, se explicó en detalle los alcances de la consultoría la que generó muchas preguntas relacionadas con la tecnología y aplicaciones de algunos tipos de instalaciones nucleares, en especial de reactores de investigación y de reactores de potencia.

### **Resultados:**

- Es necesario y oportuno la formulación de un Programa Nuclear Boliviano que reactive y oriente el futuro de la energía nuclear en el país y que, paralelamente vaya en acompañado con la implementación de instalaciones nucleares como lo podría ser un reactor experimental con posibilidades de aplicaciones prácticas, un acelerador de partículas como lo sería un ciclotrón para aplicaciones médicas, o bien, una planta de irradiación de alimentos.
- Se ve la necesidad urgente de reforzar el plantel de profesionales del Centro para ejecutar proyectos que se piensa implementar en el próximo futuro, puesto que en la actualidad el CIAN –Viacha está muy debilitado en recursos humanos especializados.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- La idea de formular un plan nacional de formación de recursos humanos que propone el VCyT a nivel nacional, se la considera como muy acertada y oportuna; la misma que debe tener en cuenta el potencial que tiene el IBTEN y el CIAN en lo que se refiere a su rol institucional y su capacidad de laboratorios.
- Es necesario que se realice un diagnóstico del estado de operatividad del Generador de Neutrones, que contemple su estado técnico y el costo que llevaría ponerlo en funcionamiento, y que se discuta si vale la pena realizar este esfuerzo dentro una perspectiva de su utilización. Se puede solicitar la cooperación del OIEA para apoyar la visita de un experto que realice el diagnóstico correspondiente, o en su defecto, a través de convenios, posiblemente expertos de Argentina o Cuba puedan contribuir a este diagnóstico del generador de neutrones.

### **Gobernación del Departamento de La Paz**

#### ***Instituto Nacional de Medicina Nuclear (INAMEN)***

**Personas asistentes:** Dra. Karina Miranda, Directora

#### **Resultados:**

- Se considera fundamental contar con programa nuclear que oriente y guie el desarrollo nuclear en todas sus aplicaciones, muy en particular, en la medicina nuclear. Esto permitirá lograr un mayor apoyo político y financiero, a la vez que coordinaría las actividades en toda el área nuclear.
- Si bien la medicina nuclear es una actividad que ya lleva más de 50 años de aplicación en el país, la Dra. Miranda piensa que su desarrollo debe tomar en cuenta los avances contemporáneos de la disciplina. Se necesita un cambio de visión para la especialidad ya que se hace menos de lo que se podría y debería hacer y que se incorporen nuevos actores en las diferentes regiones del país.
- La formación de profesionales médicos en medicina nuclear no es parte de ningún plan estructurado o institucional, sino que depende de iniciativas individuales. Los

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

pocos profesionales especialistas en medicina nuclear en el país, se formaron en el extranjero. La universidad tampoco imparte enseñanza formal en este campo, ni siquiera los jóvenes estudiantes de medicina reciben información sobre las aplicaciones de la energía nuclear, de tal suerte, que cuando llegan al INAMEN en sus pasantías o en busca de un puesto de trabajo, recién es cuando se enteran que existe una disciplina llamada medicina nuclear. También ocurre que la falta de normativa respecto a las condiciones mínimas requeridas para los servicios de medicina nuclear hace que esta se realice con improvisación y se desestime la formación de profesionales especializados.

- La Dra. Miranda es enfática al señalar que, aunque la función principal del INAMEN es naturalmente la asistencia, tampoco se incentiva y se dan las condiciones para que se realicen trabajos de investigación, con el resultado que muy pocos fueron los trabajos científicos originales que se desarrollaron en el pasado.
- Considerando que existen 6 centros de medicina nuclear en el país y el total de la población boliviana que sobrepasa los 10 millones de habitantes, al presente se está gestionando ante las autoridades universitarias la especialidad en Medicina Nuclear que puedan cubrir las necesidades y deficiencias de recursos humanos a nivel nacional en los próximos años, así como programar la realización de cursos introductorios en este campo para alumnos regulares de pregrado.
- Las instalaciones del INAMEN en cámaras gama es deficiente para cubrir la gran demanda de servicios que exige la población del Departamento de La Paz y del país todo. En particular, es sentida la carencia de una cámara adicional SECT-CT. También se tiene deficiencia en el soporte técnico para el equipamiento por la falta de formación de los recursos humanos.
- Finalmente, el INAMEN considera de vital importancia y urgencia, el establecimiento de la moderna modalidad de imagen llamada Tomografía por Emisión de Positrones (PET) para lo cual, se hace necesaria la instalación de un ciclotrón y de una cámara PET-CT. que podrían constituirse en parte de un proyecto de desarrollo y expansión de los servicios e instalaciones del INAMEN.

## Ministerio de Energía y Minas

### *Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas, SERGEOTECMIN*

**Personas Asistentes:** Ing. Hugo Delgado Burgos

#### **Resultados:**

- Al igual que se piensa en la Facultad de Ciencias Geológicas, el *SERGEOTECMIN* opina que existe la necesidad imperiosa que realizar una valoración de los recursos en minerales radioactivos en el país.
- Fortalecer la Unidad o Dirección del Ministerio en lo referente a la prospección y exploración de minerales radioactivos a pesar de que geológicamente hablando, el territorio nacional ofrece muy buenas perspectivas en muchas zonas del país, especialmente en el llamado Escudo Brasileiro en la parte oriental del país.
- Se cuenta con equipo básico para determinar anomalías u ocurrencias radiactivas consistentes en un centellómetro gama, cosa que se está haciendo en dos proyectos, uno en Potosí y otro en Tarija. Se reconoce que estos son recursos modestos y que no son suficientes para encarar proyectos a nivel nacional.
- Por último, también se opina que para orientar y apoyar las actividades nucleares de una manera consistente y organizada es necesario un marco legal, como lo sería un Programa Nuclear.

#### **1.4. Personalidades entrevistadas**

##### ***Juan Carlos Méndez***

El Ing. Juan Carlos Méndez es ingeniero industrial y con larga experiencia en temas nucleares como antiguo funcionario de la COBOEN, manejando temas de aplicaciones de la energía nuclear en campos tales como la industria.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- El Ing. Méndez es de la opinión que es necesario la formulación de un programa nuclear que entre otras cosas, permita reactivar las actividades nucleares en el país dándoles una dimensión acorde con las necesidades del siglo XXI.
- Opina que las líneas estratégicas de un programa nuclear deben estar centradas en aprovechar la energía nuclear para combatir el cambio climático, contribuir a la seguridad alimentaria y la búsqueda y manejo de los recursos hídricos. El ve como fundamental la contribución de la energía nuclear para la solución de estos temas.
- Para el caso concreto de Bolivia, se deben hacer esfuerzos para conocer y evaluar el potencial nacional de recursos radioactivos.
- También apoya explorar mediante estudios serios y realistas la relevancia y conveniencia de implantar instalaciones nucleares. Al respecto, una planta multipropósito de irradiación, muy particularmente diseñada para la irradiación de alimentos es muy pertinente para el caso boliviano, puesto que la crisis de la seguridad alimentaria es un aspecto que se lo debe tener en cuenta muy seriamente.

### ***Ing. Willy Vargas***

El Ing. Vargas es un especialista en Metalurgia Nuclear con experiencia en hidrometalurgia de minerales de uranio. Como tal, trabajó en la antigua COBOEN y fue el responsable de la producción de la 'torta amarilla o Yellow Cake' a finales de la década del los 70 y a comienzos de la década del los 80 del siglo anterior en la mina de Cotaje.

- El Ing. Vargas opina que se deben reactivar las actividades nucleares en el país en varios de sus aspectos y que un Programa Nuclear Boliviano, sería el mejor camino de hacerlo efectivo.
- También opina que es esencial la formación de recursos humanos en la que la participación de las universidades, sin descuidar, el recurrir a la cooperación internacional de países vecinos, como se lo practicó en la época de la COBOEN.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- Finalmente, el Ing. Vargas opina que se debe realizar un relevamiento de los recursos radioactivos en todo el territorio nacional, sobre todo en las zonas del Precámbrico donde el potencial es mayor. En este aspecto, la existencia de un Programa Nuclear no solo facilitaría en grado mayor las actividades tendientes a una evaluación del potencial uranífero del país, sino también a la formación de recursos humanos en esta especialidad, recursos que existían en alto nivel en la época de COBOEN, y que lamentablemente, en los últimos 20 años se fueron dispersando y perdiendo.

### ***Dr. Luis F. Barragán***

El Dr. Barragán es un pionero en aplicaciones de los radioisótopos en la medicina, sino que también, fue impulsor de las actividades de la COBOEN. Fue primeramente director y fundador del Centro de Medicina Nuclear creada en el año 1963 y luego del Instituto Nacional de Medicina Nuclear (INAMEN) hasta el 2010, fecha que en la que dejó la institución.

- El Dr. Barragán apoya la iniciativa delinear un Programa Nuclear para estructurar, guiar y orientar las actividades nucleares del país en el siglo XXI, este programa tiene que ser amplio y visionario, que dé nuevos y fuertes impulsos a las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear en general, y a las aplicaciones en medicina en particular.
- Por otra parte, considera que la formación de recursos humanos es imprescindible para sustentar cualquier programa nuclear. La universidad tiene que tomar un rol más activo para responder a las necesidades de profesionales de alta especialización, como lo sería la enseñanza de la física médica y la misma medicina nuclear.
- También opina que hace falta mayores recursos para afianzar la medicina nuclear en el país, modernizarla de tal suerte que pueda estar a la altura de otros centros de la región, particularmente con la implantación de la moderna técnica de imagen, la Tomografía por Emisión de Positrones ( PET).

### 1.5. Estado de Situación de instituciones especiales

#### *Instituto Nacional de Medicina Nuclear (INAMEN)*

El desarrollo de la medicina nuclear en el país ha ido desde la llegada y aplicación de los primeros detectores nucleares en medicina, a principios de la década de los 60, hasta la conformación de una red nacional de centros de medicina nuclear que hoy abarca a cuatro departamentos del país.

Los primeros años de desarrollo de la medicina nuclear boliviana se concentran en la creación, consolidación y crecimiento de una institución pionera que el día de hoy se conoce como el Instituto Nacional de Medicina Nuclear (INAMEN) y que tiene sede en la ciudad de La Paz. Esta entidad se inició como un pequeño laboratorio donde se instalaron los primeros equipos nucleares, para irse desarrollando hasta convertirse en un Instituto que forma parte de la red de tercer nivel de servicios públicos de salud. Con base en el se desarrolló la red nacional de medicina nuclear.

Entre 1966 y 1992 se crean los centros de medicina nuclear de Sucre, Cochabamba, Santa Cruz y Tarija en los principales hospitales públicos de cada ciudad. En principio los centros se dotaron de equipamiento nuclear básico para las primeras aplicaciones de la medicina nuclear, posteriormente se dotaron de cámaras gamma planares y a partir de 1992 se procedió a la instalación de equipos SPECT en todas estas ciudades con el apoyo de uno de los primeros proyectos nacionales del OIEA.

La red nacional de Centros de Medicina Nuclear es uno de los resultados del desarrollo de la especialidad en Bolivia, hoy en día abarca a cuatro departamentos, aunque en sus inicios incluyó también a Tarija hasta que ese servicio dejó de operar.

En las entidades que forman parte de esta red se realizan más de cuarenta diferentes tipos de estudios que se relacionan con casi todas las especialidades médicas. Cabe destacar que se ha estimado que un 80% de los estudios de medicina nuclear que se realizan en el país se relacionan con diferentes tipos de cáncer y sus secuelas. De los estudios realizados, la mayor parte corresponde a estudios del sistema óseo, de los riñones, de toroides y de cardiología.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

La red nacional se resume en el siguiente cuadro:

Departamento	Nombre del Servicio	Equipamiento	Personal técnico	Servicios que brinda
La Paz	Instituto Nacional de Medicina Nuclear	- 2 SPECT - 2 Cámaras Gamma Planares	18 profesionales	- Imagen diagnóstica - Dosis terapéutica - Radioinmunoanálisis
	Centro de Imagen Molecular	- 1 SPECT	5 profesionales	- Imagen diagnóstica - Dosis terapéutica
Sucre	Instituto de Medicina Nuclear Sucre – Hospital Santa Bárbara	- 1 SPECT - 1 Cámara Gamma Planar	8 profesionales	- Imagen diagnóstica - Dosis terapéutica - Radioinmunoanálisis
Cochabamba	Centro de Medicina Nuclear – Hospital Viedma	- 1 SPECT - 1 Cámara Gamma Planar	7 profesionales	- Imagen diagnóstica - Dosis terapéutica - Radioinmunoanálisis
Santa Cruz	Centro de Medicina Nuclear – Hospital San Juan de Dios	- 1 SPECT - 1 Cámara Gamma Planar	6 profesionales	- Imagen diagnóstica - Densitometría osea
	Servicio Gamma Cámara – Caja Petrolera de Salud	- 1 SPECT	3 profesionales	- Imagen diagnóstica

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

	Clínica Nuclear	- 1 SPECT	3 profesionales	- Imagen diagnóstica - Dosis terapéutica
<b>TOTAL NACIONAL</b>	<b>7 servicios</b>	<b>8 SPECT 5 Cámaras Gamma Planares</b>	<b>50 profesionales</b>	

El INAMEN ha sido la entidad que ha llevado la vanguardia en el desarrollo de la medicina nuclear en el país, cuenta con la mejor infraestructura y se considera como la referencia nacional para la especialidad. Ha sido sede y contraparte nacional de múltiples proyectos de cooperación internacional entre los que se incluyen el proyecto del OIEA para la creación de la red nacional de servicios públicos de medicina nuclear. En sus instalaciones se formaron buena parte de los profesionales de la especialidad con los que cuenta el país y dispone con laboratorios y equipamiento como para producir y proveer de insumos para la realización de estudios en el ámbito nacional.

El INAMEN es un establecimiento de salud de tercer nivel, institución que en el sistema de salud cumple la función de aplicar técnicas y avances en energía nuclear en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades sensibles a la administración de sustancias radioactivas.

Hoy día depende para su funcionamiento de la Gobernación del Departamento de La Paz y coordina sus actividades con el Servicio Departamental de Salud (SEDES), en sus inicios se denominó como un Laboratorio de Aplicaciones de Detectores Nucleares en Medicina y posteriormente pasó a ser parte de lo que se conocía como el Ministerio de Previsión Social y Salud Pública, los posteriores cambios en la normativa nacional y particularmente como parte de los procesos de descentralización del Estado lo llevan a depender del Gobierno Departamental de La Paz.

El origen de la institución se remonta a 1962 cuando se realizan las primeras actividades de difusión y capacitación sobre la disciplina y al año siguiente se contó con el primer equipamiento donado por el Gobierno del Brasil para ir conformando lo que sería el primer centro de medicina nuclear en la ciudad de La Paz.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

Posteriormente y siempre con el apoyo de diferentes organismos de cooperación internacional, entre los que destacan los gobiernos del Brasil, Argentina y Francia y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), se fueron logrando capacitaciones que involucraron a más profesionales, se recibieron equipamientos adicionales y se fueron demostrando y aplicando las propiedades de los materiales radiactivos en diferentes especialidades médicas.

En los primeros años desatacaron los estudios relacionados con las determinaciones de factores fisiológicos de habitantes y trabajadores en altura cuyos resultados fueron la carta de presentación de la medicina nuclear boliviana en congresos nacionales y regionales. Posteriormente se avanza en las aplicaciones en endocrinología, cardiología, gastroenterología, neurología y patologías óseas.

En 1968 la institución realiza el primer curso de radiofarmacia que constituye otra de las ramas necesarias para el desarrollo de la disciplina por las necesidades y posibilidades de marcación, producción y control de calidad de moléculas para los diversos estudios. Posteriormente en 1972 se incursiona en el uso de las técnicas nucleares para la dosificación de hormonas mediante la técnica de Radioinmunoanálisis, la que se desarrolló hasta la producción local de kits.

Entre 1975 y 1976 y con el apoyo del Gobierno de Bolivia, el INAMEN logra la compra de la primera cámara gamma planar del país así como el primer sistema de cómputo conectado a la misma para el procesamiento digital de las imágenes nucleares.

En la década de los ochenta, se desarrollan una serie de cursos nacionales mediante los cuales se difunden los diferentes aspectos de la especialidad a otros departamentos del país y se incorporan nuevos conceptos de mantenimiento, pruebas de aceptación y control de calidad de equipos con base en normativa internacional y la disponibilidad de los nuevos sistemas digitales que facilitan el procesamiento de la información.

En 1991 se instala y pone en marcha en el INAMEN el primer Tomógrafo Computarizado por Emisión de Fotón Único (SPECT) del país y en el año 2008 se amplían sus capacidades con la instalación de un SPECT de doble cabezal y geometría variable.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

El INAMEN cuenta hoy con la Unidad de Imágenes, el único Laboratorio de Radiofarmacia con capacidad de producción de kits, un laboratorio de Radioinmunoanálisis, un laboratorio de Electrónica con todo el equipamiento necesario para el soporte técnico, el Centro Boliviano del Bocio, una unidad administrativa y todas las dependencias necesarias para el desarrollo de sus actividades.

Proyección de la Medicina Nuclear en Bolivia- La Medicina Nuclear continúa desarrollándose a nivel internacional lo que debería reflejarse en los servicios nacionales. Hoy día la especialidad en Bolivia está desactualizada por no tener acceso a nuevas tecnologías y nuevos procedimientos.

Es este sentido cabe mencionar la necesidad de incorporar equipos multimodalidad para adquirir imágenes nucleares junto con tomografía computarizada o resonancia magnética.

Es necesario incrementar la cobertura territorial hacia los departamentos en los que no se cuenta con servicios de medicina nuclear así como incrementar la cobertura de pacientes en los lugares donde se cuenta con servicios, promoviendo el acceso universal y el uso más eficiente de la infraestructura disponible. En este sentido cabe desatacar que la cobertura de dosis terapéuticas es aún más limitada por las dificultades en la habilitación de espacios adecuados para ese fin y el cumplimiento de la normativa correspondiente.

El desarrollo óptimo de la medicina nuclear debe apuntar a la instalación de un Tomógrafo por Emisión de Positrones (PET) junto a un Ciclotrón para la producción del material radiactivo necesario.

Es necesario además ampliar las capacidades para la formación de recursos humanos con la participación de las universidades, así como mejorar y ampliar las prácticas de control de calidad en todos los aspectos de la especialidad.

Finalmente, se debe fortalecer y articular mejor la red nacional de servicios de medicina nuclear, promoviendo la institucionalidad, el compartir experiencias y la realización de mejores y mayores proyectos conjuntos.

### ***Los Servicios de Radioterapia en Bolivia.-***

Entre el 50 y el 60 por ciento de los enfermos con cáncer reciben radioterapia en algún momento durante el curso de sus respectivos tratamientos. La radioterapia es el uso cuidadoso de radiación de alta energía para tratar el cáncer. El radioncólogo puede usar radiación para curar el cáncer, para aliviar el dolor producido por el cáncer o para aliviar otros síntomas debidos al cáncer.

La radioterapia destruye la capacidad de las células cancerosas para reproducirse y el cuerpo se deshace naturalmente de estas células. La radiación destruye las células cancerosas dañando sus ADNs. La radiación es más efectiva para destruir células cuando las mismas están dividiéndose activamente. Las células cancerosas son particularmente más vulnerables a la radiación porque se dividen más rápido que las células normales. Las células normales pueden reparar este daño en forma más eficiente.

Un radioncólogo puede utilizar radiación generada por una máquina afuera del cuerpo del paciente en lo que se conoce como radioterapia externa o terapia de protones. En la radioterapia externa, una máquina llamada acelerador lineal genera radiación mediante la aceleración de electrones que luego producen rayos X o rayos gamma. La terapia de protones usa ciclotrones o sincrotrones para producir átomos cargados que destruyen tumores.

La radiación también puede ser suministrada con fuentes radioactivas que son puestas dentro del paciente en la técnica conocida como braquiterapia. Las fuentes radioactivas son selladas en agujas, semillas, cables, o catéteres, y son implantadas directamente dentro o cerca de un tumor en forma temporaria o permanente. La braquiterapia es un tratamiento común para los cánceres de próstata, de útero, de cérvix o de los senos.

Algunos tipos de cáncer podría tratarse con radioterapia únicamente, muchas veces el cáncer de próstata y de laringe se tratan de esta manera. Para otros tipos de cáncer, la radioterapia es sólo una parte del tratamiento; por ejemplo, una mujer podría recibir radioterapia después de una cirugía conservadora de la mama. De esta forma, puede curarse del cáncer sin perder el seno. Cuando la radioterapia es sólo una parte del tratamiento, se llama tratamiento coadyuvante. La radiación también puede ser

suministrada antes de la cirugía y entonces se llama neoadyuvante o radioterapia de inducción. Este tipo de estrategia puede ser usada para el cáncer de esófago o el cáncer de pulmón.

Los pacientes pueden recibir radioterapia y quimioterapia antes de la cirugía; esto podría permitir hacer una cirugía menos radical que de otro modo sería necesaria. Por ejemplo, algunos pacientes con cáncer de la vejiga pueden conservar la vejiga si se tratan con los tres métodos en vez de con uno solo. La quimioterapia puede usarse simultáneamente con la radioterapia sin cirugía para mejorar la respuesta localizada y reducir la enfermedad metastásica; esto se llama terapia de modalidades combinadas.

La radiación también puede ser usada para cortar la circulación de sangre hacia un tumor en órganos vasculares como el hígado. Por lo pronto, la radioembolización usa microesferas llenas con isótopos radiactivos para bloquear el suministro de sangre a un tumor para que éste se muera de hambre.

Debido a que la radiación puede dañar células normales, es importante que la dosis de radiación sea dirigida con precisión al cáncer. La toma de imágenes también ayuda con el planeamiento del tratamiento, permitiendo el envío preciso de la radiación que de esta manera esquiva el tejido vecino sano y minimiza los efectos secundarios y complicaciones. Desarrollos recientes como la radioterapia guiada por imágenes (IGRT) incluso permiten realizar ajustes durante el tratamiento en áreas del cuerpo que son propensas al movimiento, tales como los pulmones, y en tumores localizados cerca de órganos y tejidos importantes.

La IGRT frecuentemente se usa en forma conjunta con la radioterapia de intensidad modulada (IMRT) para entregar dosis de radiación en tumores malignos o incluso en áreas específicas dentro del tumor. A través de la modulación o control del haz de radiación, la IMRT adapta la dosis a la forma 3-D de los tumores, permitiendo una entrega más segura de dosis de radiación más altas que las convencionales.

Otras técnicas que hacen posible la entrega de dosis precisas de radiación en los tumores incluyen la radiocirugía estereostática, que usa imágenes en 3-D para determinar las coordenadas exactas de un tumor en el cuerpo. De esta manera, los rayos gamma o los

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

rayos X altamente focalizados convergen en el tumor para encogerlo. El bisturí de rayos gamma es una opción de tratamiento que focaliza múltiples haces de radiación sobre una área pequeña y es ideal para tratar tumores en el cerebro. Los aceleradores lineales también pueden ser usados para entregar radioterapia estereotáctica en el cerebro o los pulmones.

Además de ser una opción de tratamiento para el cáncer, la radioterapia es también paliativa; esto significa que puede ayudar a reducir el dolor y el sufrimiento en pacientes con cáncer avanzado. Los pacientes con dolor significativo, dificultad para caminar o dificultad para comer debido al tumor pueden experimentar una mejora en la calidad de vida a través de la radiación paliativa.

La radioterapia en el país tuvo su mayor desarrollo durante la década de los 90s con la instalación de las primeras bombas de cobalto en las capitales de cuatro departamentos del país. Para este desarrollo mucho tuvieron que ver diferentes proyectos de cooperación internacional para la provisión de equipos, asistencia técnica y formación de recursos humanos que contaron con contrapartes nacionales y el esfuerzo de muchos profesionales que impulsaron la disciplina para lograr contar con servicios de radioterapia en distintas regiones del país.

Como resultado de estas acciones pero también como consecuencia de que diferentes tipos de cáncer fueron ocupando los primeros lugares como causa de muerte tanto para hombres como para mujeres y se empiezan a considerar como problemas de salud pública es que se da un impulso mayor a la instalación y puesta en marcha de este tipo de servicios.

En la actualidad operan en el país cinco servicios de radioterapia. Dos en la ciudad de La Paz, uno en Sucre, uno en Cochabamba y uno en Santa Cruz. Solo uno de estos servicios cuenta con un equipo acelerador lineal y todos cuentan con Bombas de Cobalto y el instrumental de braquiterapia para los tratamientos.

Con relación al personal técnico de los servicios, cabe destacar que los médicos cuentan con la especialidad, los tecnólogos reciben un curso de radioterapia en la universidad y

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

completan su formación en los servicios, las enfermeras y los físicos no reciben formación específica y se forman solo en la práctica y con cursos cortos en el extranjero.

Se observa que la formación para la especialidad, en la mayoría de los casos, debe realizarse en centros de entrenamiento del extranjero y en el caso de los físicos médicos, el sistema de salud no los reconoce como especialistas por lo que no existen incentivos salariales para adquirir esta formación.

### ***Estadística de pacientes de Radioterapia.-***

Según una estimación preliminar, en los departamentos de La Paz y Santa Cruz se realizan alrededor de 600 tratamientos por departamento, en Cochabamba se llegaría a un número de 480 tratamientos de irradiación y en Sucre se harían 360. Con esto, en el país se llega a un total anual de 2.040 tratamientos de radioterapia en el total de servicios disponibles. Se estima que, en Bolivia, la mayor parte de los tratamientos se aplican a pacientes con cáncer cuello uterino (alrededor de un 35%) luego se tratan pacientes de cáncer de mama ( $\approx 15\%$ ) y en tercer lugar pacientes de cáncer de piel ( $\approx 7\%$ ).

Resulta interesante comparar esta oferta con la demanda potencial. Para ello, se estima que en el país se producirían 18.000 nuevos casos de cánceres, de estos casos, la experiencia de otros países indica que alrededor de una mitad requerirían radioterapia en alguna de las modalidades, o sea que la demanda anual potencial estaría en el orden de 9.000 tratamientos por año existiendo un déficit aproximado de 7.000 tratamientos por año, o que se requiere aumentar la capacidad en un 250%.

Corresponde hacer notar que una parte de estos pacientes llegan a acceder a estos servicios viajando a países extranjeros donde además se pueden encontrar servicios de última tecnología.

### ***Proyección de los servicios de radioterapia en Bolivia***

De acuerdo con los profesionales que trabajan en la especialidad, los servicios de radioterapia se pueden proyectar en Bolivia mediante:

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- La incorporación en los servicios de aceleradores lineales
- La incorporación de planificadores tridimensionales
- Ir creando las condiciones para la terapia de alta tasa de dosis
- Establecer programas locales para la formación de los recursos humanos necesarios para los servicios actuales y futuros
- Vincular los servicios relacionados con la oncología en una sola unidad o instituto, aprovechando la experiencia exitosa al respecto existente en el país.
- Asegurar la disponibilidad de suficientes físicos médicos en todos los servicios y los incentivos necesarios para su formación y permanencia en la actividad.
- Establecer mejores relaciones en el ámbito nacional con otros servicios similares para compartir experiencias, protocolos, expertos y proyectos de cooperación técnica internacional.
- Realizar actividades de difusión de los beneficios de la especialidad y sus capacidades curativas en coordinación con los servicios de prevención de la red nacional de servicios de salud.

### **1.7. Análisis y conclusiones del Estado de Situación.**

Las siguientes conclusiones están basadas en el análisis resultante de entrevistas colectivas y a responsables de instituciones académicas que incluyen profesores y alumnos de cursos superiores, a funcionarios de instituciones gubernamentales además de entrevistas individuales a personalidades con reconocida trayectoria y experiencia en temas nucleares.

En total se recogió la opinión de cerca de 100 personas a través de entrevistas individuales y colectivas de 13 instituciones.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- Se observa que hay una deficiencia notable de profesionales con especialidad nuclear tanto en el área académico-universitaria como en otras reparticiones del gobierno. La razón para esta situación se la explica señalando que no existe información ni incentivos para que jóvenes estudiantes se orienten hacia esta disciplina. A partir de esta aparente desmotivación por parte de los estudiantes, la universidad tampoco desarrolla planes o programas para impartir enseñanza sobre la energía nuclear.
- Sin excepción, la opinión de los entrevistados es que es altamente oportuno y necesario que el Estado promueva los estudios que lleven a la formulación de un Programa Nuclear, expresando su satisfacción por esta iniciativa del Gobierno. Se entiende y espera que la existencia de un Programa Nuclear Boliviano permitirá la reactivación de una manera orgánica de las actividades nucleares del país que cuente con el apoyo total, decidido y oportuno de las autoridades nacionales. Este Programa Nuclear tiene que abarcar los aspectos energéticos y no energéticos de las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear y ser de corto, mediano y largo alcance.
- Un buen número de los jóvenes universitarios entrevistados, entre profesores y alumnos, manifiestan que tienen interés en conocer a mayor profundidad los alcances y las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear, y que tanto la universidad como los organismos especializados de la estructura gubernamental, debieran hacer más esfuerzos coordinados y de largo aliento, para promover y difundir el conocimiento y aplicaciones prácticas las ciencias y tecnologías nucleares. En tal sentido, se ve al IBTEN, como brazo ejecutivo del Vice Ministerio de Ciencia y Tecnología, como la entidad llamada a promover y difundir el conocimiento nuclear y ser el instrumento administrativo central para la gestión de este conocimiento.
- Los pilares fundamentales, conceptuales y estratégicos de un Programa Nuclear, tienen que estar basados en las políticas y estrategias de desarrollo enunciadas en el Plan Nacional de Desarrollo del Estado Plurinacional de Bolivia. Basados en

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

estas políticas, estos pilares se refieren a la Seguridad Energética, Seguridad Alimentaria, Salud y Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación.

- Se entiende que ningún Programa Nuclear u de otro tipo, podrá ser implementado eficientemente sin el concurso de recursos humanos de alta calificación en el ámbito nuclear. Como estos recursos son demostradamente insuficientes al presente, se ve la necesidad de la formulación de un Plan de Formación de Recursos Humanos, iniciativa que postula el Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- Por otra parte, se hace notar que las universidades deben jugar un rol prominente y activo en la formación de recursos humanos, pero que en la actualidad hay carencia de docentes y profesores especializados en la materia, para lo cual, se debe recurrir a la cooperación internacional de países vecinos, del Organismo Internacional de Energía Atómica y de profesionales que existen en el país fuera de las universidades mismas.
- Se opina que la formación de recursos humanos tendrá sostenibilidad en el tiempo, siempre y cuando obedezca a una política nacional de promover e implementar las aplicaciones energéticas y no energéticas de la energía nuclear. De otra manera, se considera que no es ni siquiera ético motivar a jóvenes universitarios que tomen o inicien el camino nuclear sin las perspectivas de seguridad laboral. Las universidades de ninguna manera iniciarían o adoptarían planes de formación universitaria sin la existencia de un Programa Nuclear.
- Por otra parte, se opina también que ante la carencia de laboratorios nucleares, con la excepción de alguna instrumentación en el CIAN-Viacha y en algunos centros de medicina nuclear, es necesario que el Programa Nuclear y el Plan de Formación de Recursos Humanos vaya soportado, apoyado y reforzado, con la instalación de equipamiento nuclear de envergadura, como lo podría ser un reactor nuclear experimental, un ciclotrón o una planta de irradiación.

## **Capítulo II**

# **Lineamientos para un Plan Nacional de Formación de Recursos Humanos en Energía Nuclear**

## 2.1 Introducción

El crecimiento científico industrial en Sud América tiene como consecuencia lógica la demanda de tecnologías avanzadas y profesionales altamente calificados, para satisfacer las necesidades emergentes de este fenómeno. La tecnología nuclear, es una de las áreas en las que la necesidad de expertos ha aumentado debido a los múltiples usos energéticos y no energéticos que tiene.

Bolivia necesita elevar el nivel promedio de conocimientos y calificar a sus profesionales, que realicen investigación y tecnólogos de alto nivel de preparación, para que con su trabajo se incorporen al desarrollo económico y social del Estado.

Las políticas generales que el Estado defina para alcanzar este objetivo, deben plasmarse entre otras medidas, en una reforma del sistema educativo que abarque la formación teórica y experimental de recursos humanos necesarios, tanto en el ámbito universitario de pre y pos grado, como en otros espacios existentes, para que los cambios hacia el ansiado desarrollo puedan ser efectivos.

Debido a que el campo de la energía nuclear y sus aplicaciones pueden ser adecuados para desarrollar emprendimientos tecnológicos y productivos, en los que empresas de base tecnológica sean incorporadas activamente, además de desarrollar la investigación y enseñanza, se hace necesario difundir sus principios y conceptos básicos a la sociedad boliviana a través de una divulgación en diferentes niveles de conocimiento que ésta tiene.

Bolivia no tiene antecedentes de formación de profesionales especializados en el área nuclear aunque actualmente cuenta con centros que utilizan las facilidades de las técnicas y aplicaciones nucleares, mayormente con profesionales capacitados fuera del país.

Por otra parte, la inversión en equipos e instalaciones de alto costo, adquirirán pleno sentido si va acompañada de la formación de profesionales en ciencia, tecnólogos y técnicos que aprovechen de esto para estructurar estratégicamente redes científicas de alto nivel tanto en Bolivia como en la región.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

La presente consultoría, después de realizar un análisis de la situación de la Educación Superior en Bolivia, ha comprobado que no existe una línea de enseñanza universitaria en el área nuclear definida ni desarrollada, por lo tanto, sugiere implementar, consolidar y desarrollar un Plan que considere todos los posibles niveles académicos de formación, capacitación y actualización del conocimiento, a estudiantes y profesionales bolivianos en Bolivia de forma sistemática en la Universidad y en los Centros de Investigación que deben adquirir la responsabilidad.

### **2.2. Justificación para la Formación y Capacitación de Recursos Humanos**

El avance científico y tecnológico en general, y de las ciencias y tecnologías nucleares en particular que se observa en los países que tienen programas y planes nucleares, se debe de una manera fundamental, además de la disponibilidad de suficientes recursos financieros, a la implementación de decididas y claras políticas y estrategias de gobierno de corto y largo aliento, sustentadas en la existencia de recursos humanos de alta formación científica y tecnológica tanto en universidades e institutos nacionales como extranjeras.

En todos los países a los que podríamos llamar avanzados en el área nuclear tanto de la región latinoamericana como también fuera de ella, las actividades nucleares fueron y son en la actualidad sustentadas en sólidos programas de capacitación y enseñanza de las ciencias y tecnología nuclear, programas que se desarrollan en las universidades y en institutos nucleares como lo serían los centros de investigación nuclear. A través de los años, en muchos casos ya por más de 50 años, se fueron creando cuadros de profesionales e investigadores que hicieron posible la implementación exitosa de programas y planes nucleares para una eficiente utilización de la energía nuclear con fines pacíficos.

Ejemplos de esta situación podemos citar el caso de la Argentina, que ya por más de medio siglo, desde finales de la década de los 50 del siglo anterior, sustenta un programa nuclear sostenido que le permitió ponerse a un nivel internacional de privilegio; llegando a dominar tecnológicamente todos los aspectos más importantes del llamado 'ciclo del combustible nuclear', desde la exploración y explotación de recursos uraníferos, hasta la fabricación de reactores nucleares experimentales pasando por el enriquecimiento de

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

uranio y la operación de plantas nucleares de generación de núcleo electricidad. Ejemplos menos espectaculares en nuestra región sudamericana (latinoamericana) son Brasil, Chile y Perú que operan reactores de investigación para diferentes aplicaciones. Brasil al igual que Argentina, también operan plantas nucleares construidas por empresas internacionales.

En todos estos ejemplos, la componente de recursos humanos de alta calificación resultó ser de fundamental importancia, al punto que se puede concluir que no podría haber un avance nuclear científico y tecnológico por un lado, y por otro, ni siquiera se podría operar instalaciones nucleares de una manera eficiente y segura sin la participación de profesionales de alta calificación que a su vez, son productos de planes estructurados de formación de recursos humanos, con la decidida e imprescindible participación de las universidades y alentadas y apoyadas por decisiones de gobierno, que ven en la energía nuclear, una tecnología que contribuye al desarrollo científico y tecnológico a la vez que mediante sus aplicaciones pacíficas energéticas y no energéticas contribuye a la seguridad e independencia energética y a mejorar la calidad de vida con las aplicaciones en la salud, agricultura e industria.

La experiencia en la región latinoamericana y en otras regiones del mundo también señala que la formación de recursos humanos en el área nuclear, es una actividad que requiere esfuerzos planificados de largo plazo que lleva muchos años, y en aquellos casos en los que se intenta implementar planes de incorporar plantas nucleares de generación de electricidad, además de largos plazos, se debe pensar en programas de capacitación no solo de alto nivel, sino también en un número considerable de profesionales. Así por ejemplo, se sabe que la República Popular de China, se ve en la necesidad de capacitar en los próximos 5 a 10 años cerca de 20 mil ingenieros nucleares para instalar y operar la más de 20 nuevas plantas nucleares que tiene programadas; EEUU anunció que necesita cerca de 10 mil y Alemania algo así como 5 mil nuevos profesionales. Una planta nuclear de mediana potencia, necesita para su operación segura durante 24 horas por día y 365 días al año, cerca de 400 profesionales altamente especializados y capacitados.

De estas consideraciones y observaciones de la experiencia en otros países que nos llevan la delantera en materia nuclear, resulta evidente que la implementación de un Programa Nuclear, depende de una manera fundamental de la existencia de cuadros de

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

profesionales de alta calificación; sin estos recursos humanos ningún programa o plan nuclear podría ser exitoso ni mucho menos sustentable en el tiempo.

En lo que respecta a Bolivia, luego de haber analizado el Estado de Situación, se puede concluir que los actuales recursos humanos en el área nuclear son muy limitados y escasos, con relativamente poca experiencia. Esta situación con diferentes matices se observa tanto en las universidades estatales y privadas como en algunas instituciones nacionales.

Los pocos profesionales con experiencia tampoco tienen grados académicos en el ámbito nuclear y su experiencia la adquirieron por medio de estadías de duración limitada que no pasa de un año por medio de becas, generalmente otorgadas por el OIEA.

Por otra parte, ninguna universidad boliviana otorga un título académico nuclear, ni por lo menos una mención en el tema. Solo algunas carreras de Física, particularmente la carrera de Física de la UMSA y la UMSS imparten materias como Física Nuclear teórica con muy pocas o nulas posibilidades de experimentación en laboratorios.

Es fundamental el establecimiento de un Plan de Formación de Recursos Humanos, vinculado al fortalecimiento de laboratorios e instalaciones de equipos nucleares de envergadura dónde los profesionales formados podrían desarrollar sus labores de servicio e investigación, con la excepción quizás de los centros de medicina nuclear y de radioterapia.

Sin contar con instalaciones nucleares no será posible establecer e implementar un plan de formación de recursos humanos de alta calificación de una manera sostenible, y por lo tanto, los planes gubernamentales de largo aliento como lo sería la incursión en la generación de nucleoelectricidad mediante la instalación y operación de plantas nucleares, se verían seriamente comprometidos, al punto que no sería posible la ejecución de tales planes.

## 2.3. Objetivo del Plan Nacional

El Plan Nacional de Formación y Capacitación de Recursos Humanos en Ciencias e Ingeniería Nuclear tiene como objetivo, formar profesionales con amplio conocimiento teórico y práctico en el área de energía nuclear y sus aplicaciones, capaces de realizar investigación básica y aplicada para resolver problemas nacionales, y contribuir al desarrollo científico y tecnológico del país y en particular el desarrollo de la ciencia y tecnología nuclear.

## 2.4. Propuesta de los niveles de formación y capacitación de recursos humanos

Los niveles I y II siguen la normativa boliviana que se tiene en el Sistema de Educación Boliviana no universitaria, y los niveles III y IV lo hacen de forma similar para la Educación Superior universitaria y de Posgrado.

- **Educación no universitaria**

Siendo el objetivo del Plan de Formación de Recursos Humanos y capacitación en el área nuclear en Bolivia, éste no solamente debe ser desarrollado en el ámbito universitario, sino que el esfuerzo debe ser de mayor alcance, puesto que debe abarcar la educación que no solamente involucre al ambiente universitario, sino que debe incorporar a niveles de educación escolar, técnica y centros de formación de maestros como son las Normales Superiores.

### **Nivel I**

#### **Educación Primaria Comunitaria Vocacional**

La divulgación del área nuclear en la educación escolar, a un nivel introductorio de los conceptos básicos teóricos con sus respectivas aplicaciones debe ser desarrollada en el Nivel Inicial en las materias de ciencias naturales.

Para introducir el tema específico, el Ministerio de Educación, con las reparticiones correspondientes y siguiendo los pasos legales son los responsables de lograr que la

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

escuela esté involucrada en el tema, tal como actualmente la temática medioambiental forma parte del currículo de las escuelas.

Los niveles de conocimiento previo en las Ciencias Naturales serán los que determinen en qué curso de este nivel escolar, se impartan los conocimientos ya descritos.

### **Nivel II**

#### **Educación Secundaria Comunitaria Productiva**

Asimismo, la escuela, en el Nivel Secundario debe, como parte del área de Ciencias Naturales en Química y Física, introducir el tema nuclear con mayor profundidad, de acuerdo a los planes y contenidos que tienen los profesores de estas asignaturas.

Los responsables de establecer el grado de profundidad y la pertinencia del tema referido a su duración, son el Ministerio de Educación y los profesores del Área de Ciencias Naturales.

#### **Educación Técnica**

Existen actualmente instituciones de enseñanza que otorgan el grado de Técnicos Medio y Superior en diferentes áreas del conocimiento, con carácter aplicado.

Estas instituciones, también deben ser incorporadas en el plan para que de acuerdo al nivel académico que tienen en sus ofertas académicas propongan una mención u orientación en el área nuclear.

La necesidad de técnicos en las posibles aplicaciones nucleares es posible satisfacerla a través de esta instancia como por ejemplo, técnico en electrónica nuclear o mantenimiento de equipos.

Este nivel de educación depende del Ministerio de Educación, quien con sus reparticiones correspondientes y siguiendo los pasos legales introducirán el área nuclear conjuntamente las autoridades y estudiantes de los centros técnicos.

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

## **Escuela Superior de Formación de Maestros**

Los centros de formación de maestros para la escuela, deben formar parte del plan puesto que el maestro de primaria y secundaria deberá estar capacitado para enseñar a sus estudiantes de escuela el tema nuclear enfatizando en sus aplicaciones pacíficas en beneficio de la humanidad, en áreas de salud, agricultura y de forma académica, sistemática y con el nivel de conocimiento apropiado para los jóvenes en formación.

Las Escuelas de formación de maestros también son centros de formación de recursos humanos dependientes del Ministerio de Educación, por lo que éste es el responsable de incorporar el área nuclear a los planes de estudio de los profesores de ciencias naturales.

Las autoridades correspondientes a los niveles de educación no universitaria mencionados, analizarán la profundidad de los programas analíticos que serán ofrecidos e impartidos conjuntamente el Ministerio de Educación con sus respectivos departamentos de currículo.

Los temas libres de divulgación e información científica-técnica se realizarán a través de la preparación de material impreso, audio-visual y será difundido por la prensa oral y escrita y televisiva a nivel nacional. Los seminarios serán organizados por el brazo operativo del Vice ministerio de Ciencia y Tecnología como podría ser el IBTEN.

La ejecución de los planes de los niveles no universitarios debe estar a cargo del Vice ministerio de Ciencia y Tecnología, dado que, es interés del Estado el desarrollo del área de ciencia y tecnología nuclear, considerando que ninguna institución académica podría tomar este importante papel de promoción y desarrollo a nivel nacional.

La difusión del tema nuclear a través de seminarios, conferencias, programas dirigidos en Unidades Educativas, Institutos de Educación Técnica Media y Superior y Normales debe estar a cargo de este Vice ministerio.

Para facilitar y coordinar estas acciones, el Vice ministerio de Ciencia y Tecnología debe establecer una estrategia con el apoyo financiero y logístico que se requiera.

Por otra parte, el Vice ministerio de Ciencia y Tecnología dentro de sus planes de acción, contará con la participación del IBTEN para realizar las acciones que necesite para la divulgación del tema nuclear.

- **Educación Superior: Universidad Boliviana**

El análisis del estado de situación realizado por la presente consultoría, en las instancias de Educación Superior como universidades, centros de investigación, Instituciones de servicio, ha evidenciado que el tema nuclear no ha sido considerado como importante en el ámbito de la enseñanza universitaria, ni dentro de las aplicaciones en los centros de investigación.

Sin embargo, se ha podido evidenciar que el nivel avanzado en la Universidad, enseña materias afines a las nucleares en las que se imparten conceptos de energía nuclear. Existen inclusive algunas que tienen planteada un área de física médica nuclear, que, no ha sido implementada aún.

Esto significa que no ha habido una oferta consistente en este tema y la lógica conclusión es que no hay una línea definida ni para la formación ni para la capacitación de estudiantes en el pre grado ni profesionales en el posgrado.

Se debe agregar a este análisis, la poca demanda de los estudiantes en el área, mientras que los ya capacitados han sido preparados fuera del país.

El Plan es, pues, integrando porque pretende abarcar todo el espectro del conocimiento y aplicación de la energía nuclear, en otras palabras todos los componentes del llamado ciclo del combustible nuclear, las aplicaciones energéticas manejo, de instrumentación nuclear, etc. Y por lo tanto, la consultoría propone los niveles III y IV de formación que a continuación son presentados.

### **Nivel III**

#### **Seminarios y Temas libres de divulgación e información científica técnica**

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

Objetivo.- Divulgar conocimientos generales sobre la Energía Nuclear y sus Aplicaciones pacíficas, energéticas y no energéticas a través de la presentación de temas libres y seminarios referidos al tema o la inclusión de capítulos dentro una asignatura en curso.

Este nivel tiene carácter general, introductorio, de divulgación e información científica - técnica.

El proceso de dar a conocer de forma académica y sistemática el amplio conocimiento de la energía nuclear y sus aplicaciones, será realizado a través de la incorporación de temas concernientes a los aspectos más relevantes de esta ciencia en materias afines, temas que podrán ser impartidos por el docente en el periodo académico regular universitario.

Asimismo, la realización de Seminarios a nivel nacional para una divulgación general serán impartidos con temas seleccionados como por ejemplo: Física Nuclear, Química Nuclear, Radioquímica, Instalaciones Nucleares y Generación de Núcleo-electricidad, el rol de la energía nuclear en la sociedad, relevancia en el mundo diario, aceptación y aplicaciones de la industria, medicina y agricultura, entre otros

Un mecanismo para contribuir a la divulgación del tema nuclear a través de la Universidad, debe ser el de la Interacción Social que es una de las áreas que todo universitario debe realizar.

La divulgación a través de la interacción social, será al ámbito universitario y no Universitario, siendo parte de ello la implementación de Convenios de patrocinio y Cooperación entre el Vice ministerio de Ciencia y Tecnología con las Universidades del Sistema.

Dirigido a: Estudiantes de Ciencias Exactas, Ciencias Biológicas, Ciencias de la Salud (Farmacia, Tecnología Médica) e Ingenierías en las asignaturas en las que se tocan temas de energía del plan de estudios de su respectiva Carrera.

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

Duración de los Temas dentro de las asignaturas: Como mínimo 5 – 10 horas por semestre.

## Docentes:

En primera instancia, el docente titular de la asignatura.

Docentes Invitados. Empresas/expertos especializados en el área nuclear. Los docentes que no sean titulares.

En función a quién está dirigido este nivel, los contenidos mínimos propuestos a Continuación, son sugerencia de la consultoría y que el docente que imparta el tema o el seminario ampliará y/o profundizará.

## Contenido Mínimo:

- Estructura atómica, estructura del núcleo y sus propiedades.
- Radiactividad y decaimiento. Tipos de radiaciones nucleares.
- Reacciones o interacciones Nucleares: Fisión y Fusión.
- Conceptos de Interacción de las Radiaciones con la materia.
- Detección de las radiaciones.
- Instalaciones Nucleares. Aceleradores de partículas y reactores nucleares y sus aplicaciones.
- Aplicaciones no energéticas de la energía nuclear:
  - Industria, Medicina, Agricultura, Medio ambiente, etc.
- Aplicaciones Energéticas de la Energía Nuclear.
- Reactores o Plantas Nucleares
- Energía Nuclear y Sociedad

## Lugar de realización para los seminarios:

- Universidades pertenecientes al Sistema de la Universidad Boliviana
- Universidades Privadas
- IBTEN

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

## **Pregrado. Sin mención nuclear (Asignaturas semestrales)**

Objetivo.- Profundizar el conocimiento sobre Energía Nuclear y sus aplicaciones energéticas y no energéticas mediante la incorporación a los planes de estudio universitario, asignaturas semestrales que no inducirán a la mención.

Dirigido a: Estudiantes de Ciencias Exactas (Física, Química, Biología), Ciencias Biológicas, Ciencias de la Salud (Farmacia, Tecnología Médica) e Ingenierías. Idealmente estas materias se deberán implementar tomando en cuenta los niveles de física y matemáticas suficientes que permitan la comprensión de la materia nuclear a dictarse, aspecto que será definido en cada carrera universitaria.

Duración de los Temas: 80 horas por semestre equivalentes a las horas académicas de un semestre académico universitario, además de cierto número de prácticas de laboratorio de acuerdo a las posibilidades.

Docentes:

- Docentes titulares
- Docentes Invitados
- Empresas/expertos especializados en el área nuclear.
- Los docentes que no sean titulares.

Las asignaturas que se encuentran a continuación, son aquellas que la consultoría considera necesarias para que sean impartidas en los ámbitos ya mencionados. Estas asignaturas incluirán una parte teórica y otra experimental de acuerdo a la disponibilidad de laboratorios en las universidades.

El componente de laboratorios podría realizarse en las instalaciones del IBTEN e INAMEN.

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

Los contenidos mínimos de las asignaturas que se sugieren más abajo, son el resultado de amplias discusiones entre los profesionales de la consultora y que reflejan su experiencia en los temas nucleares.

Sin embargo, los docentes titulares de las universidades decidirán los detalles del contenido final a impartirse.

## **Física Nuclear y de Radiaciones**

### *Contenido Mínimo*

- Radiactividad
- Magnitudes y unidades nucleares.
- Tablas de los nucleídos.
- Transformaciones Radiactivas.
- Periodo de semi desintegración y vida media.
- Equilibrios entre radionúclidos genéticamente desarrollados
- Interacciones de las radiaciones con la materia.
- Aniquilación de positrones
- Estadística del fenómeno radiactivo.
- Multipolaridad electromagnética.
- Conversión interna
- Decaimiento beta
- Decaimiento alfa, efecto túnel

Lugar de realización: Centros Universitarios: Carrera de Física

## **Química Nuclear**

### *Contenido Mínimo:*

- Núcleo, modelos nucleares, fuerzas e inestabilidad nuclear y decaimiento radiactivo.
- Energía involucrada y Cinética del Decaimiento Radiactivo.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- Interacción de las radiaciones con la materia
- Detección de las radiaciones.
- Radiactividad natural. Datación.
- Radiactividad artificial, transmutación de los elementos.
- Reacciones nucleares, fisión, fusión, reactores
- Aceleradores de partículas.
- Aplicación al descubrimiento de nuevos elementos y partículas.
- Efectos biológicos de las radiaciones
- Radio protección, manejo seguro del material radiactivo.
- Radiactividad ambiental.
- Aplicación de radiotrazadores en ciencias biomédicas, investigación, análisis e industria.
- Aplicaciones Analíticas. Activación Neutrónica
- Aplicaciones en la Medicina, Industria y agricultura.
- Aplicaciones en las ciencias geológicas y medioambientales

Lugar de realización: Centros Universitarios-Carrera de Química

### **Radioquímica**

#### *Contenido Mínimo:*

- Núcleo y estructura y fuerzas nucleares
- Decaimiento Radiactivo. Ecuaciones
- Equilibrio y Generadores
- Interacciones de la Radiaciones con la Materia
- Detección de las radiaciones: detectores gaseosos,
- Detectores de centelleo sólido,
- Detectores de semiconductores, dosímetros.
- Espectrometría nuclear, alfa, beta y gama
- Detección por centelleo líquido
- Efectos biológicos de las radiaciones
- Radio protección y dosimetría
- Dosimetría de fuentes externas y blindaje

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- Contaminación ambiental
- Reacciones nucleares y producción de radionúclidos con reactores nucleares y ciclotrones
- Radio Datación: geológica y otros materiales
- Aplicación de radio trazadores en ciencias biomédicas, investigación, análisis e industria.
- Aplicaciones Analíticas. Activación Neutrónica
- Aplicaciones en la Medicina, Industria y agricultura.
- Aplicaciones en las ciencias geológicas y medioambientales
- Energía nuclear y sociedad

Lugar de realización: Centros Universitarios -Carrera de Química

### **Reactores Nucleares para Investigación y de Potencia**

#### *Contenido Mínimo*

- Reacción nuclear en cadena, criticidad
- Combustibles y moderadores
- Reactores de potencia. Producción de energía
- Reactores de investigación
- Reactores de producción de radioisótopos
- Reactores avanzados
- Termo hidráulica, neutrónica y química de reactores
- Venenos neutrónicos
- Aplicaciones energéticas
- Aspectos técnicos y económicos
- Impacto social
- Ciclo del combustible
- Desechos nucleares
- Energía nuclear y sociedad

Lugar de realización. Centros Universitarios- Carreras de Física e Ingeniería

## **Instrumentación nuclear**

### *Contenido Mínimo:*

- Conceptos básicos. Sección Eficaz, recorrido libre medio, longitud reducida
- Pérdida de energía de las partículas en colisiones atómicas: Fórmula de Bethe, Bloch. Interacción de los fotones. Formación de la cascada electromagnética Interacción de los neutrones.
- Características generales de los detectores. Principios básicos
- Detectores gaseosos de ionización
- Detectores de centelleo
- Detectores de semiconducción
- Señales eléctricas en Física Nuclear
- Electrónica para el proceso de señales
- Técnicas de medida en Instrumentación nuclear

Lugar de realización: Centros Universitarios (Carrera de Física)

## **Protección y Seguridad Radiológica**

### *Contenido Mínimo:*

- Conceptos básicos de física nuclear
- Radiodosimetría. Efectos biológicos de las radiaciones. Irradiación externa y Contaminación.
- Fundamentos de Protección Radiológica. Concepto de riesgo detrimento.
- Limitación de las dosis Optimización de la radiológica.
- Aspectos operacionales. Clasificación de las condiciones de trabajo. Áreas Controladas.
- Dosimetría. Personal y de áreas.
- Monitoreo de contaminación interna, áreas de trabajo y contaminación ambiental
- Transporte de material radiactivo
- Aspectos legales y regulatorios, nacionales e internacionales. Legislación Nuclear, Tratados y Convenios

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

Lugar de realización: Centros universitarios – IBTEN - INAMEN

## **Radiofarmacia**

*Contenido mínimo:*

- Introducción. Radiofarmacia centralizada, industrial y hospitalaria
- Núcleo atómico
- Métodos de decaimiento radiactivo y cinética
- Interacción de las radiaciones con la materia
- Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes
- Detección y medida de los radionúclidos
- Espectrometría nuclear
- Dosimetría
- Equilibrio radiactivo y generadores de radioisótopos
  - Estrategias de marcación
    - Buenas Prácticas y Control de calidad
    - Radiofármacos.
    - Conceptos de farmacología, cinética y metabolismo de los radiofármacos
    - Aplicaciones clínicas. Diagnóstica y terapia. Conceptos de radiofarmacia .  
clínica

Lugar de realización: Centros universitarios (Carrera de Farmacia y Bioquímica) – INAMEN- IBTEN

## **Seguridad nuclear**

*Contenido mínimo:*

- Conceptos básicos sobre protección radiológica
- Instalaciones relevantes
- Blindajes. Estado incidental y accidental
- Enfoque determinístico y probabilístico
- Aspectos de seguridad en el diseño, el emplazamiento y la operación

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- Evaluación de la seguridad en instalaciones nucleares.
- Planes de emergencia nucleares
- Análisis de riesgos
- Vigilancia Radiológica ambiental
- Transporte de material radiactivo
- Aspectos legales y regulatorios, nacionales e internacionales. Tratados y Convenios
- Comunicación con el público

Lugar de realización: Centros universitarios - IBTEN

### **Aplicaciones de los radioisótopos y de las radiaciones ionizantes**

Contenido mínimo:

- Introducción. Conceptos generales
- Aplicaciones de los radioisótopos en agricultura
- Conservación de alimentos.
- Investigación médica y diagnosis. Trazadores,
- Terapia. Tratamiento de cáncer
- Radiografía industrial
- Ionización. Detectores de radiaciones
- Irradiación de alimentos con radiación gamma y Rayos X
- Detección de curso de aguas mediante trazadores radioactivos
- Química forense y trazadores nucleares.
- Detección y análisis de contaminantes en medio ambiente
- Caracterización Química de Cerámicos. Arqueológicos y culturales mediante técnicas nucleares
- Análisis por Activación Neutrónica y otras técnicas nucleares
- Técnicas nucleares en la industria

Lugar de realización: Centros universitarios. IBTEN INAMEN

## **Producción de Radioisótopos**

*Contenido mínimo:*

- Introducción a las operaciones radioquímicas.
- Diseño e instalación de laboratorios radioquímicos. Manejo de materiales
- Métodos de separación y purificación de radioisótopos y compuestos marcados
- Efecto Szilard-Chalmers y química de átomos calientes. Aplicaciones
- Generalidades sobre los procesos de producción de radioisótopos
- Procedimientos en celdas blindadas.
- Conceptos de radioprotección
- Tipos de reacciones nucleares, secciones eficaces
- Cálculos de rendimiento
- Técnicas de irradiación
- Radioisótopos de reactor
- Radioisótopos de ciclotrón
- Generadores de radioisótopos
- Métodos automatizados de producción y preparación de blancos
- Manipulación de radioisótopos, celdas calientes, ventilación
- Control de calidad de radioisótopos
- Manejo de desechos radioactivos
- Embalaje y transporte
- Aspectos legales y regulatorios

Lugar de realización: Centros universitarios – IBTEN

## **Materiales Nucleares**

*Contenido mínimo:*

- Efectos isotópicos
- Métodos de enriquecimiento isotópico

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- Producción de agua pesada
- Prospección y minería del uranio
- Remediación ambiental
- Combustibles nucleares.
- Fabricación y comportamiento bajo irradiación
- Reprocesamiento de los combustibles nucleares
- Química de los actínidos y los trans uránidos
- Economía del Ciclo de combustible nuclear
- Seguridad y protección física de los materiales nucleares
- Convenciones y tratados internacionales

Lugar de realización: Centros universitarios (Carrera de Física y Química)

### **Gestión y Planificación energética nuclear, Energía y sociedad**

*Contenido mínimo:*

- Aspectos generales de la radioactividad
- Aspectos e hitos históricos
- Tipos de radiaciones ionizantes
- Conceptos de dosis de las radiaciones ionizantes
- Radioactividad Natural y artificial
- Aplicaciones de los radiosítopos en la medicina. Industria, agricultura
- Aplicaciones energéticas
- Accidentes e incidentes nucleares
- Necesidades energéticas para el desarrollo
- Relaciones e información a la población
- Relaciones e información a los medios de comunicación

Lugar de realización: Centros universitarios (Carrera de Química)

### **Física médica**

*Contenido mínimo*

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- Física de las radiaciones y dosimetría
- Protección radiológica
- Conceptos de Radiobiología
- Conceptos de anatomía y fisiología
- Tópicos especiales
- Contenidos específicos de física de la radioterapia
- Radio-oncología
- Radioterapia externa
- Braquiterapia
- Planificación de tratamiento
- Protección radiológica en radioterapia
- Contenidos específicos de física del diagnóstico por imágenes
- Imágenes planas convencionales
- Imágenes digitales de rayos X y tomografía computarizada (CT)
- Fundamentos de Medicina nuclear
- Instrumentación de cámaras planares, Spect y PET/CT. Control de calidad
- Imágenes de ultrasonido. Instrumentación y control de calidad
- Imágenes de resonancia magnética. Instrumentación y control de calidad

Lugar de realización: Centros universitarios (Carrera de Física, Bioquímica y Farmacia), INAMEN

## **Legislación Nuclear**

*Contenido mínimo:*

- Conceptos básicos de las radiaciones ionizantes
- Organismos Internacionales y sus ámbitos de acción
- Convenios y tratados internacionales
- El Tratado de no Proliferación del OIEA
- Tratados regionales en la Latino América
- Legislación Boliviana, tratados y convenios
- Ley de Radioprotección Boliviana

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

Lugar de realización: Centros universitarios (Carrera de Bioquímica y Farmacia)

## **Geología y Recursos Uraníferos**

Contenido mínimo:

- Fundamentos de física y química nuclear
- Las radiaciones ionizantes, medición e instrumentación nuclear
- El ciclo del combustible nuclear
- Geología de minerales radioactivos, uranio y torio
- Prospección geológica, métodos y técnicas
- Evaluación de recursos minerales radioactivos
- Tecnología del procesamiento de minerales radioactivos

Lugar de realización: Centros universitarios (Carrera de Geología y Geografía)

### **• Cursos de Licenciatura - Mención Nuclear**

Objetivo.-

Formar profesionales en Ciencias o Ingeniería con sólidos conocimientos científicos para trabajar en algún área especializada del sector nuclear que en su momento se halle en plena implementación y consolidación en Bolivia, tanto en servicios, investigación y enseñanza.

Dirigido a: Estudiantes de Ciencias Exactas (Física, Química, Biología), Ciencias Biológicas, Ciencias de la Salud (Farmacia, Tecnología Médica) e Ingenierías. Dependiendo del Plan de estudios y los requisitos que tiene cada Carrera, se definirá el tipo y número de asignaturas en el ámbito nuclear que se han sugerido, para así optar por la Mención Nuclear.

Duración de los asignaturas teóricas y experimentales: 80 horas teóricas y experimentales por semestre.

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

Docentes:

- Docentes titulares
- Docentes Invitados
- Empresas/expertos especializados en el área nuclear
- Los docentes que no sean titulares, serán patrocinados por el Vice

Ministerio de Ciencia y Tecnología en base a convenios.

Las Licenciaturas con Mención Nuclear más relevantes podrían ser como ejemplo:

- Licenciatura en Física Nuclear
- Licenciatura en Radioquímica y Química Nuclear
- Licenciatura en Ingeniería Nuclear
- Licenciatura en Tecnología y Aplicaciones en Energía Nuclear
- Licenciatura en Medicina Nuclear
- Licenciatura en Radiofarmacia

El desarrollo de la Mención Nuclear de estas licenciaturas, debe ser el resultado de discusión y análisis con los profesionales universitarios y considerando la demanda laboral.

Para obtener la licenciatura con Mención Nuclear se deberá cursar un número determinado de las asignaturas que se encuentran entre las disciplinas troncales según la Carrera de Ciencias o Ingeniería que el estudiante cursa.

Lugar de realización: Centros Universitarios nacionales

## **Nivel IV**

### **Cursos de Especialización con grado académico de Diplomado, Maestría y Doctorado**

Objetivo.-

Profundizar el conocimiento teórico y experimental de profesionales que cuentan con

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

la mención nuclear o una profesión nuclear específica a través de la implementación de programas de Diplomado, Maestría y Doctorado.

Dirigido a: Licenciados en Ciencias (Física, Química, Biología), Ciencias Bioquímicas y Farmacéutica, Ciencias de la Salud (Medicina, Tecnología Médica) e Ingenierías con mención nuclear.

Realización: La profundidad de este nivel de formación de recursos humanos requiere necesariamente la cooperación internacional con la firma e implementación de Convenios para recibir en países que cuenten con cursos e instalaciones nucleares ya implementados a profesionales como pasantes, maestrantes o aspirantes al doctorado.

Se sugiere algunos de los campos de especialización: Física Nuclear, Química Nuclear y Radioquímica, Ingeniería Nuclear, Física Médica Nuclear, Los niveles III y IV. Niveles avanzados de conocimiento, sólo tendrán sentido si el gobierno asume la responsabilidad de implementar el plan con o sin instalaciones nucleares.

El rol del estado es importante e insustituible en el desarrollo del tema nuclear, puesto que es el demandante pero a su vez debe ser el oferente del mercado profesional; a la Universidad le cabe formar profesionales con profesión libre como en todas las especialidades, pero las personas formadas en el área nuclear, requieren ser acogidas garantizándose una fuente de trabajo, por lo tanto, como se dijo anteriormente, solo el Estado puede ser capaz de enfrentar este reto.

### **2.5. Implementación**

#### ***1ª Etapa.- Ejecución del Nivel I (A partir de la gestión 2012)***

- Seminarios de socialización del tema a los docentes del nivel I.
- Elaboración de los Planes y contenidos de los cursos de nivel inicial entre los docentes de ciencias naturales y el Ministerio de Educación, donde se incluirá, la temática nuclear, su profundidad, y tiempo de dedicación.
- Elaboración de cartillas y material didáctico para el nivel I.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- Ejecución de la enseñanza del tema nuclear en los diferentes cursos definidos y consensuados.

### ***2ª Etapa.- Ejecución del Nivel II (a partir de la gestión 2012)***

- Seminarios de socialización del tema a los docentes del nivel II.
- Elaboración de los Planes y contenidos de los cursos de nivel secundario entre los docentes de ciencias naturales y el Ministerio de Educación, donde se incluirá, la temática nuclear, su profundidad, y tiempo de dedicación.
- Elaboración de planes y contenidos de los cursos en las escuelas técnicas y Escuela Superior de Formación de Maestros entre los docentes y el Ministerio de Educación donde se incluirá la temática, su profundidad y el tiempo de dedicación
- Elaboración de cartillas y material didáctico para el nivel II.
- Ejecución de la enseñanza del tema nuclear en los diferentes cursos definidos y consensuados

### ***3ª Etapa.- Ejecución del Nivel III (a partir de la gestión 2013)***

Buscar la posibilidad de establecer convenios Interinstitucionales entre Universidad y los Institutos de Investigación y Aplicaciones (IBTEN, CIAN, INAMEN) para que las asignaturas ofertadas puedan ser efectivamente realizadas tanto en forma teórica como práctica.

Los profesionales que no sean docentes universitarios, pero que estén en condiciones de enseñar algunas de las asignaturas específicas referentes al área nuclear, podrán ser contratadas de acuerdo a la reglamentación universitaria y con el patrocinio del Vice Ministerio de Ciencia y Tecnología.

### ***4ª Etapa.- Ejecución del Nivel IV (a partir de la gestión 2013)***

Utilizando convenios existentes con organismos nacionales e internacionales afines al área con el objeto de conseguir pasantías o estadías completas para alcanzar los grados de maestría y doctorado en Bolivia o en otros países.

- **Financiamiento**

La implementación efectiva del Plan de Formación de Recursos Humanos propuesto requiere en primer lugar el compromiso del Estado de consolidar y desarrollar un Programa Nuclear, lo que se debe reflejar en la asignación presupuestaria apropiada y exclusiva para la ejecución del Plan en las etapas que se sugieren más arriba.

Otro nivel de asignación presupuestaria corresponde a financiar estudios para la instalación de equipos e instrumentos nucleares y el fortalecimiento de los centros de investigación existentes. Así mismo, emergentes de discusiones y de las necesidades nacionales futuras, el Estado deberá considerar la creación de otros centros de investigación especializados con la consiguiente asignación presupuestaria.

- **Convenios Interinstitucionales e Internacionales**

El VCyT debe establecer convenios específicos con las universidades del sistema para implementar el Plan de Formación de Recursos Humanos que abarquen muy particularmente los Niveles III y IV, propuestos en este documento.

Además el VCyT juntamente con el IBTEN y la Cancillería debe revisar los Convenios Internacionales de Cooperación ya firmados con países amigos con el objeto de implementarlos en todos sus aspectos, especialmente en lo que se refiere a la capacitación y formación de recursos humanos. En el caso que estos convenios estuviesen caducos, se deberá considerar la posibilidad de firmar nuevos convenios de cooperación y / o ampliación de los ya existentes.

### **2.6 Conclusiones sobre la necesidades de formación de recursos humanos**

Después de haber realizado un profundo análisis con la información obtenida a lo largo de la consultoría, se concluye en primer lugar que en Bolivia no existen planes de formación de recursos humanos especializados en el área nuclear, precisamente porque no hay una línea de investigación en el área, y por lo tanto tampoco existen las condiciones para desarrollar el campo nuclear en Bolivia.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

El rol que debe cumplir el VCyT en la implementación del Plan propuesto es de vital importancia, puesto que su misión es articular y coordinar a todo los potenciales ofertantes y beneficiarios, que en realidad es la sociedad en su conjunto.

El Ministerio de Educación y sus diferentes reparticiones son responsables de los Niveles I y II. Su estructura permite una directa injerencia en la planificación de la educación y en consecuencia el VC y T a través del IBTEN tendrán una participación activa en introducir y desarrollar el Plan en dichos niveles.

Así mismo, la labor del Estado a través del VCyT adquiere pues, con las universidades e instituciones afines, una responsabilidad Mayor en la medida en que debe impulsar la revisión y firma de Convenios para desarrollar no solo los niveles I y II sino los niveles III y IV. Estos niveles no podrán ser implementados sin la participación del Estado.

Paralelamente se consolide la participación de la educación no universitaria, las Universidades del Sistema boliviano y las Universidades Privadas interesadas, deben tomar también como suyo el compromiso de planificar e implementar de acuerdo a su normativa, alentados, promovidos y apoyados por el Estado en la introducción de asignaturas específicas, que en el tiempo se convertirán en programas definidos y ofertados a los estudiantes que los demanden.

Finalmente, la consultoría considera necesaria la creación de una oficina o repartición especializada dentro del VC y T que se ocupe de todo el conjunto de estrategias y acciones que se requieren para encarar de forma apropiada y oportuna el área de la formación de recursos humanos a partir del año 2012, o en su defecto el VCyT debe asignar esta importante tarea al IBTEN, otorgándole la autoridad y recursos necesarios.

### **2.7 Resumen de Conclusiones**

- Las actividades nucleares en el país, a pesar de que las mismas empezaron ya en los años 60 del siglo pasado, son al presente muy escasas y de poco impacto a nivel nacional. Están casi de manera exclusiva circunscritas a las aplicaciones en la medicina en los 6 centros de medicina nuclear entre públicos y privados que

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

operan en el país, además de tres centros de radioterapia y del Centro de Investigaciones y Aplicaciones Nucleares (CIAN-Viacha) dependiente del IBTEN.

- Los universitarios entrevistados, entre profesores y alumnos, manifiestan que tienen interés en conocer a mayor profundidad los alcances y las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear, y que tanto la universidad como los organismos especializados de la estructura gubernamental, debieran hacer más esfuerzos coordinados y de largo aliento, para promover y difundir el conocimiento y aplicaciones prácticas las ciencias y tecnologías nucleares.
- El IBTEN, como brazo ejecutivo del Viceministerio de Ciencia y Tecnología, es la entidad llamada a promover y difundir el conocimiento nuclear y ser el instrumento administrativo central para la gestión de este conocimiento.
- Los pilares fundamentales, conceptuales y estratégicos de un Programa Nuclear, tienen que estar basados en las políticas y estrategias de desarrollo enunciadas en el Plan Nacional de Desarrollo del Estado Plurinacional de Bolivia. Basados en estas políticas, estos pilares se refieren a la Seguridad Energética, Seguridad Alimentaria, Salud y Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación.
- Ningún Programa Nuclear u de otro tipo, podrá ser implementado eficientemente sin el concurso de recursos humanos de alta calificación en el ámbito nuclear. Como estos recursos son demostradamente insuficientes al presente, se ve la necesidad de la formulación de un Plan de Formación de Recursos Humanos, iniciativa que postula el Vice Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- Las universidades deben jugar un rol prominente y activo en la formación de recursos humanos, pero que en la actualidad hay carencia de docentes y profesores especializados en la materia, para lo cual, se debe recurrir a la cooperación internacional de países vecinos, del Organismo Internacional de Energía Atómica y de profesionales que existen en el país fuera de las universidades mismas.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- El Plan de formación de Recursos Humanos que se propone no podrá hacerse realidad si es que el Estado Plurinacional de Bolivia no asume el compromiso de proveer o facilitar la obtención de los fondos necesarios para planificar y ejecutar el plan; establecer convenios y tratados con instituciones nacionales e internacionales que estén en condiciones de cooperar o formar parte del esfuerzo.
- La formación de recursos humanos tendrá sostenibilidad en el tiempo, siempre y cuando obedezca a una política nacional de promover e implementar las aplicaciones energéticas y no energéticas de la energía nuclear. De otra manera, se considera que no es ni siquiera ético motivar a jóvenes universitarios que tomen o inicien el camino nuclear sin las perspectivas de seguridad laboral. Las universidades de ninguna manera iniciarían o adoptarían planes de formación universitaria sin la existencia de un Programa Nuclear.
- El rol que debe cumplir el VCYT en la implementación del Plan propuesto es de vital importancia, puesto que su misión es articular y coordinar a todos potenciales ofertantes y beneficiarios, que en realidad es la sociedad en su conjunto
- El Ministerio de Educación y sus diferentes repartimientos son responsables de los Niveles I y II que tiene la estructura de la Educación en Bolivia y en consecuencia, el VC y T a través del IBTEN tendrá una participación activa en introducir y desarrollar el Plan en dichos niveles.

## CAPITULO III

# Instalaciones Nucleares

### 3.1. Generalidades

Se debe entender por *Instalación Nuclear cualquier tipo de máquina o equipo que genere o produzca radiaciones nucleares ionizantes, neutrones o radioisótopos*. Naturalmente, estas máquinas o equipos tienen que estar instalados en predios y recintos apropiados para su funcionamiento previo a las licencias correspondientes, siguiendo normas de licenciamiento y seguridad establecidas internacionalmente y ser operados por personal altamente calificado con el fin de garantizar una eficiente utilización. Las consideraciones que se exponen más adelante, no entran a describir en ningún detalle las estructuras de ingeniería civil y, solo se hará mención a sus costos estimados.

Sin embargo, en este punto vale la pena aclarar que muchas veces se entiende por una Instalación Nuclear, todo un complejo tecnológico que además de máquinas y equipos, comprende infraestructura de instalaciones físicas y laboratorios, sistemas de seguridad, almacenamiento de material nuclear y repositorio de desechos radioactivos. En el contexto de la presente consultoría, se debe entender por Instalaciones Nucleares a los siguientes tres equipos: 1) reactor nuclear de investigación o también llamado experimental, 2) ciclotrón como un ejemplo de acelerador de partículas, y 3) irradiador multipropósito basado en fotones como los Rayos Gama, o bien, acelerador de electrones que genera Rayos X.

#### Las Radiaciones Ionizantes

*Las radiaciones ionizantes son aquellas radiaciones electromagnéticas también llamadas fotónicas y corpusculares con la energía suficiente para lograr la ionización de átomos o moléculas dando lugar a la formación de iones, es decir, la separación de uno o más electrones de la estructura electrónica de los átomos a partir de átomos neutros de materia, la que puede estar en estado sólido, líquido o gaseoso. Entre las radiaciones consistentes en fotones o radiación electromagnética, tenemos fundamentalmente a los Rayos X y Rayos Gama, en tanto que las radiaciones corpusculares eléctricamente cargadas pueden estar constituidas por electrones negativos y positivos también llamadas partículas beta y positrones respectivamente, partículas alfa y cualquier otra partícula cargada*

eléctricamente capaz de interactuar con la materia causando en ella la ionización de sus átomos.

Como veremos más adelante, las radiaciones ionizantes pueden ser producidas tanto en máquinas como los reactores nucleares (principalmente neutrones), y aceleradores de partículas como electrones que generan rayos-X, o bien, por emisión de decaimiento radioactivo de radioisótopos, tal el caso de rayos alfa, beta o gama; siendo un ejemplo típico las radiaciones gama que se emiten por el Cobalto-60, una radioisótopo artificial que se utiliza extensamente en la cobalto terapia o en plantas de irradiación de alimentos y otros materiales.

Los *Radioisótopos* son isótopos de elementos químicos cuyo núcleo atómico es inestable y por lo tanto capaz de emitir radiaciones, fotónicas o corpusculares, provenientes de su núcleo en periodos de tiempo definidos, llamados periodos de *semi-desintegración o también vida media*, característicos de cada radioisótopo en cuestión. Los radioisótopos pueden ser de origen 'natural'; es decir que existe en la naturaleza y que fueron producidos por procesos naturales en las estrellas y las explosiones de supernovas, o por reacciones nucleares artificiales utilizando reactores nucleares y aceleradores como los ciclotrones a los que nos referiremos más adelante.

Ejemplos de radioisótopos naturales son el Potasio-40, Uranio-238 y Torio-228, en tanto que radioisótopos como el Iodo-131 y Fluoro-18, ambos muy utilizados en la medicina, son producidos artificialmente en reactores nucleares y aceleradores como los ciclotrones respectivamente.

Más adelante en este capítulo se desarrollará el justificativo de estudiar y considerar la implementación de Instalaciones Nucleares en Bolivia como base de una plataforma necesaria para una ejecución efectiva de un Programa Nuclear Boliviano y del Plan en Ciencia y Tecnología Nuclear, que dé sustentabilidad en el tiempo y alcance a nivel nacional e internacional, además de constituirse en incubadoras fértiles para la formación de recursos humanos de alta calificación para el desarrollo e investigación nacional de las ciencias e ingeniería nuclear.

### 3.2. Antecedentes Históricos de los Radioisótopos, Reactores Nucleares y Aceleradores

Los radioisótopos, desde su descubrimiento jugaron un rol muy importante en el avance científico de prácticamente todas las disciplinas del saber humano y gracias que gracias a la investigación científica y tecnológica se encontraron numerosas aplicaciones en varios campos tales como en medicina, las ciencias biológicas y farmacológicas, agricultura y la industria por nombrar algunas áreas.

Desde los finales de los años 20 del siglo pasado, después del descubrimiento de la radioactividad en minerales de uranio por Henri Becquerel en 1896 y los trabajos subsiguientes de los esposos Pierre y Marie Sklodowska Curie en 1898, que se descubrieron los radioisótopos, la importancia y posibles aplicaciones de estos fue comprendida desde un principio por el pionero de lo que conocemos ahora como la 'técnica de los radiotrazadores'.

Tuvieron que transcurrir otros 20 años hasta que se descubriera la radioactividad artificial por Irene Curie, hija de Marie Curie, y su esposo F. Joliot, quienes en 1933 descubrieron la radioactividad artificial.

Aunque muchos radioisótopos (>100 hacia los años de 1935) fueron descubiertos usando fuentes artificiales de neutrones hasta mediados de los años 40, la fuente principal de radioisótopos en cantidades que podrían ser usados en experimentos y aplicaciones reales, como el caso de  $^{32}\text{P}$  para aplicaciones en radioterapia de pacientes con leucemia (J. Lawrence 1936) y el  $^{131}\text{I}$  en estudios y tratamiento de desórdenes de la glándula tiroides (Livinghood y G. Seaborg, 1940), fueron los ciclotrones que cada vez tenían mayor potencia y estaban siendo instalados en muchos laboratorios alrededor del mundo. E. Lawrence pudo conseguir importantes financiamientos para seguir con su trabajo de mejorar los ciclotrones gracias a las posibilidades de las aplicaciones médicas de los radioisótopos.

Ayer como hoy, las aplicaciones médicas de las radiaciones provenientes de los radioisótopos, son uno de los justificativos más fuertes y convincentes para que los países

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

decidan instalar máquinas y equipos para su producción. En el caso de nuestro país, este argumento también es de importancia y relevancia como se discutirá más adelante.

La historia de la producción de RI cambiaría en los años siguientes a la Segunda Guerra, constituyéndose los reactores nucleares como fuente de neutrones, a partir del invento de los reactores por Fermi, en la principal fuente de RI en preferencia a los aceleradores o ciclotrones. La historia volvería a cambiar a mediados de la década del los 60 con el mayor uso de los ciclotrones para la producción de radioisótopos PET (Positron Emission Tomography en inglés).

Con el advenimiento de los reactores nucleares en los años que siguieron a la Segunda Guerra Mundial, el uso de esto para la producción de radioisótopos fue tomando mayor importancia respecto a aquellos producidos en ciclotrones.

Una vez finalizada la Segunda Guerra Mundial, las autoridades de EEUU decidieron muy rápidamente que debían poner a disposición de la comunidad científica y médica radioisótopos para 'aplicaciones pacíficas y humanitarias'. En las tres décadas que siguieron a la Segunda Guerra Mundial, muchos reactores nucleares fueron construidos en los Estados Unidos, Europa, Asia y Latinoamérica, usualmente por las Comisiones de Energía Nuclear de estos países, con lo que la producción de radioisótopos se constituyó en la aplicación más importante de muchas de estas pilas atómicas, ahora llamados reactores nucleares de investigación o experimentales, dando comienzo a una industria pujante y competitiva de radioisótopos y radiofármacos muy organizada en el ámbito mundial, haciendo posible la práctica de la Medicina Nuclear, además de otras aplicaciones en la industria, agricultura y en otras disciplinas.

Al presente, los reactores nucleares y los ciclotrones son las dos fuentes más importantes de radioisótopos artificiales y para otras importantes aplicaciones. Los radioisótopos producidos en reactores nucleares representan la fracción más importante comparada con los producidos en ciclotrones, aunque estos últimos están adquiriendo cada vez mayor importancia en la práctica de la modalidad PET. Los reactores ofrecen las ventajas de irradiación de volúmenes grandes de material blanco, la irradiación simultánea de múltiples blancos que brinda la posibilidad de producción de una variedad de radioisótopos con lo que se favorece la economía de producción.

La gran mayoría de los reactores nucleares de investigación como dijimos antes, fueron y están instalados y operados por organizaciones gubernamentales como las Comisiones de Energía Nuclear y universidades nacionales y algunas emprendimientos comerciales, esto último en países avanzados. La justificación para la adquisición e instalación de un reactor nuclear de investigación siguió en general los siguientes dos principales argumentos: a) como apoyo para la investigación básica y aplicada en diferentes áreas del saber ; pero sobre todo, como una herramienta fundamental e indispensable para la formación y capacitación de recursos humanos en las ciencias e ingeniería nucleares tan necesarios para implementar sus programas nucleares y b) producción de radioisótopos para satisfacer las necesidades de la investigación científica y tecnológica y en las aplicaciones industriales y fundamentalmente de la medicina, tanto diagnóstica como terapéutica.

### **3.3. Tipos de Instalaciones Nucleares o Equipamiento Nuclear**

Siguiendo el concepto de Instalación Nuclear indicado anteriormente, son variadas los tipos de máquinas o equipos que en el transcurso del desarrollo de la ciencia y la tecnología nuclear en los últimos 60 a 70 años fueron diseñados, fabricados y puestos en operación en un gran número de países, tanto en los países industrialmente desarrollados como en los así llamados en vías de desarrollo. De aquí en adelante, por claridad y simplicidad, solo se denominará 'equipo o equipamiento nuclear' o 'instalación nuclear' indistintamente.

En el contexto de esta consultoría, como ya se indicó antes, se clasifican los equipos nucleares o instalaciones nucleares en tres categorías:

- a) Reactores de fisión nucleares
- b) Aceleradores electromagnéticos de partículas
- c) Irradiadores de Rayos Gama usando fuentes radioisotópicas artificialmente producidas, o Rayos X con aceleradores de electrones

Estas tres categorías de equipamiento nuclear, como veremos más adelante, son y pueden ser consideradas relevantes para ser instaladas en el país; por lo tanto en lo que

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

sigue, se desarrollará o describirá en detalle los conceptos fundamentales de estas tres categorías de equipamiento, sus aplicaciones, requerimientos de recursos humanos y financieros para su implantación y eficiente utilización, incluyendo consideraciones de su aplicabilidad y relevancia que coadyuven al desarrollo científico y tecnológico del país.

### a) Reactores Nucleares

Los reactores nucleares (RN) son máquinas en las que se producen reacciones nucleares de fisión en *cadena* (o de fusión en el futuro) de manera *controlada* con fines determinados y específicos, usualmente para producir neutrones que luego son utilizados por un lado, en la investigación fundamental y aplicada y en la producción de radioisótopos, y por otro lado, para generar energía eléctrica aprovechando la gran cantidad de energía producido en la reacción de fisión nuclear.

De esta definición muy general, se desprende que hay dos tipos de reactores nucleares, los reactores llamados de *investigación o experimentales*, y los reactores de *potencia* que son usados en la generación de nucleoelectricidad.

En realidad, hay muchas formas de clasificar a los reactores nucleares, por ejemplo, dependiendo del tipo de reacción nuclear también podemos clasificar a los reactores en reactores de *fisión* basada en las reacciones nucleares de fisión de materiales como Uranio-235 y Plutonio-239 y, reacciones de *fusión* de dos partículas o núcleos atómicos livianos como núcleos de átomos deuterio y tritio (ambos son isótopos del elemento hidrógeno).

También podemos describir un reactor nuclear como un ensamblaje de material llamado *fisible*, usualmente uranio ya sea en su composición isotópica natural ( $^{238}\text{U}=99.7\%$ ,  $^{235}\text{U}=0,07\%$ ) o isotópicamente enriquecido en  $^{235}\text{U}$  a diferentes niveles, o también  $^{239}\text{Pu}$  o  $^{233}\text{U}$ , ensamblado de tal manera que se pueda sostener una reacción nuclear en cadena de una manera controlada.

Una *reacción nuclear* es la interacción entre dos núcleos atómicos, entre un núcleo atómico y partículas elementales, o bien entre fotones y un núcleo atómico en periodos de tiempo muy cortos, del orden de los  $10^{-12}$  segundos. El estudio de estas interacciones

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

es parte de las disciplinas o especialidades de la física y química nuclear. Como podemos imaginarnos, son muy numerosas las posibilidades y tipos de reacciones nucleares, lo que da lugar que exista un campo muy activo de investigación utilizando la gran variedad de partículas que pueden ser utilizadas.

El presente documento técnico se enfocará solamente a los *reactores de fisión* que hacen uso de las reacciones de fisión, puesto que los reactores de fusión todavía están en desarrollo y pasarán muchos años y décadas hasta que sean una realidad tecnológica.

El primer reactor nuclear en el mundo fue desarrollado en la Universidad de Chicago en los Estados Unidos de Norte América por el grupo de investigadores bajo el liderazgo del científico italiano Enrico Fermi. Al mudarse Fermi a la Universidad de Columbia en los EEUU y luego a la Universidad de Chicago un poco antes del inicio de la Segunda Guerra Mundial, tuvo la oportunidad y los medios para continuar sus trabajos de investigación y así pudo construir el primer reactor nuclear en 1942, llamado entonces la 'pila atómica'.

Inmediatamente después, como apoyo a los esfuerzos con fines militares, se construyeron versiones más avanzadas instaladas en el Oak Ridge National Laboratory en Tennessee y en Hanford, Washington, EEUU.

En el transcurso de los años que siguieron a la Segunda Guerra Mundial, numerosos diseños de reactores fueron desarrollados en muchos países avanzados como EEUU, Francia, Inglaterra, Alemania, Japón, China, Corea, India y otros. En la actualidad, según los datos del OIEA, son 437 reactores de potencia que operan en el mundo, y más de 900 reactores nucleares de investigación fueron instalados, de los cuales, unos 250 todavía están en operación.

### **3.4. La Física del Reactor Nuclear**

En el caso de que el material combustible o fisible sea Uranio-235 según la reacción nuclear mostrada más arriba, se liberan en promedio 2.5 neutrones por cada neutrón que se consume para iniciar la reacción y una cantidad enorme de energía proveniente de la transformación de la materia en energía. Puesto que el número de neutrones que se producen es mayor del que se consume, si no hay mecanismos de control que consuma

El exceso de neutrones, esta reacción en cadena crecería exponencialmente, y el calor desarrollado pronto interrumpiría la cadena, o bien, si estaría en un confinamiento apropiado, daría lugar a una gran explosión, típica de las bombas atómicas.

En la física de reactores se considera el concepto del *factor de multiplicación de neutrones* ( $k$ ) que es la relación entre el número de neutrones que se producen por la reacción nuclear, y el número de neutrones que se consumen para iniciar y mantener la reacción. Si  $k=1$ , la reacción en cadena se auto sostiene, se dice que el reactor está en su fase crítica, y supercrítica si  $k>1$ . En el caso de  $k<1$ , el reactor o cualquier conjunto o ensamblaje de material fisionable se dice que es una facilidad subcrítica, en esta situación, la reacción en cadena no es auto sostenible por lo que es necesario tener una fuente externa de neutrones para mantener la reacción de fisión. El  $k$  se modula mediante el uso de barras de control.

En un reactor nuclear en operación, el factor de multiplicación neutrónico  $k$ , se mantiene igual a la unidad o muy ligeramente superior ( 1,01 ó 1,02) mediante materiales absorbentes de neutrones utilizando para este efecto varios materiales como el Cadmio y Boro.

También es importante puntualizar otros aspectos de los reactores nucleares en cuanto a su configuración. Los componentes esenciales de un reactor nuclear son:

- **Combustible nuclear o material fisionable**, es el principal componente que se encuentra en el centro o núcleo del reactor; en la gran mayoría de los reactores se trata de uranio enriquecido en  $^{235}\text{U}$  a diferentes valores, dependiendo del tipo, diseño y usos del reactor.
- **Moderador**, es un material para ‘moderar’ o ‘termalizar’ mediante interacciones o colisiones elásticas y inelásticas la energía cinética de los neutrones de fisión; esto con el fin de incrementar la probabilidad de captura neutrónica por parte del combustible nuclear tal como el Uranio-235. El moderador puede ser agua normal o agua pesada (enriquecida con deuterio) en el caso de los reactores que operan con uranio natural, bien carbono en forma de grafito.

- **Refrigerante** para remover la energía térmica que genera la reacción de fisión. Varios son los refrigerante que se usan para este propósito, siendo el agua normal o también llamada agua ligera el de mayor uso, pues sirve a la vez de moderador y refrigerante. También se usan gases como helio y dióxido de carbono incluyendo sales fundidas como sodio metálico.
- **Barras de control** son fabricadas de materiales con una capacidad muy grande de absorber neutrones regulando de esta manera la potencia de operación del reactor a valores deseables y prefijados. Los materiales de preferencia son el boro y el cadmio o una aleación de cadmio y plata, también se uso hafnio. Estas barras de control están insertadas entre los elementos combustibles y se extraen a tiempo de iniciar la reacción en cadena e incrementar la potencia.
- **Instrumentación de operación** ensamblados en una consola de operación y control de todos los elementos que constituyen el reactor y operada por personal altamente calificado y licenciado por la autoridad regulatoria nuclear. *Tubos y haces de neutrones* que se usan para irradiar muestras in regiones de alto flujo en el núcleo mismo del reactor o para extraer los neutrones fuera del reactor para ser utilizados en diferentes programas.

### 3.5. Tipos de Reactores Nucleares

Durante los más de 60 años de desarrollo de la tecnología nuclear, muchos y variados fueron los tipos o clases de reactores que se diseñaron y que toman en cuenta aspectos como sus posibles aplicaciones, aspectos de seguridad, disponibilidad de materiales, riesgo de proliferación de material nuclear para armas incluyendo aspectos económicos y disponibilidad de recursos humanos.

Los reactores nucleares pueden ser clasificados, de acuerdo a los propósitos específicos de sus diseños, los que toman en cuenta los siguientes tres principios básicos: aplicaciones (investigación o producción de energía eléctrica y mecánica), energía de los neutrones que utiliza para mantener la reacción en cadena (térmicos o rápidos) y clase de moderador que emplea (agua liviana o agua pesada).

Siguiendo la primera clasificación, podemos tener *reactores nucleares experimentales o de investigación* y *reactores nucleares de potencia*. Es importante tener presente que en ambos tipos de reactores, a consecuencia de la reacción nuclear de fisión, se generan neutrones muy energéticos, radiaciones electromagnéticas principalmente rayos gama, y gran cantidad de energía en forma de energía cinética de los fragmentos de fisión que se la puede utilizar en la producción de electricidad en los reactores de potencia.

Qué uso hacemos de los neutrones producto de la fisión nuclear es otro aspecto que distingue un tipo de reactor del otro. En los reactores de investigación, interesa utilizar a los neutrones como iniciadores de reacciones nucleares con fines de investigación y otras aplicaciones prácticas tales como modificación y estudios de materiales y producción de radioisótopos; y en el caso de reactores de potencias, es decir aquellos que generan nucleoelectricidad, se utilizan los neutrones para mantener exclusivamente la cadena de la reacción nuclear de fisión de núcleos fisibles como U-235, según vimos antes.

*Lo que interesa en este capítulo sobre Instalaciones Nucleares son los reactores de investigación también llamados experimentales que generan neutrones los que son subsecuentemente empleados en investigación en diferentes disciplinas y en la producción de radioisótopos, son de diseño y operación más simple, de menor potencia (desde 1 vatios hasta 100MW) y por consiguiente de mucho menor costo, que los reactores de potencia diseñados para producir electricidad, cuyas potencias varían desde 300MW hasta 4500MW de potencia térmicos.*

### **3.6. Reactores de Investigación o Experimentales**

Los Reactores Nucleares de Investigación jugaron un rol importante en el desarrollo científico y tecnológico de muchos países que decidieron establecer planes y programas de energía nuclear, desde los comienzos mismos de la denominada Era Nuclear allá por los finales de los años 40 del siglo anterior.

Con la utilización de los reactores nucleares de investigación, la energía nuclear y sus aplicaciones pacíficas demostraron su alto grado de contribución en el desarrollo científico y tecnológico de los países, que va desde la formación de recursos humanos de alta calificación, pasando por los avances científicos en las ciencias básicas como física,

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

química y biología, hasta sus aplicaciones pacíficas de demostrado impacto en la medicina, industria y agricultura.

En el mundo, según el Organismo Internacional de Energía Atómica, más de 900 reactores nucleares de investigación fueron instalados, aunque a la fecha, solo quedan en operación alrededor de 234. Con la excepción del Paraguay, todos los países vecinos de Bolivia, tienen ya por muchos años, muy bien definidas sus políticas nucleares, las que se reflejan en los avanzados programas tecnológicos, por ejemplo, la construcción y operación de centrales nucleares de generación de electricidad, tal el caso de Argentina y Brasil. Por otra parte, Argentina, Brasil, Chile, Colombia y Perú, operan reactores nucleares de investigación, con los que dieron inicio a sus programas nucleares de corto, mediano y largo plazo. Además de los EEUU y Canadá, en el continente americano, México y Jamaica operan reactores nucleares de investigación.

Los reactores de investigación también llamados experimentales son esencialmente fuentes de neutrones térmicos (0,025 eV de energía), epitérmicos (1eV-100 KeV) y rápidos ( $>100$  KeV) que operan a potencias que varían desde unos pocos vatios (0,1 vatio) hasta 100 MW produciendo flujos de neutrones térmicos en el rango de  $10^9$  hasta  $10^{15}$  neutrones por segundo y por centímetro cuadrado ( $n/\text{seg} \cdot \text{cm}^2$ ). La gran mayoría de estos reactores usan neutrones térmicos para propagar la cadena de fisión y por lo tanto usan moderadores como agua normal o grafito y tiene que ser refrigerados para disipar el calor liberado en la fisión, con excepción de los reactores de muy baja potencia ( $\leq 1$  Kw) o potencia nominal cero (0,1 vatio) que son refrigerados por convección natural del aire. Los refrigerantes más empleados son el agua normal que sirve también como moderador, aunque algunos diseños emplean agua pesada ( $D_2O$ ).

Los reactores de investigación *tipo piscina* son los más populares en todo el mundo. Estos reactores tienen el núcleo suspendido en el centro y al fondo de una piscina abierta de concreto de 6-8 m de profundidad y 2-5 m de ancho llena de agua normal muy pura que sirve de moderador, reflector, refrigerante y barrera protectores de radiaciones. El núcleo del reactor puede ser observado desde la superficie del agua de la piscina. El espesor de las paredes de concreto es de aproximadamente 2 m cuando el reactor está construido sobre la superficie del terreno. Este tipo de reactores producen altos flujos neutrónicos del orden de  $10^{14}$   $n/\text{seg} \cdot \text{cm}^2$  a potencias operativas de 10-30 MW<sub>t</sub> ( megavatios térmicos)

Otro tipo de reactor bastante difundido, sobre todo en los países de la ex Unión Soviética, es el tipo *tanque-piscina*, que es muy similar al tipo piscina, siendo la principal diferencia que el tamaño de la piscina es considerablemente más pequeño puesto que el núcleo que también es pequeño y compacto, está contenido en un tanque de acero inoxidable dentro de la piscina. Esto hace posible que se logren mayores potencias usando refrigeración forzada mediante bombas. Con este tipo de reactores se logran altas intensidades de flujos del orden de los  $10^{15}$  n/seg  $\text{cm}^2$  usando combustibles con alto enriquecimiento de U-235, del orden de 90%.

Aunque en realidad a lo largo del desarrollo tecnológico de reactores de investigación fueron diseñados una gran variedad de reactores, el 80 % de los reactores son de los tipos descritos más arriba. En ambos tipos de reactores es posible la instalación de tubos y canales de acceso a los neutrones, aspecto fundamental para su utilización práctica.

En la actualidad se estiman que están en operación más de 250 reactores en 56 países, más de 400 que fueron ´decomisionados´ o dados de baja en los últimos años.

Muchísimas fueron las versiones de reactores nucleares de investigación que a lo largo del tiempo fueron construidos y operados en diferentes partes del mundo en la segunda mitad del siglo anterior. En la actualidad, se tiene información que el mercado se consolidó en unas pocas compañías a nivel mundial; entre estas podemos mencionar a INVAP de Argentina, TRIGA de la General Atomic de EEUU, AREVA en Francia, Atomic Energy of Canada Ltd (AECL) y China. Vale la pena mencionar que también otros países como Corea, Rusia e India entre otros tienen la posibilidad tecnológica de fabricar reactores de investigación. No se conocen que otros países fuera de los mencionados que estén activamente envueltos en su producción comercial.

### **3.7. Reactores de investigación que por su diseño y tipo de aplicaciones que pueden ser aplicados para Bolivia.**

TRIGA (**T**rainig, **R**esearch and **I**sotope production **G**eneral **A**tomic **G**A), de los Estados Unidos de Norte América que empezó a operar por primera vez en el año 1958. Diseñado por E. Teller como un reactor tan seguro que podría ser operado

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

por estudiantes graduados. Estos reactores pueden ser instalados en cualquier edificio y fue diseñado para el uso de instituciones científicas y universidades con el propósito de educación e investigación universitaria, centros médicos y laboratorios industriales y comerciales además para la producción de radioisótopos. Es un reactor del tipo piscina muy difundido en todo el mundo

Las versiones más interesantes son el Mark II y Mark III. En términos de potencia, General Atomic fabrica reactores desde 20 KW hasta 16MW. En total, 66 reactores TRIGA fueron instalados en el mundo entre los que podemos indicar, Brasil, Colombia y México en la América Latina. Al presente están en operación 43 reactores en 24 países. Según informa la firma GA.

La mayoría de estos reactores están instalados en instituciones de investigación ya sea en universidades o centros nucleares. Es un reactor ideal para iniciar programas de investigación y formación de recursos humanos en ciencia e ingeniería nuclear y con posibilidades de una amplia gama de aplicaciones.

Se tiene conocimiento que en la actualidad se está instalando un reactor TRIGA en Marruecos en el Centro Nacional de Ciencias, Energía y tecnología Nucleares (CNESTEN) del tipo Mark III con una potencia inicial de 2 MW.

- SLOWPOKE (Safe Low-Power Kritical Experiment) diseñado y manufacturado por la Atomic Energy of Canada Ltda. ( AECL) y puesto en operación por primera vez en el año 1976 en la Universidad de Toronto. Se trata de un reactor de tipo piscina que al comienzo operaba con uranio de alto enriquecimiento (aprox. 90%), pero a la fecha, los 7 reactores que en total se construyeron e instalaron (6 en Canadá y 1 en Jamaica) fueron todos modificados para usar uranio de bajo enriquecimiento, 17 %. La potencia operativa es de 5 KW<sub>t</sub> con flujos neutrónicos de  $10^{12}$ n/seg.cm<sup>2</sup>. Todos estos reactores fueron instalados en universidades pues son muy utilizados en la capacitación de recursos humanos en ciencias y tecnología nuclear como así también para varias aplicaciones como Análisis por Activación Neutrónica y radiografía neutrónica.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

Las últimas informaciones que se tienen indican que la organización AECL ha discontinuado la fabricación de este tipo de reactor nuclear.

- INVAP, Argentina, es una empresa argentina de alta tecnología dedicada al diseño, integración y construcción de plantas, equipamiento y dispositivos para energía nuclear, tecnología espacial e industrial como también de equipo médico y científico.

Esta empresa argentina a participado en el diseño y fabricación de reactores incluyendo el equipo de utilización demás de realizar estudios de emplazamiento. Hasta la fecha lleva construido 6 reactores de investigación, dos en Argentina y cuatro fuera de su país: en Perú el RO-0 y el RP-10 en 1978 y 1988 respectivamente, en Argelia el NUR en 1989, en Egipto el ETRR-2 en 1997 y el último el OPAL en Australia en 2007. Este reactor en Australia se lo considera el más moderno del mundo en su tipo y será utilizado en investigaciones científicas y en la producción de radioisótopos principalmente.

País	Ubicación	Puesta en Marcha	Nombre	Potencia Térmica	Notas
 Argelia	Argel	1989	NUR	1MW	Vendido al Alto Comisariado para la Investigación del gobierno argelino.
 Argentina	Pilcaniyeu	1997	RA-8	100 W	Construido para la CNEA. Facilidad crítica para estudiar el comportamiento neutrónico del núcleo del reactor Carem.
 Argentina	Bariloche	1982	RA-6	500 kW	Para la CNEA.
 Australia	Sydney	2007	OPAL	20 MW	Vendido a la Organización Australiana para la Ciencia y la Tecnología Nuclear (ANSTO).
 Egipto	El Cairo	1997	ETRR-2	22 MW	Vendido a la Autoridad de Energía

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

					Atómica de Egipto
■ ■ Perú	Huarangal	1988	RP-10	10 MW	Provisión del sistema de instrumentación nuclear al Instituto Peruano de Energía Nuclear.
■ ■ Perú	Lima	1978	RP-0	10 W	Provisión del sistema de instrumentación nuclear al Instituto Peruano de Energía Nuclear.

Fuente: página web de INVAP

Se tiene información no oficial que INVAP está diseñando un reactor de investigación de baja potencia, del orden de 10 a 30 KW, para investigación básica y aplicada además de la formación de recursos humanos en el área nuclear. *Si la información resultare correcta, en opinión de la consultora, este diseño sería muy adecuado para el caso de Bolivia, además de que existen buenas referencias sobre la empresa INVAP como un proveedor confiable de reactores nucleares de investigación.*

- MNSR (Miniature Neutron Source Reactor, República Popular de China). Es un reactor de baja potencia fabricado por el Instituto de Energía Atómica de China (CIAE), de tipo tanque-piscina siguiendo diseños conceptuales derivados del SlowPoke canadiense que mencionamos antes, el primero de los cuales entró en operación el año 1984. Opera a uranio de alto enriquecimiento (90%) a una potencia de 27KWt aunque con la cooperación del OIEA, en la actualidad, se está trabajando en lograr que sean reconvertidos a uranio de bajo enriquecimiento. Se tiene información que además de los 4 MNSRs que operan en China, Pakistán, Ghana, Irán, Nigeria y Siria operan uno cada uno. Con flujos neutrónicos térmicos de  $10^{12}$  n/seg.cm<sup>2</sup>, su utilización es muy versátil, va desde la formación de recursos humanos hasta su utilización en ciencias biológicas, ambientales, geológicas, etc. *Por ejemplo, el Servicio Geológico de Shandong en China, tiene en sus instalaciones operando un reactor de este tipo para el mapeo de composiciones químicas en rocas y estratos geológicos.*

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

En los últimos años, CIAE está desarrollando una versión basada en combustible de uranio-235 debajo enriquecimiento llamado IHNI que tiene, además de posiciones de irradiación en el núcleo, dos haces horizontales de neutrones para ser usados en experimentos de física y terapia por captura neutrónica de boro (BNCT), educación y formación de recursos humanos.

Reactores del tipo MNSR que están instalados al 2011

No.	Nombre	Año de Criticidad	Combustible
1	Proto type MNSR	1984.3	90%
2	Shenzhen	1988.11	90%
3	Shandong	1989.5	90%
4	Pakistán	1989.10	90%
5	Shanghái	1991.1	90%
6	Irán	1992.4	90%
7	Ghana	1995.11	90%
8	Siria	1996.3	90%
9	Nigeria	2004.3	90%

Se tiene información que los nuevos reactores de esta empresa, por razones de convenios internacionales, los nuevos reactores que se vayan a fabricar en el futuro, serán con combustibles de bajo enriquecimiento, menor al 20%.

La aplicación más común de este reactor es en Análisis por Activación Neutrónica en diferentes áreas según lo informa el fabricante de China además de, en las versiones con extracción de haces de neutrones, en experimentos de física neutrónica y en terapia por captura de neutrones por boro. *Esta aplicación analítica, es muy relevante para los programas de exploración de recursos minerales del SERGEOTECMIN.*

- Atomic Energy of Canada, AECL, Laboratorios del Chalk River, Canadá, que produce dos reactores de interés.

MMIR-1 – MAPLE reactor para la producción de isotopos para medicina

MMIR-2 – MAPLE reactor para la producción de isotopos para medicina

La empresa AECL está al presente evaluando su programa de fabricación de estos reactores de política interna.

La base de datos del Organismo Internacional de Energía Atómica contiene información de todos los reactores nucleares en operación en el mundo. En esta base de datos se puede encontrar información técnica, como tipo y potencia térmica, flujo de neutrones, etc., de cada uno de los reactores por regiones geográficas. [www.nucleus.iaea.org/RRDB/](http://www.nucleus.iaea.org/RRDB/)

### **3.8. Alternativa de Reactor Nuclear o Facilidad Sub-Crítica**

Este tipo de reactores se diferencia en que el ensamblaje de elementos combustibles tiene un factor de multiplicación neutrónica  $K$ , contrario a los reactores de se mencionaron anteriormente, menor a la unidad ( $K \leq 1,000$ ) pero que produce reacciones de fisión sin entrar en criticidad, por lo que no es auto-sostenida requiriendo una fuente externa de neutrones para mantener la reacción nuclear de fisión y la criticidad. Numerosos fueron los países y laboratorios que instalaron este tipo de facilidad sub-crítica, pues son invalorable en la educación y formación de recursos humanos en varios aspectos relacionados con la física e ingeniería de reactores. Además es muy segura su operación y puede ser operado por estudiantes.

Se tiene información que en nuestra región, Argentina, Brasil y Perú tienen facilidades sub-críticas desde ya hace muchos años y que fueron y son extensamente utilizados en la formación de científicos e ingenieros nucleares. La facilidad sub-crítica del Perú, el RP-0 fue fabricado e instalado por INVAP de Argentina en el año 1978 de una potencia nominal de 10 W.

*Para el caso boliviano, es bastante razonable pensar que una facilidad sub-crítica podría cumplir muy bien con el rol de formación de recursos humanos a un costo inferior a lo que podría costar un reactor crítico aunque sea de muy baja potencia.*

### 3.9. Reactores de Investigación en América Latina

El Informe Final del Proyecto del OIEA, ARCAL RLA0037: Producción y Usos de Radioisótopos y Radiofármacos en América Latina, muestra los siguientes reactores que operan en la región y que están dedicados a la producción de radioisótopos:

TABLA 2-A REACTORES NUCLEARES DE INVESTIGACIÓN EN LATINOAMÉRICA							
País	Nombre	Tipo	Primera Criticalidad	Potencia	Flujo Neutrónico n / cm <sup>2</sup> .s		
				MW	Térmico	Epitérmico	Rápidos
Argentina	RA3	Piscina	5/17/1967	10	2.20E+14	9.20E+12	4.40E+13
Brasil	IEA-R1	Piscina	9/1/1957	5	6.10E+13	3.50E+13	6.10E+12
Colombia	IAN-RI	TRIGA	(1)	0.03	7.80E+11	(2)	(2)
Chile	REACH-1	Piscina	10/13/1974	5	8.24E+13	5.90E+13	2.82E+13
México	TRIGA MARK III	TRIGA	11/8/1968	1	3.20E+13	InD	3.10E+13
Perú	RP10	Piscina	11/30/1988	10	1.12E+14	5.04E+12	1.00E+10

InD Información no disponible

(1) El IAN-R1 alcanzó su primera criticalidad el 20/02/1965 con combustible MTR, el que luego fue cambiado a combustible TRIGA.

(2) Flujos todavía no determinados

Como se mencionó antes, las presidentas de Argentina y Brasil, firmaron hace muy poco un acuerdo por el cual, INVAP fabricaría dos reactores de investigación de diseño moderno con una potencia de 20 MW para la investigación nuclear y la producción de radioisótopos a ser instalados uno en cada país. En ambos casos, se estima que estarían en operación entre 5 a 7 años y que llevaría una inversión considerable que fácilmente superior a los 100- 200 millones de dólares cada uno.

### 3.10. Fabricantes de Reactores de Investigación

*La información que se da a continuación adquiere importancia a la hora de requerir mayor información técnica y establecer contactos con los fabricantes de este tipo de reactores que son los más apropiados para el caso boliviano. Además es relevante para preparar términos de referencia ya sea para estudios de pre o de factibilidad.*

En la historia de los reactores nucleares de investigación, se puede verificar que muchos países en el mundo tuvieron y tiene la capacidad de manufacturar reactores. Dentro de los países industrializados podemos mencionar a Estados Unidos, Canadá, Francia,

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

Reino Unido, Alemania, Japón, Rusia y entre los llamados emergentes mencionaremos Corea, China y Argentina. Este último es el único país de la región latinoamericana que tiene esta capacidad.

Es interesante resaltar este hecho de que Bolivia tiene un país vecino y amigo que posee la tecnología de fabricar reactores nucleares y otras instalaciones nucleares como ser plantas de irradiación basadas en Cobalto-60, además de producir el mismo Cobalto. INVAP, una empresa descentralizada del Gobierno de Argentina, que trabaja y opera en estrecha colaboración con el Gobierno de Argentina mediante la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) ya diseñó y fabricó 5 reactores nucleares en el mundo, fuera de Argentina, el primero de ellos en 1980.

Los gobiernos de Argentina y Brasil anunciaron recientemente la construcción por INVAP de dos reactores de investigación para la producción de radioisótopos que deberán entrar en operación en los próximos 5 a 10 años.

### **Fabricantes de Reactores Nucleare de Investigación**

La Consultora entró en contacto para recabar información con INVAP de Argentina y GA de los EEUU gracias a la participación del Director Ejecutivo del IBTEN, y CIAE de la República Popular de China, los que dieron información técnica muy superficial y no tipo económica. Lamentablemente no se tuvo respuesta de AECL del Canadá. Se tiene conocimiento informal que Rusia estaría interesada en fabricar reactores de investigación para la exportación, pero tampoco en este caso fue posible obtener ni comunicación ni contacto.

### **INVAP, Argentina**

Contacto:

Dr. Juan José Gil

Dr. Marcelo Salvattore

Esmeralda 356 1° piso

(C1035ABH) Buenos Aires

Argentina

Teléfono: 54 (11) 4394 3344

### **General Atomic, TRIGA, Estados Unidos**

Contacto:

Roy E. Ray

TRIGA Reactor Programs Manager

GA, Electronic Systems, Inc. [roy.ray@ga-esi.com](mailto:roy.ray@ga-esi.com)

General Atomics Electronic Systems, Inc.

4949 Greencraig Lane

San Diego, CA 92123

USA

001-(858) 522-8300

001-(858) 522-8229

001-(858) 522-8301 fax

### **MNSR. República Popular de China**

China Institute of Atomic Energy

Contacto:

Dr. Li Yiguo

Head of MNSR Lab.

China Institute of Atomic Energy

P.O.Box 275-75

Beijing, 102413

P.R.China

### **3.11. Aplicaciones de los Reactores de Investigación o Experimentales**

Al ser en realidad los reactores nucleares de investigación una fuente de neutrones, la aplicación de estas complejas y caras máquinas, sus aplicaciones entonces están basadas en la utilización de estos neutrones. Estas aplicaciones van desde las ciencias básicas y aplicadas, hasta las de ingeniería y ciencia biológicas, ambientales, geológicas, de materiales.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

El siguiente listado muestra de una manera general aquellas áreas en las que se encontraron aplicaciones que contribuyeron al desarrollo científico y tecnológico en los países en que instalaron los reactores nucleares:

- Producir radioisótopos que se utilizan como radiotrazadores en medicina y en la industria
- Analizar la composición de los materiales mediante técnicas no destructivas como el análisis por activación neutrónica
- Dopado de Silicio para la industria electrónica
- Desarrollar procedimientos de la utilización de neutrones en la terapia del cáncer
- Investigar las interacciones de las radiaciones, en particular de los neutrones con la materia
- Investigar fenómenos físicos de la estructura del átomo
- Investigar las interacciones de los neutrones en los núcleos de los reactores
- Desarrollar procedimientos de seguridad y protección radiológica
- Capacitar personal en la operación y mantenimiento de reactores nucleares
- Enseñanza y formación de recursos humanos en el área de las ciencias y tecnología nuclear incluyendo la formación de comunicadores y profesionales de la información mediática y del público en general.
- Capacitación en aspectos fundamentales de la física de neutrones y otros aspectos aplicables a la operación de reactores de potencia.
- Capacitación y Formación de recursos humanos en preparación y apoyo a programas de generación de electricidad mediante reactores nucleares de potencia.

*Es importante señalar que no todas estas potenciales aplicaciones son relevantes o posibles para Bolivia, puesto que dependen de los programas de utilización que quiera establecerse, del financiamiento y disponibilidad de recursos humanos, como también del tipo, capacidad de reactores que pudiese ser instalado en el país y de las instalaciones de laboratorios e infraestructura física adyacentes a la instalación.*

### 3.12. Costos de los Reactores de Investigación

Es difícil tener costos precisos de reactores nucleares puesto que los mismos varían dependiendo de la complejidad tecnológica del reactor, que a su vez depende de los usos que se quieran dar al mismo y de la potencia del reactor que se expresa en MWt, parámetro que tiene relación directa con el flujo neutrónico, a mayor potencia mayor flujo pero los costos también son mayores.

En general se puede decir que reactores de baja potencia, es decir del orden de unos pocos vatios (< 10 vatios, reactores de potencia cero o facilidades sub-críticas) hasta unos 10 o 30 KWt, los costos pueden oscilar de 6 a 10 millones de dólares americanos o en algunos casos, hasta 20 millones de US\$. En el caso de reactores del rango de 100 KWt y más, los costos suben muy rápidamente llegando hasta las varias decenas de millones de dólares. Se tiene información no oficial de que para los reactores de 10MW el costo total de la instalación podría oscilar entre 80 a 100 millones de dólares. Para obtener costos concretos de parte de los fabricantes, es necesario que se tenga una definición por lo menos mínima de los requerimientos y aplicaciones previstas.

Estos costos no incluyen la infraestructura de ingeniería civil, ni de los estudios y licencias de emplazamiento como tampoco los relacionados con la instrumentación e instalaciones de laboratorios. Estos costos pueden llegar ser iguales a los costos del reactor mismo.

*Poder precisar con mayor detalle y certeza estos costos, requerirá de estudios más profundos y avanzados tal como los que se puede obtener de un estudio de pre o bien de factibilidad.*

### 3.13 Reactores de Investigación Relevantes para Bolivia

*Criterio 1: Seguridad e independencia energética y políticas y estrategias de desarrollo (aplicaciones energéticas)*

*Criterio 2: Programas de utilización no energética.*

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

Obviamente, existen otros criterios que también deben tenerse presente, entre los que podemos mencionar, el costo total de la instalación, los costos relacionados con la operación y el mantenimiento, costo de reemplazar el combustible nuclear, etc. que suman apreciables cantidades de dinero. En el mundo hay muchos ejemplos de una sub utilización de los reactores de investigación por no contar con el suficiente recurso financiero para su operación y mantenimiento, incluyendo la escasez de recursos humanos.

A continuación el detalle de los criterios arriba mencionados como los más importantes.

- *Criterio 1. Seguridad e independencia energética y Políticas y estrategias de desarrollo:* estas están fundamentalmente relacionadas con el Plan de Desarrollo Nacional en lo que se refiere a implementar el Programa Nuclear Boliviano que busca contribuir a lograr la diversificación de las fuentes de energía y lograr de esta manera, una mayor seguridad energética. Desde esta perspectiva, es decir de la perspectiva de la Opción Nuclear de generación de energía nucleoelectrónica en el futuro, el reactor nuclear a implementarse tendría que ser de un diseño que permita la mayor flexibilidad posible para ejecutar programas de capacitación en ingeniería nuclear, física de reactores, investigar las interacciones de los neutrones en los núcleos de los reactores, desarrollar procedimientos de seguridad y protección radiológica, y fundamentalmente, de capacitar personal en la operación y mantenimiento de reactores nucleares.
- *Criterio 2. Programas de utilización no energética:* que tiendan a apuntalar el desarrollo científico y tecnológico del país mediante la incorporación de las aplicaciones no energéticas de la Energía Nuclear, incorporando aquellas aplicaciones que ya demostraron relevancia práctica como ser aplicaciones en la medicina, industria y en las ciencias de materiales, ciencias ambientales, biológicas, físicas, químicas, hidrológicas y geológicas, solo para mencionar algunas de estas. Desde esta perspectiva, el diseño tiene que ser tal que facilite el acceso a los neutrones tanto en el núcleo del reactor, como también la extracción de haces de neutrones fuera del núcleo para experimentos en física, ingeniería nuclear y el resto de las aplicaciones que se mencionan antes. La operación también tiene que ser sencilla y segura como para que pueda ser operado por

profesionales calificados y licenciados apropiadamente, incluyendo estudiantes avanzados.

*Para el caso boliviano, lo más recomendable será tratar de combinar en un solo diseño ambos criterios. Es posible encontrar en cualquiera de los ejemplos de reactores mencionados anteriormente, tales como los TRIGA, el MNSR de China y el de INVAP de Argentina.*

Tampoco se debe olvidar que los fabricantes de reactores tienen la flexibilidad de incorporar aspectos especiales que el cliente requiera, aunque esto pudiese encarecer la instalación. Es importante señalar que es muy difícil establecer comparaciones muy estrictas entre los muchos diseños que se tienen en los reactores instalados en el mundo, inclusive, una misma empresa no duplica el mismo reactor para comercializarlo. El diseño final sobre el cual se pagará un precio determinado, es definido entre el comprador y el vendedor en base a muchos parámetros, entre ellos, el diseño técnico final. De los reactores instalados en el mundo, son en realidad muy pocos los que son copia uno del otro.

*Combinado las conveniencias de los dos criterios anteriores y considerando el costo inicial de inversión, se propone reactores de potencia baja, en el rango de 1 vatio, como lo sería un reactor de potencia cero como en el caso del RP-0 del Perú, hasta un máximo de 30 KWt, como lo sería el MNSR de China o el RA6 en Argentina construido por INVAP.*

En todo caso, este aspecto tendrá que ser desarrollado a mayor profundidad en un estudio de pre o de factibilidad, lo que sería recomendable que se encare en la gestión del 2012. Se debe tener en cuenta que la instalación de un reactor nuclear, por más de potencia baja que sea, lleva considerable esfuerzo y requiere de recursos financieros mayores en un periodo de 3 a 5 años.

### **3.14. Criterios para Posibles Emplazamientos**

Hablar de posibles emplazamientos, implica analizar este aspecto desde varios puntos de vista, no necesariamente compatibles entre sí. Por un lado, se debe tener en cuenta los fines u objetivos que se buscan al instalar un reactor nuclear, incluyendo la existencia de infraestructura académico-científica de las universidades de la ciudad o departamento en

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

cuestión que soporte efectivamente un vigoroso programa de utilización y de formación de recursos humanos, y por otro, de decisiones de índole político-estratégico del gobierno nacional que tiene que ver con una visión más de mediano y largo plazo de desarrollo industrial, tecnológico y científico del país como un todo y muy en particular, si el país efectivamente, introducirá la energía nucleoelectrica en su portafolio energético a mediano o largo plazo.

A pesar de lo manifestado más arriba, en términos generales, para el caso que nos ocupa, la instalación de un reactor nuclear en Bolivia de baja o mediana potencia, como discutimos antes, el reactor tiene que estar emplazado, según la opinión de la consultora, *en una ciudad donde exista el soporte decidido de una universidad con carreras en ciencias naturales y exactas (física, química, biología, geología, etc.) e ingeniería (mecánica, eléctrica, electrónica, industrial, química, etc.) activas con docentes de alta calificación; deseable sería también, que exista industrias químicas, de alimentos y mineras que puedan hacer uso de los servicios que pueda brindar el reactor nuclear.*

Muchos reactores pequeños fueron instalados en predios universitarios en medio de las ciudades; en Latinoamérica tenemos el ejemplo de Perú con el reactor RP-O y el de Brasil, el IAE-10 situado en el campus universitario en el barrio urbano de Pinheiros de la Universidad de Sao Paulo o en mismo caso del reactor de Chile, el REACH-1 de 5 MW de potencia instalado en la misma ciudad de Santiago, en el barrio de la Reina.

En el mundo existen numerosos ejemplos de reactores de investigación instalados en un campo universitario, convirtiéndose en parte en reactores universitarios. Este emplazamiento ofrece la incuestionable ventaja de que se contaría con un capital humano sostenible de jóvenes estudiantes y profesionales, además de los profesores universitarios, cosa que a veces no es posible cuando el reactor está instalado en una localidad alejada de la ciudad o del campus universitario.

Queda claro entonces que el poder definir con precisión un lugar dónde un reactor nuclear de investigación pueda ser emplazado, es una decisión compleja, que lleva tiempo y que necesariamente tiene que ser consensuada con diferentes grupos de interés, actores e involucrado. El OIEA ha desarrollado procedimientos que ayuda a la selección del sitio del

emplazamiento, por lo que la Consultoría recomienda seguir este ya probado procedimiento.

Si se llega a realizar un estudio de pre o de factibilidad, este punto de la selección del emplazamiento, será entre otros, objeto de cuidadoso análisis.

### **3.15. Reactores Nucleares de Potencia (RNP)**

Los RNP son reactores diseñados para la utilización de la energía liberada por los procesos nucleares de fisión, usualmente de Uranio-238 y de Plutonio-239, en generar calor para la producción de vapor de agua unos 300 grados centígrados que mueve turbinas convencionales que generan electricidad. Son más complejos que los reactores experimentales, de mayor potencia, generalmente que van del rango de 200 MWe hasta los más modernos de 1000 y hasta 1600 MWe.

El primer reactor de potencia (5 MWe) que se construyó fue en la ex - Unión Soviética en el centro nuclear de Obninks en el año 1954 generando electricidad para las necesidades del mismo centro hasta el año 1959. El primer RNP comercial se instaló en el Reino Unido en el año 1956 en la localidad de Calder Hall, fue del tipo grafito-gas de 50 MWe de potencia. Durante los últimos 50 a 60 años, fueron puestos en operación cerca de 500 reactores y que, según el OIEA, en el año 2010 estaban en operación 443 reactores en 26 países, generando más de 15 % de la electricidad consumida en el mundo, es decir, una capacidad combinada de 370 GWe.

Una planta nuclear, como también se llaman a los RNP, es en realidad una instalación industrial para generar electricidad de forma comercial a partir de la fisión nuclear. Un gran número de RPN son operados por empresas privadas dedicadas a la producción, distribución y comercialización de electricidad.

Las ventajas de los reactores nucleares de fisión son varias. Una de las ventajas es que casi no emiten contaminantes al aire (aunque periódicamente purgan pequeñas cantidades de gases radiactivos), y los residuos producidos son muchísimo menores en volumen y más controlados que los residuos generados por las plantas alimentadas por combustibles fósiles. En esas centrales térmicas convencionales que utilizan combustibles fósiles (carbón, petróleo o gas), se emiten gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

principalmente), gases que producen lluvia ácida ( $\text{SO}_2$  principalmente), metales pesados, miles de toneladas anualmente de cenizas, e incluso material radiactivo natural concentrado. En una central nuclear los residuos sólidos generados son del orden de un millón de veces menores en volumen que los contaminantes de las centrales térmicas.

El uranio enriquecido utilizado en las centrales nucleares no sirve para construir un arma nuclear ni para usar uranio procedente de ellas. Para ello se diseñan los reactores en ciclos de alto enriquecimiento o bien se usan diseños avanzados usados para la generación de plutonio. El enriquecimiento en general es del orden de los 3-5 %.

Sin embargo las desventajas de los reactores nucleares de fisión son también grandes.

La percepción de peligro en la población proviene de varios factores: 1) accidente en una central atómica, 2) ataque terrorista, 3) peligrosidad de los residuos y su alto poder contaminante del medio ambiente, 4) basureros nucleares, 5) posible desviación de los residuos para la producción de armas de destrucción masiva. Los reactores nucleares generan residuos radiactivos. Algunos de ellos con un semiperiodo elevado, como el americio, el neptunio o el curio y de una alta toxicidad. Los detractores de la energía nuclear hacen hincapié en el peligro de esos residuos que duran cientos e incluso miles de años.

Algunas centrales también sirven para generar material adicional de fisión (plutonio) que puede usarse para la creación de armamento nuclear. Dicho interés en la creación de dichas sustancias impone un diseño específico del reactor en detrimento de la ecología del mismo. Los accidentes nucleares más graves han sido: Mayak (Rusia) en 1957, Windscale (Gran Bretaña) en 1957, Three Mile Island (EE. UU.) en 1979, Chernóbil (Ucrania) en 1986, Tokaimura (Japón) en 1999 y Fukushima (Japón) 2011.

A estos accidentes, se le suma la pérdida económica que generan los basureros nucleares y el temor de una disposición inadecuada de los residuos nucleares. El cual está vinculado a un factor económico. Cuando se calcula el costo del Kw hora generado en una planta atómica, no se incluyen los costos de los basureros nucleares. De incluirse este costo, el Kw hora es el más caro de todos los sistemas de producción de energía. Por esta razón, hay pocos basureros nucleares que cumplan los requisitos mínimos de seguridad. Y la disposición de los residuos ha sido, y sigue siendo, un tema de controversia.

En la América Latina 6 RNP están en operación, dos en Argentina que genera el 3 % de su consumo de electricidad, 2 en Brasil generando cerca del 3 % y dos en México, generando cerca del 5 % de su consumo de electricidad.

Los costos de estos reactores, que incluyen las instalaciones de generación de vapor y electricidad, son muy elevados; la industria nuclear anunciaba costos de cerca de 3 a 4 millones de dólares por megavatio de electricidad generada; sin embargo, después del accidente de Fukushima, se habla de costos de hasta 5 a 8 millones por megavatio. Según la publicación Nuclear Technology Review del OIEA, 2010, antes del accidente de Fukushima, estaban en construcción 56 reactores, 27 de ellos en China. Se tiene información que los Emiratos Árabes firmaron con la República de Corea la construcción de una planta nuclear con tres unidades de reactores y, Vietnam está en negociaciones con Japón y Rusia para la construcción de dos reactores de 1000 MWe cada uno. La instalación de la primera planta nuclear en cualquier país, lleva además, de los enormes recursos y costos financieros, mucho tiempo de planificación y construcción, del orden de los 10 a 20 años. Por otra parte, es necesario la disponibilidad de un gran número de profesionales de alta formación académica y técnica como se indicó en el Segundo Producto de la consultoría.

### **3.16. Resumen Comparativo de Tipos de Reactores de Investigación, sus Costos y Requerimientos**

En la tabla siguiente se resumen las tecnologías de reactores de investigación descritas en el documento, sus aspectos técnicos más importantes y los rangos de costos correspondientes, los que como se dijo antes, son muy variables.

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

## RESUMEN COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGIAS DE REACTORES NUCLEARES Y SUS REQUERIMIENTOS

### OBJETIVO GENERAL:

1) Disponibilidad de un Reactor Nuclear de Investigación que apalanque la formación de recursos humanos, la investigación científica y tecnológica y se convierta en el primer eslabón de los programas tendientes a la introducción de la generación de energía nucleoelectrica en el país

### OBJETIVO ESPECIFICO: Instalar un reactor nuclear de investigación

Parametros de Comparación	Facilidad Sub-crítica	R. de Investigación	R. de Investigación	R. de Investigación
<b>Alternativa Tecnológica</b>				
Potencia térmica		1-10 vatios	10-30 kW	> 30-1000 kW
Combustible Nuclear	Oxido de Uranio de bajo enriquecimiento en U-235 (<20%)			
Moderador	agua ligera	agua ligera	agua ligera	agua ligera
Tipo	Tanque	Tanque	Piscina o Tanque	Piscina o Tanque
Flujo Neutrónico n.cm <sup>-2</sup> .s-1	10 <sup>5</sup>	10 <sup>7-8</sup>	10 <sup>9-11</sup>	10 <sup>11-13</sup>
Potencialidad para producir Radio Isotopos	No	No	A nivel de trazas	Una gran variedad para la medicina, industria y agricultura
Apliaiones y Servicios	No	No	Servicios de Análisis	Servicios de Análisis
Potencialidad para la formación, capacitación e investigación	Física e Ingeniería Nuclear y de reactores	Física e Ingeniería Nuclear y de reactores	Servicios de Análisis: minería, goeología materiales, agricultura, medioambiente, biología	Servicios de Análisis: minería, goeología materiales, agricultura, medioambiente,
Rango de Costos:Reactor (en millones de dolares U\$)	~1.0	3.0 - 4.0	6.0 - 10.0	10.0 - 50.0
Rango de Costos: Obra Civil (en millones de dolares U\$)	0.5-1.0	0.5-1.3	1.5-2.5	> 4.0
Rango de Costos: Equipos e instrumentación nuclear (en millones de dolares U\$)	0.2- 0.3	0.2- 0.3	0.2- 0.5	0.2- 1.0
Rango de Costos: Operacion y Mantenimiento (anuales en miles de dolares U\$)	10.0 - 20.0	20 - 50	100- 200	200-500
Req. de Personal con formación a nivel III y IV	Op. y Mant.: 1-2 Físicos ó Ing. Nucleares	Op. y Mant.: 1-2 Físicos ó Ing. Nucleares	Op. y Mant.: 2-3 Físicos ó Ing. Nucleares	Op. y Mant.: 3-4 Físicos ó Ing. Nucleares
	Utilizacion: 3-5 Físicos, Radioquimicos, Investigadores en varias áreas	Utilizacion: 3-5 Físicos, Radioquimicos, Investigadores	Utilizacion: 4-6 Físicos, Radioquimicos, Investigadores en varias áreas	Utilizacion: 5-15 Físicos, Radioquimicos, Investigadores en varias áreas
Beneficiarios	Facultades de Ciencias Exactas para la enseñanza y capacitación en física e ingeniería nuclear - programa de la Opción Nuclear	Facultades de Ciencias Exactas para la enseñanza y capacitación en física e ingeniería nuclear - programa de la Opción Nuclear	Facultades de Ciencias Exactas para la enseñanza y capacitación en física e ingeniería nuclear - programa de la Opción Nuclear. Servicios de Análisis a la minería, geología y para otros sectores de la investigación y economía	Facultades de Ciencias Exactas para la enseñanza y capacitación en física e ingeniería nuclear - programa de la Opción Nuclear. Servicios de Análisis a la minería, geología y para otros sectores de la investigación y economía. Usuarios de radioisótopos
Fabricantes Comerciales	-General Atomic, TRIGA -INVAP, Argentina - Instituto de Energía Atómica de China, CIAE -Atomic Energy of Canada, Ltd.	-General Atomic, TRIGA -INVAP, Argentina - Instituto de Energía Atómica de China, CIAE -Atomic Energy of Canada, Ltd.	-General Atomic, TRIGA -INVAP, Argentina - Instituto de Energía Atómica de China, CIAE -Atomic Energy of Canada, Ltd.	-General Atomic, TRIGA -INVAP, Argentina - Instituto de Energía Atómica de China, CIAE
Minimo Espacio Físico Requerido, incluye espacio para el reactor e instalaciones mínimas (en mts 2)	50-100	100-200	200-300	300-1000

Ministerio de Educación

Viceministerio de Ciencia y Tecnología

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

Comentarios a la tabla de resumen.

En el Capítulo de Instalaciones Nucleares, sección Reactores Nucleares de Investigación, se dan los justificativos que explican y justifican la asignación de la prioridad relativa que se le asigna a esta facilidad nuclear.

La presente Tabla hace un resumen comparativo de las tecnologías de reactores nucleares de investigación según su potencia térmica, que es el parámetro de mayor importancia a la hora de utilizar sus capacidades potenciales. Se los ha dividido en 4 categorías, a) facilidad subcrítica en el factor de multiplicación  $k < 1.0$ , b) reactores propiamente dicho en el que es  $k > 1.0$  de potencia nominal de hasta unos 10 vatios, c) reactores de 10-30 KW y d) los de hasta 1000 Kw térmicos. Es de hacer notar que los reactores de investigación pueden alcanzar potencias de hasta 30 o más MW. En el texto de las Instalaciones nucleares se da amplia información sobre este tipo de reactores y sus potencialidades, las potenciales aplicaciones en detalle, incluyendo estimaciones de costos y una descripción más detallada de los potenciales usuarios y beneficiarios. Esta tabla es solo un resumen.

En la sección de Reactores de Investigación relevante para Bolivia, se sugiere que se debe poner especial atención y ser considerados en estudios posteriores a los reactores de baja potencia, desde 1 vatio hasta los 30 kW, pues combinan importantes aspectos de utilización práctica y de capacidad de formación de recursos humanos y económicos. También se dan criterios de posibles empleamientos.

### b) Ciclotrones

En esencia, los aceleradores son máquinas que permiten la aceleración a altas energías (energía cinética) de partículas atómicas cargadas eléctricamente tales como protones, deuterones y otros iones más pesados, incluyendo los correspondientes iones negativos de estas partículas y aun electrones.

El principio fundamental de todo acelerador, es la creación de una diferencia de potencial eléctrico o electromagnético apropiado para la aceleración de iones positivos y negativos a energías cinéticas del orden de millones de electrón-voltios (MeV). Los iones que son partículas cargadas, una vez que alcanzan estas energías pueden ser utilizados para bombardear núcleos atómicos provocando reacciones o transformaciones nucleares, bien para estudiar la estructura de la materia o producir núcleos atómicos radioactivos.

El primer acelerador exitoso capaz de inducir reacciones nucleares fue desarrollado por el ingeniero eléctrico J.D. Cockcroft en colaboración con T.S. Walton en 1932 aplicando una diferencia de potencial a través de un espacio de aceleración entre dos terminales logrando alcanzar 200 kV de diferencia de potencial. Las primeras reacciones nucleares de transmutación fueron utilizando este tipo de acelerador. Estos aceleradores que son muy sencillos y son todavía muy usados y se llaman *aceleradores Cockcroft-Walton*. *Este acelerador es el que está instalado en el Centro de Viacha.*

Otro tipo de acelerador electrostático que jugó un rol muy prominente en el desarrollo de las ciencias nucleares fue el acelerador inventado por R.J. van de Graaff en 1931 que acelerara haces de partículas cargadas a energías mayores que el acelerador de etapa o cascada única como el Cockcroft-Walton.

Los aceleradores de múltiples etapas del tipo *van de Graaff* fueron desarrollados a mediados del siglo anterior, siendo los más usados en la actualidad los de dos cascadas ( $n=2$ ) una vez que se demostró en principio de la estabilidad de transición de fases con la aplicación de radiofrecuencias. Estos aceleradores se llaman en la actualidad *aceleradores Tandem de van Graaff*.

La tecnología de los *ciclotrones* empezó con el invento de E. Lawrence y M.S. Livingston en Berkeley, California, EEUU en el 1930 quien desarrolló un pequeño ciclotrón de apenas 80 KeV (kilo electrón voltios) que aceleraba iones de deuterio y que luego se fue desarrollando hasta alcanzar energías de muchas decenas de MeV (mega electrón voltios). Este desarrollo superó las dificultades de los aceleradores lineales que ocupaban espacios físicos amplios pues aceleran a los iones, positivos o negativos en trayectorias espirales.

Los aceleradores de partículas en todos sus versiones, llámese aceleradores lineales, ciclotrones o de otro tipo han jugado un papel esencial en el desarrollo del conocimiento humano desde sus comienzos allá por los años 30 del Siglo XX, muy en particular en los avances de la ciencias y la tecnología moderna hasta nuestros días.

Inicialmente, estos ciclotrones fueron usados principalmente en investigaciones fundamentales de física nuclear y solo recién allá por la mitad de los años 60 del siglo anterior empezaron a ser utilizados en la producción de radioisótopos con posibles aplicaciones en medicina nuclear. Es de hacer notar que aunque los ciclotrones fueron instalados en instalaciones nucleares en los países avanzados, sin embargo, ya por los años 50, se instaló un ciclotrón en un hospital en Londres, Reino Unido dedicado exclusivamente para la producción de radioisótopos para aplicaciones médicas.

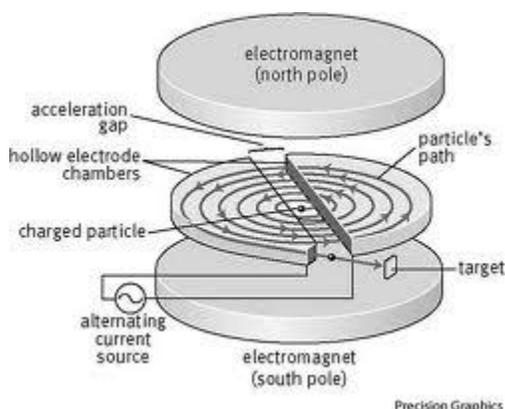
Adicionalmente, los aceleradores pueden ser utilizados también en aplicaciones industriales, particularmente aceleradores de electrones como veremos en el capítulo de Plantas de Irradiación.

### **3.17. La Física del Ciclotrón**

Los ciclotrones son los aceleradores más exitosos para acelerar iones, tanto positivos como negativos, energías que van desde unos pocos MeV hasta energías del rango de GeV. En lo que sigue se explicará, de una manera general, los principios físicos de operación de los ciclotrones con el objeto de introducir conceptos y diseños que podrían ser relevantes para la situación del país al momento de proponer la instalación de un ciclotrón en Bolivia.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

En los ciclotrones como en los aceleradores lineales modernos, la múltiple aceleración se logra mediante un potencial de radiofrecuencia; pero al contrario de los aceleradores lineales en que los iones tiene trayectorias lineales en un tubo, los iones están restringidos a por un campo magnético a moverse en semi círculos de espirales de radio creciente como se ilustra en el esquema siguiente:



Los iones a ser acelerados pueden ser positivos como protones ( $p$  ó  ${}^1\text{H}^+$ ), deuterones ( $d$ ,  ${}^2\text{H}^+$ ) y otros, o bien iones negativos de hidrógeno como ( ${}^1\text{H}^-$ ,  ${}^2\text{H}^-$ ) son producidos por una fuente de iones (S) en el centro del espacio que divide a los dos semi círculos planos llamados 'Des' ( de la letra D). Las Des están encerradas en un tanque al vacío ( $10^{-6}$  tor) localizado entre de los polos de un electroimán posicionado perpendicularmente al plano de las des. Mediante un campo alternante de radiofrecuencia de alto voltaje, los iones son acelerados hacia la D que tiene el potencial negativo. Tan pronto el ion alcanza el espacio entra las des donde ya no hay campo eléctrico que lo acelere, deja de ser influenciado por este pero el campo magnético perpendicular al plano de las des restringe su movimiento a una trayectoria semi circular.

Inmediatamente después, el potencial de la otra 'D' cambia de polaridad, con lo que el ion vuelve a ser acelerado hasta alcanzar la D. Esta alternancia de polaridad de las D hace que los iones ganen energías cinéticas crecientes, igual al producto de la carga eléctrica del ion por la diferencia de potencial entre las D. Finalmente el ion así acelerado al alcanzar la periferia del sistema de las Des son desviados de su trayectoria circular por un deflector cargado negativamente en caso de iones positivos y extraídos través de una ventana delgada, para luego ser focalizados en blancos apropiados con la energía deseada para realizar experimentos o en la producción de radionucleidos.

Hay muchas variaciones de este diseño básico entre los que podemos mencionar el sincrociclotrón donde mediante la modulación de la frecuencia de oscilación se logra tomar en cuenta la variación relativística de la masa con la velocidad.

En las primeras décadas desde su descubrimiento, los ciclotrones fueron usados principalmente en investigaciones físicas con un uso menor para la producción de radionucleidos. El primer ciclotrón dedicado a la producción de radionucleidos a ser utilizados en medicina fue instalado en el Hospital San Luis de la Universidad de Washington en 1941, donde radioisótopos de fósforo, hierro, arsénico y azufre fueron producidos. El segundo ciclotrón médico fue instalado en el Hospital de Hammersmith en Londres, en 1955

### **3.18. Utilización de los Ciclotrones**

Los ciclotrones son fuentes prolíficas de iones acelerados a altas energía, típicamente desde unos pocos MeV hasta 250 MeV, y en algunos diseños muy especiales, a energías en el rango de GeV como en el CERN. La investigación de la física de altas energías es un activo campo de investigación fundamental y aplicada. Mediante reacciones nucleares secundarias, los ciclotrones también pueden ser fuentes de neutrones.

*En el presente estudio de consultoría, nos circunscribiremos a ilustrar la utilización de los ciclotrones de relativamente bajas energías, de 5 a 30 MeV y de diseño especializado para la producción de radionucleidos para uso en medicina e industria y también para estudios en ciencia de materiales, física de bajas energías y otras aplicaciones que podrían ser relevantes para el caso boliviano.*

### **Producción de Radioisótopos y Radiofármacos**

Desde esta perspectiva de utilización, es decir, producción de radionucleidos y estudios de física de bajas energías, podemos clasificar a los ciclotrones en 4 categorías o niveles:

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

### Clasificación de los Ciclotrones según la energía de los Protones

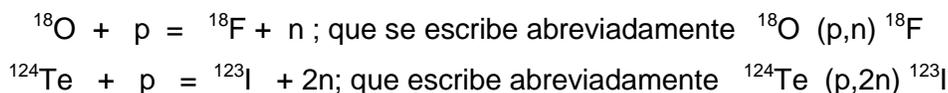
NIVEL I ≤ 10 MeV	NIVEL II 10-18 MeV	NIVEL III 18-30 MeV	NIVEL IV >30
Partícula única Protones o deuterones Energía fija RI PET: $^{18}\text{F}$ , $^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ y $^{15}\text{O}$	Partícula única Protones o deuterones Energía fija RI PET: $^{18}\text{F}$ , $^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ y $^{15}\text{O}$ RI SPECT: $^{123}\text{I}$ , $^{124}\text{I}$ , $^{111}\text{In}$ , $^{86}\text{Y}$ , $^{75}\text{Br}$	4 Partículas $p$ , $d$ , 4 Partículas $p$ , $d$ , $^3\text{He}$ y $^4\text{He}$ Energía fija y variable RI PET: $^{18}\text{F}$ , $^{11}\text{C}$ , $^{13}\text{N}$ y $^{15}\text{O}$ RI SPECT: $^{123}\text{I}$ , $^{124}\text{I}$ , $^{111}\text{In}$ , $^{86}\text{Y}$ , $^{75}\text{Br}$	4 Partículas $p$ , $d$ , $^3\text{He}$ y $^4\text{He}$ Energía fija y variable RI PET y SPECT Terapia con Protones

RI: radioisótopo,  $^3\text{He}$ : helio-3,  $^4\text{He}$ : helio-4

PET: Positron Emission Tomography

SPECT: Single Photon Emission Computed Tomography

Como ejemplo citaremos dos reacciones nucleares usadas para la producción de radionucleidos utilizados en medicina nuclear y de importancia actual:



Mediante la primera reacción nuclear los ciclotrones de Nivel I y Niveles II, con protones de energía del orden de los 8 a 13 MeV producen Fluoro-18, el radioisótopo de mayor uso en el mundo en la tecnología del PET (Positrón Emisión tomografía), además de los otros tres radioisótopos PET mencionados en la Tabla anterior. El Iodo-123, que es un radioisótopo de emisión de fotón único también muy utilizado en la medicina nuclear mediante la técnica del SPECT, solo se puede producir en ciclotrones de Nivel III y Nivel IV.

En las últimas dos décadas del Siglo XX se pudo observar un crecimiento extraordinario en el número de instalaciones de ciclotrones tanto en los países avanzados como en aquellos conocidos como en vías de desarrollo, instalados tanto en instalaciones de investigación nuclear como así también en hospitales e institutos de investigación médica y hospitales. Esto se debe fundamentalmente al advenimiento y aceptación de una de las técnicas de más poderosas de imagen clínico con fines diagnósticos llamada Tomografía por Emisión de Positrones, comúnmente conocida por sus siglas en inglés, PET (Positron

Emisión Tomography) que hace uso de los radioisótopos producidos precisamente por los ciclotrones.

La técnica PET es ahora considerada la técnica más moderna de medicina nuclear diagnóstica para estudios in-vivo de procesos metabólicos a nivel molecular y celular indicativos de anormalidad funcional, mucho antes de que haya evidencia morfológica de anormalidad o de enfermedad. Hacia los fines del siglo anterior esta técnica dejó ya de ser una herramienta puramente de investigación clínica para convertirse en una técnica de empleo rutinario para investigar patologías oncológicas fundamentalmente, pero con gran aplicación en patologías miocárdicas, neurológicas y de procesos infecciosos como el SIDA. Más recientemente, el PET está siendo también utilizado en investigaciones fundamentales en farmacología para la investigación y desarrollo de nuevos fármacos.

Para la implementación de la técnica del PET es necesario la operación de un ciclotrón ya sea del Nivel I o del Nivel II que produzca los radioisótopos emisores de positrones, luego, todo un laboratorio de radioquímica que prepare con estos radioisótopos los llamados radiofármacos los que posteriormente serán inyectados al paciente para obtener imágenes tomográficas de la radiación emitida por estos radioisótopos con un aparato especial llamado Cámara PET.

Estas imágenes PET dan información diagnóstica sobre procesos anormales indicativos de alguna enfermedad, como un proceso neoplásico por ejemplo. En años más recientes, la información clínica del PET se vio reforzada considerablemente con la obtención de imágenes simultáneas con la técnica de tomografía de Rayos-X Computarizada (CT), fusionando en una sola imagen, la información metabólica funcional del PET, con la morfológica obtenida por CT .

Entre los radioisótopos producidos en ciclotrones con mayor aplicación al presente, mencionaremos a un radioisótopo del floro, el F-18, que decae radioactivamente por emisión de positrones que no son otra cosa que electrones positivos, con un periodo de decaimiento de 111 minutos. Estos positrones (antimateria) al colisionar con los electrones (materia) se aniquilan produciendo dos fotones de 511 MeV cada uno en direcciones opuestas como resultado de la conversión de materia en energía según la famosa fórmula de Einstein, los que son detectados por las cámaras PET.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

Por técnicas sofisticadas de radioquímica, es posible lograr incorporar, o marcar como se conoce en la jerga radioquímica, este radioisótopo de F-18 en moléculas orgánicas que luego se convierten en radiofármacos, que son moléculas orgánicas que llevan incorporadas en su estructura molecular un átomo radioactivo, como el F-18. El radiofármaco PET más utilizado en todo el mundo es una molécula derivada de un análogo de la glucosa, la deoxiglucosa marcada con F-18, llamada F-18 Fluoro-deoxiglucosa ( $^{18}\text{F}$ -FDG) que brinda información sobre procesos metabólicos de consumo de energía basada en el metabolismo de la glucosa. Por ejemplo, en oncología se aprovecha el hecho de que las células que están sufriendo procesos neoplásicos o alta proliferación respecto a las células normales, consumen mayor cantidad de glucosa, situación que permite, al tomar las imágenes con las cámaras PET, obtener el contraste necesario para localizar tumores primarios o sitios metastásicos.

Esta tecnología ya está implantada en varios de los países más desarrollados de la América Latina como Argentina, Brasil, Chile y México. El problema o la barrera más importante que impide el desarrollo del PET en países como Bolivia, es fundamentalmente de naturaleza económica debido a la relativamente alta inversión inicial de capital que está por el rango de varios millones de dólares americanos.

Sin embargo, como se muestra en el Estado de Situación de este estudio de consultoría, ya existen centros de medicina nuclear en operación que cuentan con recursos humanos con la calificación apropiada para hacer un buen uso de esta moderna y necesaria técnica de medicina nuclear.

*El implementar esta técnica de imagen tomográfica, que ya demostró su gran aplicación en oncología, cardiología y neurología, lleva un tiempo considerable de dos a tres años como promedio, o aún más en algunas circunstancias, es por esto que en el caso de Bolivia, se debe sin mucha pérdida de tiempo, empezar con los lineamientos básicos o formulación de un proyecto que permita en un futuro cercano la instalación de un centro ciclotrón/PET para beneficio de la salud de los bolivianos.*

### Otras Aplicaciones de los Ciclotrones

Además de la producción de radioisótopos y de radiofármacos, este tipo de ciclotrones pueden utilizarse en experimentos de física nuclear, química nuclear, radioquímica y en aplicaciones analíticas como activación por partículas cargadas. Estas aplicaciones necesitan de instrumentación y equipo especializado adicional y de infraestructura de laboratorios. Tal como los reactores nucleares, los ciclotrones son herramientas muy importantes en la formación de recursos humanos e investigación universitaria científica.

### 3.19. Tipos de Ciclotrones Producidos Comercialmente

A pesar que muchos ciclotrones fueron diseñados y sus prototipos en centros, generalmente nucleares o de investigación de física de altas energías, estos no pudieron ser comercializados de manera continua y rutinaria por razones de organización y económicas, por lo que fueron empréstitos privados con la contribución de científicos e ingenieros que trabajaron en centros nucleares.

En realidad, no son muchas las empresas que se dedican a la producción comercial de estas máquinas, entre las que podemos mencionar:

*GE Helthcare de EEUU y Suecia*, manufactura dos modelos muy populares

- el PET Trace, que acelera protones y deuterones de 16,5 MeV y 8,4 MeV respectivamente
- el mini Trace, de partícula única, protones de 9,6 MeV

*Siemens, Alemania*, manufactura dos modelos

- Eclipse HP, de partícula única, protones de 11 MeV
- Eclipse RD, de partícula única, protones de 11MeV

*Ion Beam Applications, IBA, Bélgica*, manufactura tres modelos

- Cyclone 10/5, doble partícula, protones de 10 MeV y deuterones de 5 MeV
- Cyclone 18/9, doble partícula, protones de 18 MeV y deuterones de 9 MeV
- Cyclone 30, de partícula única, protones de 30 MeV

*Advanced Cyclotron Systems, Canadá*, manufactura tres modelos

- TR-14, de partícula única, protones de 14 MeV
- TR-19/9, doble partícula, protones de 19 MeV y deuterones de 9 MeV
- TR-30, partícula única, protones de 30 MeV

*HM-18 Sumitomo Heavy Industries Ltd, Japón*, manufactura dos modelos

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- HM-18, doble particular, protones de 18 MeV y deuterones de 10 MeV
- HM-12, doble partícula, protones de 12 MeV y deuterones de 6 MeV

*BestCyclotronSystems, Inc (BCSI), Canadá, manufactura tres modelos*

- BCSI p14, particular única, protones de 14 MeV
- BCSI p35, partícula única, protones de 35 MeV
- BCSI p70, partícula única, protones de 70 MeV

*Korea Institute of Radiological and Medical Sciences KIRAMS, Korea*

- KIRAMS-13, partícula única, protones de 13 MeV

Las características más sobresalientes de los ciclotrones modernos mencionados, es que son compactos, con alto grado de automatización y aceleran iones negativos de hidrógeno y deuterio; y están diseñados fundamentalmente para la producción de radioisótopos PET.

### **3.20. Ciclotrones Relevantes para Bolivia**

*Los ciclotrones más apropiados para el caso boliviano son los ciclotrones del Nivel I y Nivel II, tanto desde el punto de vista de su utilización, costos de inversión, operación y mantenimiento como también de la infraestructura de laboratorios, equipamiento y recursos humanos para sostener programas de efectivos y realistas.*

*La complejidad tecnológica y los niveles de inversión para los ciclotrones de Nivel III y Nivel IV son muy considerables por lo que muy pocos países decidieron su adquisición e instalación. Al contrario de los ciclotrones de los Niveles I y II que pueden ser exclusivamente dedicados a la producción de radioisótopos para la medicina, los de Nivel III y IV son generalmente del uso multipropósito. Esto no quiere decir que los de nivel inferior, particularmente los del Nivel II, que no puedan apoyar programas multidisciplinarios de utilización.*

De hecho, la gran mayoría de los más de 400 ciclotrones instalados en el mundo en los últimos 15 a 20 años, son de los niveles I y II, muchos de ellos instalados en los predios de hospitales públicos y clínicas privadas.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

En nuestra región de América Latina existe solo un ciclotrón de Nivel IV instalado en el Centro Nuclear de Ezeiza perteneciente a la CNEA capaz de acelerar protones a 42 MeV de energía. El resto, unos 30 distribuidos en Argentina (5), Brasil (10), Colombia (3), Chile (3), México (5), Perú (2), uno en proceso de instalación), Venezuela (1) y Uruguay (1) son del Nivel I y II con una gran dedicación a la producción de radioisótopos ( no hay información exacta sobre el No. exacto). Se tiene información que tanto el Ecuador, Panamá y Paraguay ya tienen proyectos avanzados para la instalación de un ciclotrón. La gran mayoría de estos fueron instalados solamente en los últimos 10 años, algunos de ellos por emprendimientos privados.

En Bolivia, durante el periodo del 2009 y 2010, se desarrolló un documento a manera de propuesta de proyecto<sup>1</sup> para la instalación de un ciclotrón juntamente con una unidad de tomografía PET a ser instalados en los predios del actual INAMEN en la zona de Miraflores de la ciudad de La Paz. Lamentablemente, este pre-proyecto no avanzó por no haber contado con el suficiente apoyo político de autoridades nacionales y departamentales. Sin embargo, se tiene conocimiento que la nueva dirección del INAMEN está interesada en esta tecnología y emprenderá acciones con este fin en un próximo futuro.

### **3.21. Posibles Programas de Utilización y Criterios de Emplazamiento de un Ciclotrón en Bolivia**

Las aplicaciones más inmediatas de un ciclotrón en el país deben estar dirigidas a la producción de radioisótopos de media vida corta emisores de positrones como el Fluoro-18 de 111 min de vida media seguido por el carbono-11 de 20 min de vida media. Con esto se abrirá la posibilidad de preparar radiofármacos de alta relevancia para estudios en cardiología y principalmente en oncología mediante la ya probada modalidad de imagen molecular llamada PET.

En segundo plano, puesto que es muy probable que por un buen tiempo, posiblemente 10 ó más años, solo opere en el país un solo ciclotrón con recursos nacionales, es muy razonable pensar que se trataría de una instalación de uso multidisciplinario para realizar investigaciones en física, química y biología, al contrario de una facilidad de uso exclusivo para la producción de radioisótopos PET. Por otra parte, considerando que la modalidad

---

<sup>1</sup> Los autores de este documento fueron el Dr. Luis Barragán, entonces Director del INAMEN, y el Dr. Hernán Vera Ruíz.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

de imagen PET es una técnica de la Medicina Nuclear y que esta disciplina sería la que mayor uso que haría del ciclotrón, es también razonable y lógico pensar que el ciclotrón debe estar instalado muy cerca o ser parte de un centro de medicina nuclear.

El hecho de que el ciclotrón esté emplazado en un centro de medicina nuclear, permitiría la preparación de radiofármacos de vida corta derivados de carbono-11 con 20 minutos de vida media, y radioisótopos de vida media ultra-corta como el Oxígeno-18 con solo 2 min de vida media.

De estas consideraciones, y tomando en cuenta que además de la producción de radioisótopos para la medicina nuclear, sería posible la preparación de una gran variedad de compuestos marcados radioisótopos PET con fines de investigación en el área de la biomedicina, biología, biología de altura en el caso de La Paz, farmacología, incluyendo investigación en física y química, es razonable pensar que el ciclotrón esté instalado cerca de un área universitaria, preferiblemente en un hospital universitario que opere un centro de medicina nuclear.

Naturalmente, será necesario un estudio de pre-factibilidad o de factibilidad para justificar la implantación de un ciclotrón y definir el tipo de instalación y tipo de ciclotrón como también sus posibles programas de utilización, tanto de servicio en medicina nuclear, como de desarrollo e investigación.

Al contrario que en caso de los reactores de investigación, la información sobre los costos de estas facilidades es más abundante y abierta. Los ciclotrones de Nivel I con una infraestructura mínima de utilización para la producción de radioisótopos y radiofármacos para PET, puede oscilar entre 3 a 5 millones de dólares incluyendo la infraestructura civil. Para un ciclotrón del Nivel II, los costos pueden oscilar entre 4 a 7 millones. Los ciclotrones de Niveles III y IV pueden costar varias decenas de millones de dólares.

La operación y eficiente utilización de un ciclotrón también son costos que se deben considerar, los que pueden variar de 100 a 300 mil dólares anuales.

Finalmente, debe quedar claro que una facilidad basada en la operación de un ciclotrón para la producción de radioisótopos de uso médico, debe estar necesariamente acoplada

a la disponibilidad operativa de una cámara PET, o mejor, de una cámara combinada PE/CT (Tomografía por Emisión de Positrones y Tomografía Computarizada). El costo de estas máquinas de imagen oscila entre los 2 a 3 millones de dólares dependiendo de las especificaciones técnicas finales.

### **3.22. Resumen Comparativo de Tipos de Ciclotrones, sus Costos y Requerimientos**

En la Tabla siguiente se resumen los tipos de ciclotrones descritos en el documento, sus aspectos técnicos más importantes y los rangos de costos correspondientes.

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

## RESUMEN COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS DEL CICLOTRON PARA EL USO MEDICO Y SUS REQUERIMIENTOS

**OBJETIVO GENERAL:**

- 1) Acceso de la población nacional a mejores servicios de medicina nuclear mediante la introducción de tecnología de última generación
- 2) Optimizar el diagnóstico precoz, oportuno y diferencial de enfermedades, especialmente en oncología, cardiología, neurología y en enfermedades infecciosas.

**OBJETIVO ESPECÍFICO:**

- 1) Instalar un ciclotrón para la producción de radioisótopos PET de vida media corta como parte integrante de una unidad CICLOTRON/RADIOFARMACIA y PET-CT

Parametros de Comparación Alternativa Tecnológica	NIVEL I	NIVEL II	NIVEL III	NIVEL IV
Energía PROTON (Mev)	< 10	10-30	18-30	>30
Potencialidad para producir Radio Isótopos	Diseño especializado para Radioisótopos de PET	Diseño especializado para Radioisótopos de PET	Diseño especializado para Radioisótopos de PET y SPECT	Diseño especializado para Radioisótopos de PET y SPECT
Rango de Costos: Ciclotron (en millones de dolares U\$)	1.0-1.3	1.5-1.7	3.0-5.0	>10.0
Rango de Costos: Obra Civil (en millones de dolares U\$)	0.5-1.0	0.5-1.3	1.5-2.5	>4.0
Rango de Costos: Equipo de Radio Química y Control de Calidad (en millones de dolares U\$)	0.5-1.5	0.5-1.5	0.5-2.5	0.5-2.5
Rango de Costos: Operación y Mantenimiento (anuales en miles de dolares U\$)	200 - 400	200 - 400	500-800	500-1000
Rango de Costos: Cámara PET-CT (en millones de dolares U\$)	2.0-3.0	2.0-3.0	2.0-3.0	2.0-3.0
Req. de Personal con formación en los Niveles III y IV	Op. y Mant.: 3-4 Ingenieros y Físicos	Op. y Mant.: 3-4 Ingenieros y Físicos	Op. y Mant.: 3-5 Ingenieros y Físicos	Op. y Mant.: 5-8 Ingenieros y Físicos
	Utilización: 3-5 Radioquímico, Radiofarmacéutico, Investigadores	Utilización: 3-5 Radioquímico, Radiofarmacéutico, Investigadores	Utilización: 3-8 Radioquímico, Radiofarmacéutico, Investigadores	Utilización: 5-15 Radioquímico, Radiofarmacéutico, Investigadores
Beneficiarios	-Sistema Público de Salud -Pacientes de Cáncer -Centros de Medicina Nuclear -Universidades -Sociedad en Gral.	-Sistema Público de Salud -Pacientes de Cáncer -Centros de Medicina Nuclear -Universidades -Sociedad en Gral.	-Sistema Público de Salud -Pacientes de Cáncer -Centros de Medicina Nuclear -Universidades -Sociedad en Gral.	-Sistema Público de Salud -Pacientes de Cáncer -Centros de Medicina Nuclear -Universidades -Sociedad en Gral.
Fabricantes Comerciales	-GE Healthcare -Siemens -Ion Beam Applications, IBA -Advanced Cyclotron Systems -Sumitomo Heavy Industries Ltd -Korea Institute of Radiological and Medical Sciences	-GE Healthcare -Siemens -Ion Beam Applications, IBA -Advanced Cyclotron Systems -Sumitomo Heavy Industries Ltd -Korea Institute of Radiological and Medical Sciences	-Ion Beam Applications, IBA -Advanced Cyclotron Systems	-Ion Beam Applications, IBA -Advanced Cyclotron Systems
Minimo Espacio Físico Requerido, incluye espacio para el Ciclotron e instalaciones de laboratorio radioquímico, radiofarmacéutico y control de calidad (en mts <sup>2</sup> )	300-500	300-500	500-800	800-1000

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

### Comentarios a la tabla comparativa.

En el Capítulo de Instalaciones Nucleares, sección Ciclotrón, se dan los justificativos que explican y justifican la asignación de la prioridad más alta al ciclotrón sobre las otras dos instalaciones nucleares.

La presente Tabla hace un resumen comparativo de las tecnologías de ciclotrones en cuatro niveles diseñados para la producción de radioisótopos. Los ciclotrones de niveles I y II, por su relativamente baja energía, solo pueden producir radioisótopos PET de vida media corta (menor a los 111 minutos como el Fluoro-18), mientras que los de Niveles III y IV, además de los radioisótopos PET pueden producir otros como el Iodo-123 de mayor vida media que se usa en la técnica de medicina nuclear llamada SPECT (tomografía computarizada de fotón único).

El ciclotrón que se recomienda para Bolivia, es un ciclotrón de los Niveles I ó II que tienen la capacidad suficiente de producir radioisótopos para PET en cantidades relevantes para su distribución a otros centros de medicina nuclear del país. En particular, un ciclotrón de Nivel II podría también ser usado por su diseño más flexible, en investigación y formación de recursos humanos. Los radioisótopos de los ciclotrones III y IV podrían ser importados pues sus vidas medias son suficientemente largas.

Es de hacer notar que los radioisótopos PET son de vida media corta por lo que no pueden ser importados desde distancias grandes superiores a los 1000 km a costos razonables, tiene que ser producidos in-situ donde se los va a usar, o bien en la misma ciudad en que son producidos. Para el caso de Bolivia, al existir centros de medicina nuclear en Santa Cruz, Cochabamba y Sucre, a una hora por avión de La Paz (en el supuesto caso que el ciclotrón se instalara en La Paz), pueden ser con una optimización de la logística de transporte, suministrados con uno solo de radioisótopos PET, el Fluoro -18, que de todas maneras, es el más importante de los radioisótopos PET y el que más se usa en la práctica de la medicina nuclear.

La práctica de la Tomografía de Emisión por Positrones (PET) requiere de tres componentes tecnológicos separados, 1) el acelerador, ciclotron, 2) equipamiento para radioquímica, radiofarmacia y control de calidad, c) la cámara PET o PET/CT, que no es parte de esta Tabla comparativa, solo se menciona sus potenciales costos al 2011.

Por otra parte, en los requerimientos de personal, no se dice nada sobre las necesidades de médicos nucleares y otros que trabajan en los centros PET.

### **c) Plantas de Irradiación**

Una Planta de Irradiación es un *sistema tecnológico que genera radiaciones ionizantes las que son utilizadas para inducir cambios físicos, químicos y biológicos en la materia o sustrato objeto de la irradiación, con el objeto de mejorar las propiedades de una variedad de productos industriales de interés de la sociedad.*

#### **La Física de la Planta de Irradiación**

La radiación ionizante, como se mencionó antes, se define como la radiación corpuscular y fotónica o electromagnética con suficiente energía para ocasionar la pérdida de electrones de átomos y moléculas, produciendo de esta manera ionización y la formación de radicales libres, los que son especies químicamente muy reactivas iniciadoras de reacciones químicas es los sustratos objetos de la irradiación, que pueden estar en el estado gaseoso, líquido o sólido.

El estudio de estas reacciones iniciadas por la absorción de radiaciones ionizantes y la subsecuente formación de radicales libres se conoce con el nombre de *química y biología de las radiaciones*. Cuando se usa la radiación para mejorar las propiedades de sustratos industriales, o la formación de nuevos productos, la actividad se conoce como *procesamiento industrial por radiaciones*.

La radiación ionizante de interés industrial proviene esencialmente de dos fuentes a) radiación electromagnética y b) partículas cargadas positiva o negativamente aceleradas a altas energías.

La *radiación electromagnética* que tiene suficiente energía para causar ionización es la radiación en la forma de Rayos X o Rayos Gama con energías superiores a los 50-100 eV. Las fuentes de estos dos tipos de radiaciones son, sin embargo, diferentes. La producción industrial de Rayos X es en aceleradores de electrones, y los Rayos Gama en fuentes radioisotópicas, como el Co-60 y el Cs-137.

#### **Características de las Instalaciones de Irradiación**

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

Una facilidad de investigación está diseñada con el propósito de tener máxima versatilidad en su uso, aplicaciones en un rango amplio dosis, tasas de dosis variables y posibilidades de controlar las condiciones de irradiación como la temperatura y que pueda irradiar una variedad de productos.

Las facilidades llamadas piloto son generalmente diseñadas con una limitada versatilidad pero con un volumen de tratamiento mayor que una planta de investigación.

Por otro lado, las facilidades comerciales además de tener en cuenta la economía de escala a la vez que tiene que satisfacer las demandas requeridas tanto por las autoridades sanitarias como las de mercado. Existen varios diseños que satisfacen estos requerimientos y otros requerimientos como la densidad del producto a irradiar, rango y tasas de dosis, volumen y tipo de fuente de radiación.

Las Plantas de Irradiación de uso comercial, como se mencionó, hoy en día hacen uso de dos fuentes de radiaciones ionizantes provenientes, ya sea de una fuente radioisotópicas o bien, de un acelerador de electrones.

### **Fuentes Radioisotópicas**

**Cobalto-60:** emisor de Rayos-Gama con energía de 1,33 MeV, la que es muy penetrante y decae con un periodo de semi-desintegración de 5,27 años. La actividad típica para una planta industrial puede variar desde unos 100,000 a 1 millón Curios dependiendo de la capacidad o volumen de materiales a procesar. Los diseños son muy variados y pueden ser de utilización multi propósito. Las aplicaciones más frecuentes de esta fuente son en la irradiación de alimentos y en la esterilización de productos médicos.

El Co-60 es el más usado en la irradiación de alimentos por su alta penetración en la materia. El OIEA en clasificó a los irradiadores de Cobalto en:

Categoría I. Celdas o Cámaras auto blindadas de Co-60. Existen varios diseños dependiendo del fabricante, y tiene capacidad de carga de 100 Ci hasta 20.000 Ci de Co-60

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

Categoría II. Un recinto especial blindado con almacenamiento seco para el Co-60. El tamaño de la sala de irradiación puede ser de unos 30 m<sup>2</sup> y la carga Co-60 puede variar desde 1KCi hasta 0,5 millones de Ci.

Categoría III. Fuente fija en el piso de una piscina con actividades de hasta 200 KCi.

Categoría IV. Sala blindada con almacenamiento seco y muy adecuado para uso comercial en grandes volúmenes, con cargas hasta 10 millones de Ci de Co-60. Son muy pocas las facilidades de este tipo en el mundo.

En el pasado se utilizó además del Co-60 el Cesio-137. Este radioisótopo emite radiaciones gama de 0,67 MeV, que es menor energía que el Co-60 y decae con una vida media de 30 años. Varias son las razones para que se prefiera el uso de Co-60 sobre el Cs-137, a pesar de su conveniente vida media de 30 años que no impone recambio de la fuente con alta frecuencia. La mayor razón es que las fuentes de Cs-137 son más difíciles de producirla (el cesio es químicamente muy reactivo) y su producción es mediante la separación radioquímica de productos de fisión, en cambio, el Co-60 se lo produce por captura neutrónica en reactores nucleares, generalmente en reactores nucleares de potencia.

*Las aplicaciones más frecuentes son las siguientes:*

- *Irradiación de alimentos*
- *Esterilización de implantes*
- *Esterilización de Productos de uso Médico: guantes, gasas, vendas, bisturís, jeringas y agujas de inyección*
- *Bancos de sangre y bancos de Tejidos*
- *Productos Odontológicos*
- *Cosméticos*
- *Irradiación de yerbas y especias*
- *Irradiación de alimentos para mascotas*
- *Insumos para bioterios*
- *Turba y fertilizantes orgánicos*
- *Desinfección de documentos históricos y oficiales para su almacenamiento*

Para estas aplicaciones, ambas fuentes de irradiación, Co-60 y haces de electrones son usados. En la actualidad, estas aplicaciones constituyen parte de una industria floreciente de esterilización como una alternativa al uso de agentes químicos nocivos (gas de oxido de etileno por ejemplo que carcinógeno) o para productos que no pueden tolerar temperaturas típicas de esterilización de 120 grados centígrados.

### **Fabricantes de Irradiadores Gama. Tipo Panorámico**

- MDS NORDION – (Canada)  
Mr. Kevin O'hara (technical vendor) or Mr. Eric Beers (Director, Engineering)  
447 March Road, Ottawa, Ontario, Canada K2K 1X8  
Phone + 1 613 592 3400 – Ext. 2524 (O'hara) and + 1 613 592 3400 – Ext 2530  
Email: kevin.ohara@mdsinc.com and eric.beers@mdsinc.com  
www.mdsnordion.com
- Izotop-Institute of Isotopes Co.Ltd. (Hungary)  
Mr. Simonics Péter Head, Radiation Techniques Business Line  
H-1121 Budapest, KonkolyThege M. ut 29-33., Hungary  
Phone: 36 1 391 0891 - Mobile phone: 36 30 9910 470  
Fax: 36 1 886 8924  
E-mail: sute@izotop.hu
- Gamma-Service Isotopen (Germany)  
Dr. Manfred Frenzel  
Bautzner Str. 67 – 04347 – Leipzig – Germany  
Phone: + 49 341 463 372 640 - Fax: + 43 341 463372 522  
E-mail: Manfred.frenzel@gamma-recycling.de  
www.gamma-recycling.de
- Symec Engineers PVT. Ltd.( India)
- IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Brasil)  
Dr. Paulo Roberto Rela – Centro de Tecnologia das Radiações  
Travessa R, No. 400 – CEP 05508-000 – São Paulo – Brasil  
Phone: + 55 11 3133 9762 and mobile: + 55 11 82726065

E-mail: prela@ipen.br e prela06@yahoo.com.br

- Beijing Sanqiangli Engineering Technology Co. Ltd.(China)
- Symec Engineers PVT. Ltd.( India)
- REVISSPURIDEC–( É SOMENTE VENDEDORA DE Co-60) - England

Mr. Pete Lambourne

E-mail: pete.lambourne@reviss.co.uk

### **Acelerador de Electrones (E-BeamTechnology)**

Hay varios tipos de aceleradores de electrones, algunos son diseñados para producir haces de electrones con energías que van desde 80 keV hasta 10 MeV para de aplicaciones industriales. Asimismo, existe una gran variedad de potencias de operación en muchos diseños ya comerciales que van desde unos pocos kW( kilovatios) hasta 300 KW.

Contrario a las radiaciones gama de una fuente de cobalto-60 por ejemplo, los electrones acelerados por un acelerador industrial no tienen mucha capacidad de penetración en la materia para muchas aplicaciones. Sin embargo, la energía de los electrones puede ser controlada de tal manera que pueda alcanzar penetraciones muy aptas para un sin número de aplicaciones, sobre todo para tratamiento superficial, pero no para irradiar volúmenes grandes como lo sería el caso de alimentos.

Por ejemplo, electrones con energías en el rango de 80 a 350 keV se usan para tratamiento directo de superficies con adhesivos y películas, mientras que electrones en el rango de 500 keV a 5,0 MeV se emplean para inducir polimerización en forma de reticulado cruzado de poliolefinas para aislar cables y películas de plástico. Electrones de 5 a 10 MeV se emplean para la esterilización de productos médicos.

Los aceleradores de electrones además de producir electrones de hasta 10 MeV de energía con fines industriales de aplicación directa, se emplean para producir Rayos-X al hacer incidir los electrones energéticos sobre un material de alto Número Atómico como el Tungsteno. Por lo tanto, los aceleradores de electrones

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

son fuentes de Rayos-X, los que se pueden usar industrialmente para la esterilización de una gran variedad de productos, muy similar a las aplicaciones de la radiación gama.

La industria permite usar electrones con energías de hasta 10 MeV y además de rayos-X hasta 5 MeV.

### FABRICANTES DE ACELERADORES DE ELECTRONES

- IBA Industrial, Incorporated (formerly Radiation Dynamics, Incorporated)  
Mr. GordAshfield – Vice President, Sales & Marketing, NAFTA  
225 Water Street, Jacksonville, FL 32202 – USA  
Phone: + 1 904 224 6100 - Mobile: + 1 631 903 7365  
Email: [Gordon.ashfield@iba-group.com](mailto:Gordon.ashfield@iba-group.com)  
[www.iba-worldwide.com/industrial](http://www.iba-worldwide.com/industrial)  
Cost: 10MeV = ~ 10 million dollars
- EB TECH CO., LTD. – South Korea  
Mr. Bumsoo Han – President  
550 Yongsan-dong Yuseong-gu  
Daejeon, 305-500 – South Korea  
Tel: +82-42-930-7501  
Fax: +82-42-930-7500  
Email: [bshan@eb-tech.com](mailto:bshan@eb-tech.com)  
Cost: 2 MeV = ~ 1.1 million dollars to 900.000 dollars depends of conveyor, PC
- NHV Corporation (very expensive depends on energy and voltage=power)  
Mr. Yasuhisa Hoshi – Executive Officer of the Board  
47, Umezu-takase-cho, Ukyo-ku – Kyoto – Japan  
Phone: + 81 75 864 8813  
Email: [Hoshi\\_Yasuhisa@nissin.co.jp](mailto:Hoshi_Yasuhisa@nissin.co.jp)

[www.nhv.jp](http://www.nhv.jp)

- Budker Institute of Nuclear Physics ([www.inp.nsk.su](http://www.inp.nsk.su)) - marketed through EB Tech, Limited ([www.eb-tech.com](http://www.eb-tech.com))

- Vivirad SA (formerly Vivirad-High Voltage Corporation) (very expensive depends on energy and voltage=power)

Mr. Eric Letournel

23 rue Principale – 67117 Handschuheim( Strasbourg) France

Phone: + 33 3 88 69 1326

Email: [viviradel@aol.com](mailto:viviradel@aol.com)

[www.vivirad.com](http://www.vivirad.com)

En los últimos años se observó un gran desarrollo de la tecnología de aceleradores de electrones, tanto en términos de un diseño más compacto como el llamado Rodhotron™ (Ion Beam Applications) capaz de generar Rayos-X de 5,0 y 7,5 MeV con una alta uniformidad de distribución de dosis y potencias de 700 kW.

Los haces de electrones son más empelados, como veremos más adelante, en la industria de esterilización de productos médicos, polimerización y aplicaciones medioambientalistas.

### **Aplicaciones de las Plantas de Irradiación**

Casi inmediatamente después del descubrimiento de la radioactividad por H. Becquerel en 1895, la idea de utilizar estas radiaciones cuyas propiedades no eran todavía muy conocidas y estudiadas, se empezó a discutir la idea de utilizarlas para destruir microorganismos en alimentos, inclusive algunas patentes ya se otorgaron en los EEUU y el Reino Unido. Sin embargo, la tecnología no pudo ser llevada al nivel comercial por que la fuente que se utilizaba en aquella época fue el Radio, de escasa abundancia. Similarmente, el uso de Rayos-X para eliminar insectos, huevos y larvas en hojas de tabaco para mejorar la calidad de los cigarrillos ya fue descrita en 1916, y en 1921 estos rayos fueron empleados para eliminar el parásito *Trichinella* en carne de puerco.

Con el continuo desarrollo de mejores fuentes de radiaciones y el avance de la legislación, seguridad y control, además de la investigación científica y aplicada, el ámbito

de la utilización de las radiaciones ionizantes fue en continuo aumento cubriendo un amplio rango de la actividad industrial.

Los Rayos- $\gamma$ , Rayos-X y los electrones de alta energía pueden afectar el funcionamiento normal de los procesos biológicos de los tejidos vivos. Por ejemplo, destruye o mata a los microbios e insectos que contaminan los alimentos, esteriliza la carga bacteriana en materiales y productos médicos mediante la parcial o total inactivación del material genético de las células vivas. Las radiaciones pueden interaccionar directamente con el ADN o mediante intermediarios como los radicales libres.

Las aplicaciones de las Plantas de Irradiación se agrupan principalmente en tres categorías, a) irradiación de alimentos, b) esterilización o esterilización en frío de materiales biológicos y productos médicos y c) modificación, mejora y producción de nuevos productos industriales y d) remediación medioambiental.

### **Irradiación de Alimentos**

La investigación sobre la seguridad de la irradiación de alimentos comenzó en los EEUU a los comienzos de la década del los 50 del siglo pasado, con el fin de prolongar la vida de productos alimenticios para el ejército de ese país. A partir de estas investigaciones, y con la disponibilidad de fuentes de irradiación, la industria de irradiación de alimentos creció abarcando una gran variedad de productos de la agro-industria ha ser irradiados. Paralelamente, la legislación y regulación fue establecida por organismos internacionales como la Organización Mundial de Alimentos (OMA), la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Unión Europea y también nacionales como la FDA de los EEUU.

Por otra parte, gracias a la investigación de numerosas instituciones, se cuenta hoy en día con una larga lista de microorganismos, bacterias, insectos, etc., susceptibles de ser eliminados usando radiaciones gama, radiaciones X o electrones. Estos estudios también demostraron y establecieron las dosis efectivas a los que se deben someter los alimentos para lograr su efectividad.

Altas dosis del orden de 20 hasta 70 kGy se utilizan para esterilizar alimentos mediante la eliminación a profundidad de todos microorganismos y esporas, en cambio, bajas dosis, del orden de menos de 0,1 kGy, se utilizan para inhibir el brote o germinación de productos como papas y cebollas. Bajas e intermedias dosis también se utilizan para

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

desinfectar o bajar la carga bacteriana y de insectos en granos, frutas frescas y deshidratadas, vegetales y hortalizas con el fin de prolongar su vida o fecha de vencimiento para ser consumida. Este procedimiento reduce el consumo de pesticidas químicos o el di-bromuro de etileno para eliminar larvas y huevos de insectos.

La irradiación de alimentos se efectúa utilizando rayos-gama provenientes de una fuente radioisotópica como el Cobalto-60, o bien rayos-X de hasta 5MeV de energía provenientes de un acelerador de electrones, o bien, directamente electrones de hasta 10 MeV de energía. Este límite superior se lo estableció para evitar la producción o inducción de radioactividad por los rayos-X de energías superiores a los 10 MeV.

A pesar de los grandes adelantos en la agricultura moderna con la introducción de mejores prácticas de manejo de suelos e irrigación, el desarrollo de nuevas y mejores variedades de semillas y la incorporación de nuevas área de cultivos que contribuyó a incrementar los volúmenes de productos agrícolas como fue el caso de la así llamada Revolución Verde, en la India, el espectro y amenaza de la seguridad alimentaria es vigente y cada día cobra mayor actualidad y urgencia.

Los datos de agencias especializadas incluyendo los del sistema de Naciones Unidas, proyectan un crecimiento poblacional que superará los 10 a 12 mil millones de habitantes en el planeta para el año 2050. Justamente en este año de 2011, se anunció hace poco que ya se llegó a la cifra de los 7 mil millones. Gran parte de este aumento poblacional será en los países en desarrollo situados en la franja ecuatorial donde los efectos del cambio climático (eventos extremos como sequías e inundaciones) contribuyen a exacerbar una posible crisis alimentaria. Alimentar estos niveles de población en un contexto del cambio climático y la disminución de tierra cultivable y fértil, requiere establecer un difícil y aceptable balance en términos socio-económicos, entre la producción y la demanda.

En los sistemas agrícolas productivos de estos países un problema adicional se debe a la falta de recursos y tecnología de manejo de los productos agrícolas post-cosecha, en el que las pérdidas son considerables, contribuyendo dramáticamente a la inseguridad de suministro de suficientes alimentos.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

La OMA o FAO estima que del 25 al 30 % de la producción mundial de alimentos se pierde por la acción de bacterias, hongos, insectos y otras plagas. En los países en desarrollo, se estima que por lo menos el 10% de la producción de granos, cereales se pierde, mientras que las pérdidas de legumbres y frutas frescas alcanza la cifra del 50% en ciertos países y situaciones específicas. La naturaleza perecedera de muchos productos agrícolas y su producción estacional, hace se busque e investigue métodos tecnológicos para la conservación de alimentos. Lamentablemente no existen muchos datos sobre la magnitud de la pérdida de alimentos post cosecha, particularmente en los países en vías de desarrollo, entre los que se debe incluir a Bolivia.

En muchas situaciones y países, el secado al sol, fermentación, salado y ahumado y fermentación son técnicas que ofrecieron solución ya por muchos años, a los que hay que añadir técnicas más modernas como la refrigeración, deshidratación-liofilización, enlatado y preservación con preservativos químicos, uso de fumigantes. Todas estas técnicas por supuesto contribuyen a la aumentar la seguridad e inocuidad alimentaria y a la gestión y distribución de los alimentos.

Por otra parte, enfermedades derivadas de la ingesta de alimentos en mal estado de conservación, es un problema que afecta a los consumidores a nivel mundial. La OMS informa que en los países en desarrollo, las enfermedades derivadas de parásitos en los alimentos afecta a más de 40 millones de habitantes, y que aun en los países industrializados se sienten estos efectos a pesar de medidas severas que se implantan en el manejo de los alimentos, como la adopción de las Buenas Prácticas de Manufactura (BMP).

Las radiaciones ionizantes a dosis de tratamiento de 0,25 a 1 kGy son empleadas a nivel mundial para el control de infestación por insectos en granos, legumbres, frutas frescas y secas, especies y hierbas medicinales, pescado seco, carne de res, puerco y de pollo, y de muchos otros productos más. Sin embargo, la irradiación de alimentos no es una panacea que se puede aplicar a todos los productos; muchos vegetales, algunas frutas, leche, huevos, mantequilla entre otros productos son muy susceptibles a las radiaciones y se dañan rápido aún a dosis muy bajas.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

La irradiación de alimentos es ahora una tecnología madura que puede jugar un rol importante en mejorar la preservación de los alimentos, mejorar sus condiciones de higiene y las condiciones de cuarentena en el caso de la exportación, incrementando su aceptación por el país importador. Esta tecnología además facilita el empaque, almacenamiento, transporte y distribución de alimentos, facilitando de esta manera el comercio nacional e internacional de alimentos y productos derivados de la agro-industria. De estas consideraciones es importante que los países, incluido nuestro país, elaboren políticas y estrategias efectivas dirigidas a la conservación y preservación de alimentos, evitando su pérdida post cosecha por efectos de insectos y microbios y que contribuyan a mejorar la seguridad e inocuidad alimentaria.

El concepto de seguridad alimentaria está dentro de los postulados del Plan Nacional de Desarrollo de Bolivia y como se explica en un capítulo del Programa Nuclear Boliviano, las Plantas de Irradiación son relevantes y contribuyen a la seguridad alimentaria.

En términos de irradiación de alimentos, para el caso boliviano, se lo debe considerar en primer término desde el punto de vista de la seguridad e inocuidad alimentaria a nivel nacional, y en segundo lugar, como un factor económico de mejorar la calidad y competitividad de los productos agroindustriales de exportación. Para esto, será necesario que se elabore un estudio de factibilidad que establezca, entre otros:

- de la manera más cuantitativa posible la situación nacional en cuanto a las pérdidas de alimentos agrícolas por clase de producto y por región del país
- defina las tecnologías a emplear, es decir, en base a una planta de Cobalto o mediante el uso de aceleradores de electrones
- un estudio económico para evaluar la rentabilidad del proyecto y los niveles de inversión, impacto socio-económico y ambiental
- emplazamiento
- Competitividad con otras tecnologías de preservación y esterilización
- requerimiento de capacitación y formación de recursos humanos
- participación de la empresa privada

### **Esterilización de Materiales Biológicos y Productos Médicos**

También se la conoce como esterilización en frío y constituye una floreciente y bien establecida industria mundial con gran capacidad de tratamiento de altos volúmenes. La radio-esterilización es una excelente y competitiva alternativa, muchas veces insustituible, a las tecnologías convencionales de esterilización como ser la temperatura y tratamiento con gases. En este tipo de aplicaciones, ambas fuentes, Cobalto-60 y Tecnología E. Beam son ampliamente utilizadas, pero como se mencionó en otra parte, la tecnología basada en aceleradores de electrones está tomando mayor importancia, sobre todo en los países desarrollados.

Las aplicaciones comerciales más frecuentes son:

- Esterilización de órganos para implantes, injertos de membranas, hidrogeles absorbentes y prótesis
- Esterilización de productos de uso médico: guantes, gasas, vendas, bisturís, jeringas y agujas de inyección

### **Modificación, Mejora y Producción de Nuevos Productos Industriales**

Este tipo de aplicaciones industriales se refiere a la inducción de polimerización y modificación de las propiedades de materiales mediante las radiaciones ionizantes. También se refiere al tratamiento o cura de superficies y polimerización cruzada y degradación de materiales poliméricos naturales de alto peso molecular para darles un mayor valor agregado o bien para acondicionarlos como residuos de mejor costo de tratamiento final.

El procesamiento de polímeros para darles mejores propiedades mecánicas, eléctricas, estabilidad térmica es otra industria donde la tecnología ha encontrado amplia aplicación comercial.

Para este tipo de aplicaciones, la Tecnología Ebeam ha demostrado ser muy competitiva. Aceleradores de electrones de alta energía ( 200 a 10 MeV) para este tipo de aplicaciones constituye la aplicación comercial más importante de estas máquinas. A nivel mundial, se

han instalado más de 1000 aceleradores dedicados solo para la industria de las llantas para automóviles y aislantes de cables, además de otros materiales como plásticos especiales que se encogen con la temperatura (efecto memoria de los plásticos).

Otro ejemplo que está encontrando cada vez mayor aplicación es la degradación de la lignina en el material celulósico proveniente de los desechos de la agro-industria, esto con el fin de aumentar la digestibilidad de estos materiales y convertirlos en alimento para animales.

### **Remediación Medioambiental.**

Las aplicaciones de las radiaciones ionizantes en la preservación y remediación del medio ambiente son amplias, tanto para tratar residuos sólidos, líquidos como gases. El tratamiento se basa en la acción de los radicales libres que se forman por acción de la radiación ionizante.

Las aplicaciones más prominentes y que alcanzaron niveles comerciales pasando por fases largas de investigación y desarrollo son las siguientes:

- Tratamiento de aguas de desecho de las industrias químicas mediante la degradación de sustancias tóxicas o poco biodegradables.
- Desinfección de aguas residuales urbanas por la eliminación de bacterias y patógenos.
- Degradación de compuestos orgánicos volátiles (VOC) que muchos de ellos son cancerígenos.
- Purificación de gases emitidos por la industria de generación eléctrica en las plantas termoeléctricas, que elimina simultáneamente los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y óxidos de azufre (SO<sub>2</sub>).

### **Resumen Comparativo de Tipos de Plantas de Irradiación, sus Costos y Requerimientos Básicos**

En la siguiente tabla se resumen las alternativas técnicas descritas en el documento junto a los principales aspectos técnicos y los costos relacionados.

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

## RESUMEN COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGIAS DE PLANTAS DE IRRADIACIÓN DE COBALTO-60 Y SUS REQUERIMIENTOS

<b>OBJETIVO GENERAL:</b> 1) Mejorar la inocuidad de los alimentos y contribuir a la mejorar la seguridad alimentaria y proveer servicios de esterilización mediante el uso de radiaciones				
<b>OBJETIVO ESPECIFICO:</b> Instalar una Planta multipropósito de irradiación comercial usando Cobalto-60				
Parametros de Comparación	Categoría I	Categoría II	Categoría III	Categoría IV
Alternativa Tecnológica				
Tipo	Celda autoblandada	Recinto blindado	Recinto tipo piscina	Sala blindada seca
Capacidad Máxima de Carga de Cobalto-60	100- 20,000 Ci	1 Kci- 500 Kci	200 KCi	10 millones de KCi
Sistema de transporte	N/A	Necesario	Necesario	Necesario
Aplicaciones y Servicios	Investigación y Desarrollo. Irradiación de tejidos, implantes y sueros y sangre	Irradiación industrial de alimentos, especies, esterilización de productos médicos, cosméticos, etc.	Irradiación industrial de alimentos, especies, esterilización de productos médicos, cosméticos, etc.	Irradiación industrial de alimentos, especies, esterilización de productos médicos, cosméticos, etc.
Potencialidad para la formación, capacitación e investigación	Dosimetría de las Radiaciones, microbiología, mutaciones, tesis de estudiantes	Dosimetría de las Radiaciones, microbiología, mutaciones, tesis de estudiantes	Dosimetría de las Radiaciones, microbiología, mutaciones, tesis de estudiantes	Dosimetría de las Radiaciones, microbiología, mutaciones, tesis de estudiantes
Rango de Costos:Irradiador(US\$) sin carga de Cobalto-60	200 mil	1 millón	1 millón	1-2 millones
Rango de Costos: Obra Civil (en millones de dolares US\$)	20-50 mil	500 mil	500 mil a 1 millón	500 mil a 1 millón
Rango de Costos: Equipos e instrumentación nuclear (US\$)	20-50 mil	50-100 mil	50-100 mil	50-100 mil
Rango de Costos: Operacion y Mantenimiento (anuales en miles de dolares US\$)	10.0 - 20.0	30 - 100 mil	30 - 100 mil	30 - 100 mil
Costo de Carga de Co-60	2 U\$/Ci de Actividad	2 U\$/Ci de Actividad	2 U\$/Ci de Actividad	2 U\$/Ci de Actividad
Req. de Personal con formación a nivel III	Op. y Mant.: 1 Físico	Op. y Mant.: 3-4 Ingenieros mecánicos, industriales, dosimetría	Op. y Mant.: 3-4 Ingenieros mecánicos, industriales, dosimetría	Op. y Mant.: 3-4 Ingenieros mecánicos, industriales, dosimetría
	Utilizacion: 3-5 Físicos, Radioquímicos, Investigadores en varias áreas	Utilizacion: 3-5 bioquímicos, químicos industriales, microbiólogos, toxicólogos	Utilizacion: 3-5 bioquímicos, químicos industriales, microbiólogos, toxicólogos	Utilizacion: 3-5 bioquímicos, químicos industriales, microbiólogos, toxicólogos
Beneficiarios	Hospitales, bancos de tejidos y sangre. Capacitación e Investigadores en radiobiología y dosimetría.	Industria de alimentos y exportadores. La población en general al tener mejor asegurada la inocuidad de los alimentos. Industria de productos de uso médico como jeringas, guantes, etc.	Industria de alimentos y exportadores. La población en general al tener mejor asegurada la inocuidad de los alimentos. Industria de productos de uso médico como jeringas, guantes, etc.	Industria de alimentos y exportadores. La población en general al tener mejor asegurada la inocuidad de los alimentos. Industria de productos de uso médico como jeringas, guantes, etc.
Fabricantes Comerciales	'MSD Nordion, Canadá, Izotope-Insitute, Hungría, Gamma-Service, Alemania, Symec Enineers PVT Ltd. India, IEN, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Brasil	'MSD Nordion, Canadá, Izotope-Insitute, Hungría, Gamma-Service, Alemania, Symec Enineers PVT Ltd. India, IEN, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Brasil	'MSD Nordion, Canadá, Izotope-Insitute, Hungría, Gamma-Service, Alemania, Symec Enineers PVT Ltd. India, IEN, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Brasil	'MSD Nordion, Canadá, Izotope-Insitute, Hungría, Gamma-Service, Alemania, Symec Enineers PVT Ltd. India, IEN, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Brasil
Mínimo Espacio Físico Requerido, incluye espacio para el reactor e instalaciones mínimas (en mts 2)	30-100	100-200	200-300	300-1000

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

Comentarios a la tabla comparativa.

En el Capítulo de Instalaciones Nucleares, sección Plantas de Irradiación, se dan los justificativos que explican y justifican la asignación de la prioridad relativa que se le asigna a esta facilidad nuclear.

La clasificación que se sigue en este estudio es la recomendada por el Organismo Internacional de Energía Atómica.

Los costos de los irradiadores comerciales varían muchísimo; sin embargo, lo que más incide es el costo y transporte del Cobalto-60 desde el país productor (al momento son Argentina, Canadá y la India). Para tener una idea más aproximada al respecto, se tiene conocimiento que para un país asiático, para las mismas especificaciones técnicas, los precios ofertados por tres proveedores comerciales de estas plantas, variaron desde 1,5 millones hasta 5 millones de dólares, incluyendo una carga inicial de 150 KCi de Cobalto-60.

## Estrategias para la Implementación de Instalaciones Nucleares

Como toda infraestructura de equipos y laboratorios de envergadura y carácter nacional, las Instalaciones Nucleares a las que se refiere esta consultoría, a saber, reactores nucleares experimentales, aceleradores de partículas representado por un ciclotrón y una planta de irradiación, *deben ser esencialmente instalaciones nacionales* y no privadas (aunque lo podrían ser como ocurre en otros países), financiadas por el estado y que su vigencia e utilización será por muchos años al futuro.

### a. Reactor Nuclear de Investigación

- *Criterios Políticos:* La implementación de un reactor nuclear de investigación estratégicamente debe seguir conceptos relacionados con a) *seguridad y diversificación de la matriz energética* del país en un mediano y largo plazo b) capacitación de recursos humanos de alta calificación de una forma permanente y sostenida, muy particularmente para apoyar, en su momento, a los planes de seguridad energética mediante las aplicaciones energéticas de la energía nuclear, c) contribución al desarrollo científico y tecnológico y d) prestación de servicios que la industria y al comercio.
  
- *Involucrados:* Los principales involucrados de la implementación de un reactor nuclear de investigación, identificados en el Estudio de Situación, son:
  - o El VCyT para implementar de una manera más efectiva el Plan de Formación de Recursos Humanos, y el IBTEN como su brazo ejecutor de las actividades de desarrollo, promoción y de coordinación de las actividades nucleares en el país,
  - o Las universidades del Sistema Nacional de Universidades para implementar de forma teórica, experimental y sostenida en el tiempo, sus programas de formación de recursos humanos y de investigación en el área nuclear.
  - o Los ministerios y sus reparticiones técnicas del área de desarrollo y productiva que requieran los servicios del reactor para el análisis de recursos naturales, por ejemplo, exploración de minerales y de hidrocarburos, fertilidad de suelos, etc.,

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- El Vice Ministerio de Electricidad y Energías Alternativas que podrá contar con profesionales bolivianos con alta y específica capacitación en temas de las aplicaciones energéticas de la energía nuclear para desarrollar planes de incorporar la componente nuclear en la matriz energética nacional,
  - Emprendimientos privados industriales y comerciales que requieran servicios analíticos de alta precisión y 6) la sociedad en general que verá incrementada el nivel de información que tiene sobre asuntos nucleares.
- *Requerimientos de recursos humanos* para la operación e utilización de un reactor de investigación, se puede estimar como sigue:
- Operación y mantenimiento, de planta: 4-6 ingenieros entre nucleares, electromecánicos, electrónicos y radio protección.
  - Servicio: de planta, dependiendo del volumen y tipo de servicios: 3-5 profesionales químicos y físicos con especialización nuclear
  - Utilización: variable y no de planta, dependiendo de los proyectos y convenios con universidades e institutos de investigación que harían uso de las instalaciones para realizar sus proyectos de investigación en áreas de química, física, biología, geología, minería, etc.

### **b. Ciclotrón**

- *Criterios Políticos:* La implementación de un ciclotrón estratégicamente debe basarse en: a) *mejorar la salud y calidad de vida de la población nacional* mediante los servicios de medicina nuclear con metodología y procedimientos efectivos y modernos, b) *contribución al desarrollo e investigación científico y tecnológico* y c) *prestación de servicios que la industria y al comercio.*
- *Involucrados:* Los *principales involucrados* de la implementación de un ciclotrón identificados en el Estudio de Situación son:
- En primer lugar el sistema público de salud y el Ministerio de Salud y los centros públicos de medicina nuclear que contarán con una metodología de medicina nuclear basado en la modalidad de la Tomografía por Emisión de Positrones todavía no existente en el país para realizar diagnóstico precoz

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- del cáncer y un mejor manejo de pacientes con este mal, un beneficio claro y directo de una técnica nuclear,
- Las universidades del Sistema Nacional de Universidades para implementar de forma teórica, experimental y sostenida en el tiempo, sus programas de formación de recursos humanos y de investigación en el área nuclear, y muy en particular, estudiantes y profesionales en el área biomédica
  - Dependiendo del tipo y características del ciclotrón que se vaya a instalar, también podrán beneficiarse sectores tales como emprendimientos privados industriales y comerciales que requieran servicios analíticos de alta precisión
  - La sociedad en general que verá incrementada el nivel de información que tiene sobre asuntos nucleares.
- Los *requerimientos de recursos humanos* para la operación e utilización de un ciclotrón, se puede estimar como sigue:
- Operación y mantenimiento, de planta: 3-4 ingenieros entre electromecánicos, electrónico, físicos y radio protección.
  - Servicio, de planta: producción y control de calidad de radiofármacos de PET. 3-5 profesionales químicos, radioquímicos, farmacéuticos.
  - Investigación y Desarrollo, de planta, variable, entre 3-10 investigadores.
  - Utilización: variable y no de planta, dependiendo de los proyectos y convenios con universidades e institutos de investigación que harían uso de las instalaciones para realizar sus proyectos de investigación en áreas de bioquímica, biología, química y física principalmente.

### **Planta de Irradiación**

*Criterios Políticos:* La implementación de una Planta de Irradiación debe estar conceptualmente y estratégicamente ligada a: a) *la seguridad e inocuidad alimentaria* al prestar servicios de irradiación de alimentos, b) estrategias de exportación de productos excedentarios de la agro-industria y forestal dándoles mayor valor agregado e incrementando su competitividad, c) contribución al desarrollo científico y tecnológico y d)

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

prestación de servicios a la industria y al comercio. Para que pueda cumplir con este propósito, la planta tiene que ser de múltiple uso y no dedicada a una aplicación única. En su momento, el estudio de factibilidad definirá si un irradiador en base a Co-60 o un acelerador de electrones, será lo más conveniente para la situación boliviana.

- Involucrados: Los *principales involucrados* de la implementación de una Planta de Irradiación multipropósito son:
  - o La población boliviana al contar con la tecnología capaz de eliminar bacterias patógenas en los alimentos que puedan aparecer en brotes epidémicos (salmonella en carne de pollo por ejemplo, los virus no se eliminan por radiación),
  - o Sector productivo interesado en mejorar la competitividad en la exportación de productos que requieran cuarentena o bien certificación de inocuidad en alimentos, frutas, yerbas medicinales, etc.,
  - o Dependiendo del tipo de planta de irradiación, el Ministerio de Salud y hospitales en la gestión de bancos de sangre, tejidos e injertos.
  
- Los requerimientos *de recursos humanos* para la operación e utilización de una Planta de Irradiación gama multipropósito, se puede estimar como sigue:
  - o Operación y mantenimiento, de planta: 3-4 ingenieros entre electromecánicos, electrónico y radio protección.
  - o Servicio, de planta: esterilización de alimentos y otros productos industriales, 3-5 profesionales bioquímicos y químicos industriales, microbiólogos, fitopatólogos, toxicólogos..
  - o Investigación y Desarrollo, de planta, variable, entre 3-5 investigadores, bioquímicos, químicos, biólogos.

### **Sugerencia de Prioridades**

Sin estudios más profundos como lo podría brindar estudios de pre factibilidad o de factibilidad, al momento resulta muy difícil y arbitrario establecer prioridades relativas de implementación en el tiempo. Naturalmente, por razones de una planificación ordenada y realista, incluyendo los recursos humanos y financieros, es realista pensar que no será posible la implantación simultánea de las tres instalaciones nucleares objeto de este

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

estudio. Sin embargo, idealmente, dentro de un periodo de 5 a 10 años a partir del 2012, las tres instalaciones nucleares podrían ser implementadas. Habrá que tener en cuenta que en un periodo de 10 los diseños podrían haber cambiado y incluyendo los actuales fabricantes y también los precios aproximados que se dan en este estudio.

Dicho esto, la consultora, en base a las opiniones de los profesionales consultados, y en base también a los resultados del Estado de Situación, se anima a proponer el siguiente orden de prioridades:

1. Ciclotrón para uso en la medicina nuclear.
2. Reactor nuclear de investigación
3. Planta de Irradiación multipropósito

El argumento principal para proponer esta escala de prioridades es que en el país ya existe una política de salud bien definida por el Estado, que en este caso, está dirigida a combatir el flagelo del cáncer.

Por otra parte existen centros de medicina nuclear en el país, que ampliarían sus servicios de medicina nuclear introduciendo metodologías modernas y más efectivas de diagnóstico precoz del cáncer, metodología que todavía no se aplica en el país por la falta de un ciclotrón que produzca los radioisótopos necesarios para la práctica de esta modalidad de imagen.

La segunda prioridad asignada a la implantación de un reactor nuclear de investigación, es porque un reactor es un instrumento esencial para la formación de recursos humanos en el área nuclear, sobre todo para profesionales que eventualmente se involucrarían en proyectos de generación de nucleoelectricidad. Como este tipo de proyecto es todavía muy prematuro en Bolivia y que llevará todavía muchos años su implementación, la implantación de un reactor nuclear, aunque esencial para estos fines, puede ser postergada por algunos años.

Finalmente, en el caso de una Planta de Irradiación, aunque propuesta como una facilidad multipropósito, la irradiación de alimentos sería la principal aplicación. En opinión de la consultora, la irradiación de alimentos todavía no es prioritaria toda vez que la mayoría de los productos agrícolas exportables en volúmenes significativos, como la soya y el azúcar,

no son productos a los que se aplica la irradiación. En el caso de frutas (mangos, papayas, frutillas, etc.), papas, ajos, cebollas y productos similares, no presentan problemas de gestión de almacenamiento y cuarentena que impidan su exportación. Los problemas son al parecer que no hay producción suficiente para la exportación.

Sin embargo, yerbas medicinales, especies y condimentos como el orégano, legumbres como habas, de los que se tiene información del Instituto Boliviano de Comercio Exterior que son exportados, pueden ser objeto de irradiación tal como ya ocurre en muchos países.

En el caso especial de la castaña, que es el producto estrella de exportación de la zona amazónica que genera más de 70 millones de dólares anuales por la exportación de 22 mil toneladas, y otros productos similares que contienen lípidos, los que son radio sensibles y se deterioran con la radiación, aunque es posible el uso de la radiación, esto merece de un estudio serio para la implementación de una planta de irradiación en el futuro.

De manera práctica, la consultora sugiere que para poder efectivizar las estrategias de implementación sugeridas, con el apoyo del VCyT y otras instancias públicas y recurriendo a la colaboración internacional, y bajo dirección del IBTEN como brazo ejecutor del VCyT, propone:

- En el primer trimestre del 2012, organizar eventos de divulgación e información a nivel de organismos del estado, universitario, empresa privada, etc., sobre las aplicaciones de las tres Instalaciones Nucleares que se mencionan.
- Durante el año 2012, encomendar la elaboración de sendos estudios de pre factibilidad para evaluar con mayor profundidad la pertinencia de estas instalaciones, establecer sus potenciales costos, necesidades y requerimiento de formación de recursos humanos, establecer áreas concretas de aplicación y proponer potenciales emplazamientos.
- Dependiendo de las conclusiones de las actividades del 2012, ya habrían elementos cualitativos y cuantitativos para que las autoridades apoyen y decidan la elaboración de estudios de factibilidad con la profundidad necesaria para la toma final de decisiones por quien corresponda en el periodo del 2013.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

*NOTA: En la propuesta del Programa Nuclear Boliviano y del respectivo Plan de Ciencia y Tecnología, se detallan programas y proyectos y sus plazos respectivos para su implementación, que comprenden el corto, mediano y largo plazos. En este capítulo se dará también un vistazo de lo que podrían ofrecer algunos países vecinos como Argentina, Brasil, Chile, Perú y el Uruguay en términos de capacitación y formación de recursos humanos nacionales utilizando sus actuales instalaciones nucleares.*

### **Marco Político-Estratégico para las Instalaciones Nucleares**

*El marco político-estratégico para proponer y justificar la consideración de la implementación de las tres Instalaciones Nucleares es el Plan Nacional de Desarrollo (PDN) que ha aprobado el Gobierno del Estado Plurinacional de Bolivia.*

El PND propone temáticamente varias líneas maestras o fundamentales llamadas Estrategias Nacionales, entre las que mencionaremos a la *Bolivia Digna* y la *Bolivia Productiva*, por tener mayor o más directa relevancia al propósito que nos ocupa en este estudio de la Instalaciones Nucleares. La estrategia nacional Bolivia Digna incluye sectores estratégicos, siendo el sector Salud y Educación los más relevantes. Por otro lado, la estrategia nacional Bolivia Productiva incluye a la Minería, Electricidad, Recursos Ambientales (agua y biodiversidad), Desarrollo Agropecuario y Ciencia, Tecnología e Innovación, sectores que son considerados relevantes para el presente caso.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

En la siguiente Tabla, se hace una relación entre los objetivos de los sectores arriba identificados y las posibilidades o roles que jugarían las Instalaciones Nucleares en el cumplimiento de los grandes objetivos nacionales expresados y delineados en el Plan Nacional de Desarrollo.

### PLAN NACIONAL DE DESARROLLO ( 2006-2010) e INSTALACIONES NUCLEARES

Estrategia Nacional	Sector Estratégico	Políticas y Estrategias	Reactor Nuclear de Investigación	Ciclotrón	Plantas de Irradiación
<b>BOLIVIA DIGNA</b>	1. Salud	<b>Política 4.</b> Promoción de la salud, mejoramiento de la alimentación y nutrición	Producción de Radioisótopos y radiotrazadores para estudios de procesos de absorción de nutrientes en patologías de relevancia nacional.  Herramienta analítica para la determinación cualitativa y cuantitativa de nutrientes y micronutrientes en los alimentos	Producción de radioisótopos para servicios mejorados de medicina nuclear, diagnóstico precoz del cáncer y otras patologías, como la hipoxia, patología muy importante para la población de las alturas, fisiología en el deporte de altura.  Disponibilidad de una herramienta nuclear para la formación de recursos humanos con la formación y la experiencia necesaria para participar y contribuir a desarrollo tecnológico y a la matriz productiva	Mejorar la inocuidad de los alimentos agropecuarios ( inocuidad alimentaria)
	2. Educación	<b>Política 2</b> Educación de calidad que priorice la igualdad de Oportunidades y que genera, adopta y aplica ciencia y tecnología	Disponibilidad de una herramienta científica y tecnológica para la formación de recursos humanos con la formación y la experiencia necesaria para participar y contribuir al desarrollo tecnológico y a la matriz productiva.	Disponibilidad de una herramienta científica y tecnológica para la formación de recursos humanos con la formación y la experiencia necesaria para participar y contribuir a desarrollo tecnológico y a la matriz productiva	Disponibilidad de una herramienta científica y tecnológica para la formación de recursos humanos con la formación y la experiencia necesaria para participar y contribuir a desarrollo tecnológico y a la matriz productiva

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

## PLAN NACIONAL DE DESARROLLO ( 2006-2010) e INSTALACIONES NUCLEARES

Estrategia Nacional	Sector Estratégico	Políticas y Estrategias	Reactor Nuclear de Investigación	Ciclotrón	Plantas de Irradiación
<b>BOLIVIA PRODUCTIVA</b>	1. Minería	<p><b>Política 3.</b> Ampliar el potencial geo-mineralógico mediante programas de prospección y exploración de nuevos yacimientos. Proyectos mineros como Mutún, Salar de Uyuni y otros</p> <p><b>Política 4.</b> Diversificación de la Producción en el contexto de la política de diversificación de la minería e incorporación de mayor valor agregado, se crearán las los proyectos de industrialización condiciones para aumentar la producción minera e impulsar</p>	<p>Uso de los reactores como herramienta analítica para relevamiento de depósitos de minerales y otros recursos mineralógicos de valor comercial. Relevamiento geológico como lo está haciendo el SERGEOTECMIN, servicio a empresas mineras estatales y privadas</p> <p>Uso de los reactores como herramienta analítica para los grandes proyectos tecnológicos mineros en curso y para apoyar los proyectos de industrialización mineros.</p>	<p>Uso de los ciclotrones como para producir radiotrazadores de uso en la minería</p> <p>Uso de los ciclotrones como para producir radiotrazadores de uso en la industria</p>	No aplicable
	2. Electricidad	<p><b>Política 3.</b> Soberanía e independencia energética, cambio de matriz, aprovechamiento con de energía renovables y no renovables</p> <p><b>Política 4.</b> Reducción de Gases de Efecto Invernadero</p>	<p>Aunque no hay nada específico a la Energía Nuclear, sin embargo se enuncia que es de interés combatir al calentamiento global por los Gases de Efecto Invernadero. La nucleoelectricidad tiene contribución muy pequeña al calentamiento global. Los reactores nucleares de investigación son herramientas insustituibles para la formación de RH para futuros programas nucleoelectrónicos</p> <p>La nucleoelectricidad no tiene contribución apreciable al calentamiento global. Los reactores nucleares de investigación son herramientas insustituibles para la formación de RH para futuros programas nucleoelectrónicos</p>	No aplicable	No aplicable
	3. Recursos Ambientales. Agua y biodiversidad	<p><b>Política 6.</b> Agua para todos</p>	<p>Producción de Radioisótopos y radiotrazadores para estudios de procesos hidrológicos y evaluación de recursos hídricos subterráneos . Como técnica analítica, en estudiar calidad de aguas y suelos.</p>	<p>Producción de Radioisótopos y radiotrazadores para estudios de procesos hidrológicos y evaluación de recursos hídricos subterráneos . Como técnica analítica, en estudiar calidad de aguas y suelos.</p>	No aplicable

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

<b>PLAN NACIONAL DE DESARROLLO ( 2006-2010) e INSTALACIONES NUCLEARES (contd)</b>					
Estrategia Nacional	Sector Estratégico	Políticas y Estrategias	Reactor Nuclear de Investigación	Ciclotrón	Plantas de Irradiación
<b>BOLIVIA PRODUCTIVA</b>	4. Desarrollo agropecuario	<p><b>Política 3.</b> Desarrollo tecnológico de la Producción agraria. Se promoverá la sustitución paulatina de agroquímicos por el manejo integrado de plagas y la fertilización orgánica de los suelos. En ambos casos se efectuará difusión de tecnologías mejoradas de cosecha y poscosecha específicos para cada rubro agrícola, para evitar las pérdidas.</p>	<p>Como técnica analítica, en estudiar calidad de aguas y suelos, alimentos y control de calidad de la producción agropecuaria</p>	<p>Como técnica analítica de radiotrazadores para estudiar calidad de aguas y suelos, alimentos y control de calidad de la producción agropecuaria</p>	<p>Mejoramiento de semillas, por ej. Resistentes a la sequía, salinidad, etc. Tecnología de preservación de alimentos postcosecha</p>
	5. Ciencia, Tecnología e Innovación	<p><b>Política del sector:</b> La nueva matriz productiva con la participación del componente científico, tecnológico y de innovación. Intervención del Estado para canalizar el uso de centros científico-tecnológicos y para el canalizar el uso de centros científico-tecnológicos y para el desarrollo de los procesos de innovación tecnológica, en desarrollo de los procesos de innovación tecnológica, en respuesta a los problemas específicos del sector productivo.</p> <p><b>Política del sector.</b> Aprovechamiento Sostenible y Conservación de la Biodiversidad</p>	<p>Contribuye con la formación de recursos humanos de alta calificación para incorporarse a los procesos de desarrollo científico, industrial y de innovación</p> <p>Producción de Radioisótopos y radiotrazadores para estudios de ecosistemas terrestres, lacustres y de ríos . Como técnica analítica, en estudiar calidad de aguas y suelos y el manejo sostenible de los mismos.</p>	<p>Contribuye con la formación de recursos humanos de alta calificación para incorporarse a los procesos de desarrollo científico, industrial y de innovación</p> <p>Producción de Radioisótopos y radiotrazadores para estudios de ecosistemas. Como técnica analítica, en estudiar calidad de aguas y suelos y el manejo sostenible de los mismos.</p>	<p>Contribuye con la formación de recursos humanos de alta calificación para incorporarse a los procesos de desarrollo científico, industrial y de innovación Contribuye a la soberanía alimentaria y a productos con valor agregado y con mayor competitividad para su exportación.</p> <p>Estudios de mutación genética para preservar y fortalecer la biodiversidad</p>

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

*La interpretación de esta Tabla indica que los tres tipos de Instalaciones Nucleares son y tienen relevancia para la situación boliviana y responden a los requerimientos de la política y estrategia de desarrollo del Estado expresada en el Plan Nacional de Desarrollo. La efectiva utilización de estas instalaciones y el impacto que puedan tener en las políticas y estrategias de desarrollo nacional, dependerá de una manera determinante, por un lado, de políticas de estado de corto, mediano y largo plazo con el apoyo financiero adecuado, y por otro, de programas de utilización bien definidos con claros objetivos nacionales y de la disponibilidad de recursos humanos de alta calificación.*

### **Conclusiones**

- Los tres tipos de Instalaciones Nucleares propuestas tienen relevancia para apoyar efectivamente al Programa Nacional de Desarrollo que promueve el Estado Plurinacional de Bolivia en importantes áreas estratégicas de desarrollo económico, tecnológico, científico y social.
- Las áreas de importancia de desarrollo económico y social identificadas son a) seguridad y diversificación de la matriz energética del país en un mediano y largo plazo mediante incorporación de la energía nuclear, b) mejoramiento de la salud y calidad de vida mediante la incorporación a los servicios de medicina nuclear de modernas y efectivas técnicas de diagnóstico precoz y c) mejorar la seguridad alimentaria con por medio de la preservación y conservación de alimentos.
- Las Instalaciones Nucleares son excelentes e insustituibles herramientas para la capacitación y formación sostenida de recursos humanos de alta calificación y de para establecer programas y proyectos de investigación para resolver problemas específicos y particulares del país.
- Las Instalaciones Nucleares que se proponen deben ser instalaciones nacionales, financiadas y operadas por entidades del estado e universidades nacionales.
- Existe la necesidad de elaborar estudios de pre y de factibilidad que contribuyan a la toma final de decisiones por parte de las autoridades dentro de su visión de desarrollo nacional. Estos estudios también permitirán establecer prioridades de implementación entre los tres tipos de instalaciones propuestas.
- La eficiente y segura utilización de las Instalaciones Nucleares a las que se hacen referencia en este estudio, requerirá de la participación de profesionales con alto nivel de formación teórico y práctico. Esta formación, además de realizarse en el país, para niveles avanzados como licenciaturas, maestrías y doctorados, deberán iniciarse y

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

llevarse a cabo en institutos nucleares de países amigos con los que se tendrá que firmar acuerdos de cooperación.

## **CAPITULO 4**

# **LINEAMIENTOS PARA EL PROGRAMA NUCLEAR BOLIVIANO**

### 4.1. Introducción

Los países vecinos de Bolivia, casi sin excepción ya tienen por muchos años muy bien definidas sus políticas nucleares, las que se reflejan en los avanzados programas tecnológicos, por ejemplo, la construcción y operación de centrales nucleares de generación de electricidad, tal el caso de Argentina y Brasil. Por otra parte, Argentina, Brasil, Chile y Perú, operan además reactores nucleares de investigación, con los que dieron inicio a sus programas nucleares de corto, mediano y largo plazo.

En la región de América Latina, además de los países limítrofes a Bolivia arriba mencionados, Colombia y México también operan reactores nucleares de investigación. Sumado a esto, muchas de sus universidades sustentan programas de educación especializada, llegando a otorgar grados académicos superiores como lo son las maestrías y doctorados en ciencias e ingeniería nuclear. Muchas de ellas, con el soporte de sus gobiernos, operan además institutos y programas de investigación básica y aplicada.

En Bolivia, las actividades nucleares comenzaron con la fundación de la Comisión Boliviana de Energía Nuclear (COBOEN) a comienzos de los años 60 del siglo pasado, iniciando algunas aplicaciones de los radioisótopos, en particular, en la medicina nuclear, especialidad que tuvo y tiene un impacto visible en el diagnóstico médico en el país como se describe con más detalle en la primera parte de este informe de consultoría (Producto N.2).

Si bien en los años siguientes se desarrollaron numerosos proyectos que incluyeron la exploración de minerales de uranio, aplicaciones en la industria y agricultura, además de las aplicaciones en medicina, no se llegó totalmente a formular una política nuclear como tal. Más bien en las últimas dos o tres décadas, se observa una declinación de las actividades nucleares y una pérdida notable de recursos humanos calificados que la COBOEN había promovido exitosamente por muchos años.

Por otra parte, posiblemente a falta de una visión y una política nuclear gubernamental que actué dando orientación, motivación y apoyo; las universidades nacionales tampoco desarrollaron programas sostenidos de enseñanza e investigación en el área nuclear.

A comienzos del Siglo XXI cabe hacerse la pregunta si los paradigmas válidos en el siglo anterior son todavía relevantes o se incorporaron nuevos desafíos y metas a las políticas nucleares de los países. Es desde esta perspectiva de actualización y modernización que

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

se tiene que plantear la necesidad y relevancia de formular un Programa Nuclear Boliviano (PNB) que contribuya a la implementación de políticas de estado de desarrollo. Las necesidades tecnológicas de la sociedad moderna en este siglo, de la que Bolivia no puede ni debe abstraerse, están relacionadas principalmente con la seguridad energética, la seguridad alimentaria, la preservación del medio ambiente, la explotación racional y sostenible de los recursos naturales y la disminución de los efectos negativos del cambio climático.

En este escenario, la contribución de la ciencia y tecnología nuclear actual y la que se espera del desarrollo científico en el próximo futuro, contribuirá a la solución de estos retos, como ya es por demás comprobada en numerosos ejemplos, tanto en países desarrollados tecnológicamente como en los en vías de desarrollo.

Hoy en día, no existe un solo país que aspire a un desarrollo tecnológico importante, que no sostenga programas nucleares de alguna envergadura que opere en estrecha sinergia con otros sectores de la industria y la economía. El ejemplo más sobresaliente al respecto entre los países de economías emergentes lo podemos encontrar en nuestro vecino Argentina, que a la fecha es uno de los pocos países a nivel mundial que manufactura y exporta tecnología nuclear en forma de reactores de investigación y otros componentes que requiere la tecnología nuclear, y el único en América Latina que lo hace. La República de Corea del Sur es otro ejemplo que vale la pena mencionar, que después de ser importador neto de tecnología nuclear, ahora se convirtió en un país que exporta reactores de potencia para la generación de nucleoelectricidad.

Conscientes de esta contribución científica y tecnológica al desarrollo industrial y económico, muchos países han elaborado y adoptado políticas nucleares a la vez que implementaron estrategias para lograr una efectiva aplicación de las ciencias y tecnologías nucleares a sus planes nacionales de desarrollo estratégico.

Esta política visionaria, que en realidad ya lleva varias décadas de implementación en muchos países de la región latinoamericana y del mundo, es reconocida como acertada, puesto que contribuyó al avance científico y tecnológico de una manera significativa de estos países.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

Las áreas inmediatas de atención de esta política son muy variadas y deben abarcar aspectos como la planificación energética que tome en cuenta la contribución de la energía nuclear mediante la implementación de una central nuclear de generación de nucleoelectricidad, el conocimiento del potencial uranífero del país mediante la prospección, exploración minera y su eventual explotación, incluyendo la planificación y desarrollo del potencial tecnológico que representa los enormes recursos de litio para la energía de fusión nuclear como la energía del Siglo XXI y más allá.

Por otra parte, las aplicaciones no energéticas en la medicina, industria, agricultura, recursos naturales, medioambiente y la formación de recursos humanos de alta calificación ( fundamentalmente Niveles III y IV del Plan de Formación de Recursos Humanos) mediante la creación de programas universitarios avanzados en ciencias e ingeniería nuclear, y la creación de institutos de investigación especializados diseminados estratégicamente en todo el territorio nacional, son aspectos muy importantes de una política nuclear.

Es vital e imprescindible que el Gobierno del Estado Plurinacional tome consciencia de la importancia y del rol que juega la energía nuclear en el desarrollo tecnológico de los países, y decida enfrentar el reto de recorrer el camino nuclear de una manera programada, realista, efectiva y sostenida en el tiempo.

El mecanismo de implementación de una política nuclear, debe ser la adopción de un Programa Nuclear Boliviano que priorice, administre y regule toda la actividad nuclear en el territorio nacional, además que promueva y desarrolle las aplicaciones pacíficas energéticas y no energéticas de la energía nuclear. En otras palabras, la política nuclear está reflejada en el PNB del Estado Plurinacional de Bolivia.

### **4.2. Lineamientos básicos del Programa Nuclear Boliviano**

Los desafíos presentes y futuros del país concordantes con los nuevos paradigmas del vivir bien y la revolución productiva, son lograr mayor seguridad energética y alimentaria, mejorar la calidad de vida. La reducción de la mortalidad por atención tardía o no atención de enfermedades neoplásicas por ejemplo, requerirá de la contribución de tecnologías convencionales como también de tecnologías avanzadas y modernas, como lo son las

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

tecnologías nucleares. Es desde esta perspectiva que se tiene que plantear la relevancia y urgencia de formular un PNB.

Esta necesidad se hace todavía más evidente, toda vez que el gobierno boliviano manifestó recientemente su preocupación e interés por diversificar las fuentes de energías nacionales, y el interés de incursionar en la generación de nucleoelectricidad como una fuente energética más, que contribuya, junto con las fuentes renovables y no renovables con las que cuenta el país, a la seguridad energética de Bolivia y transformar al país en un centro regional de producción, distribución y comercialización de energía en la región de la América del Sur en un próximo futuro.

***El Programa Nuclear Boliviano es el instrumento y mecanismo para que el Estado promueva el uso pacífico de la energía nuclear en Bolivia en sus ámbitos de las aplicaciones energéticas como no energéticas, define y guía la política internacional que adopta el Estado con otros estados nacionales, provee el marco legal y regulatorio para el uso seguro de las radiaciones ionizantes con la debida protección al medioambiente y a la población, se constituye en la plataforma para la formación y capacitación de recursos humanos para el mejor y seguro aprovechamiento de la energía nuclear, y que apalanque el desarrollo científico y tecnológico del país contribuyendo de esta manera al bienestar y al buen vivir de la población boliviana.***

El estado boliviano debe reafirmar su posición pragmática y creíble en base a una política nuclear claramente pacifista, muy importante en un mundo globalizado y de constante tensión por la potencial utilización de la energía del átomo con fines no pacíficos.

Programa Nuclear Boliviano debe seguir los siguientes lineamientos generales:

- El PNB es la política que adopta el Estado Plurinacional de Bolivia en materia nuclear, y como tal, debe dar respuesta a los retos presentes y futuros de la sociedad boliviana, los que están relacionados fundamentalmente con las siguientes áreas que se consideran temáticas o conceptuales:
  - a) seguridad e independencia energética,
  - b) seguridad alimentaria

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

c) acceso a una mejor salud,

d) desarrollo científico y tecnológico mediante las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear.

- Deben responder a los grandes objetivos nacionales establecidos en el Plan Nacional de Desarrollo que articula las políticas nacionales de desarrollo humano y social, educacional y económico, sostenibles y con responsabilidad medioambiental.
- Deben responder a los imperativos y necesidades contemporáneas de la sociedad boliviana contribuyendo a que se transforme en una sociedad moderna, tecnológica, productiva y competitiva.
- Deben promover el uso pacífico de la energía nuclear tanto en los ámbitos energéticos para generar nucleoelectricidad y en las aplicaciones de los radioisótopos y radiaciones ionizantes en la medicina, industria y agricultura.
- Debe definir claramente la política y la relevancia para Bolivia de las distintas etapas del llamado Ciclo del Combustible Nuclear, priorizando aquellos aspectos más urgentes y relevantes para el país, como lo sería la prospección, exploración y explotación de recursos minerales radioactivos.
- Deben proveer el marco legal y regulatorio para el uso seguro de las radiaciones ionizantes para proteger a la población y al medioambiente, promoviendo una cultura de seguridad y responsabilidad nuclear.
- Deben ser de largo aliento para el desarrollo de la ciencia y tecnología nuclear, posiblemente para los próximos 20 a 30 años con periódicas revisiones y actualizaciones que den respuestas efectivas y prácticas a los retos tecnológicos y sociales que enfrenta y enfrentará la sociedad boliviana.
- Participativa en la que intervienen todos los sectores del Estado y de la sociedad incluyendo las universidades y los sectores productivos públicos y privados.
- De relacionamiento estratégico y de cooperación con organismos internacionales como el OIEA y países amigos.
- 

A continuación se propone los siguientes programas y proyectos dentro de estas metas, en el entendido de que se trata de una propuesta en base a las conclusiones de este estudio y de la experiencia de la consultora; pero que de todas maneras tiene que ser en algún momento socializado, discutido y consensuado con actores e involucrados como: a)

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

autoridades del gobierno nacional incluyendo los ministerios pertinentes, en particular con el VCyT y el IBTEN, b) gobiernos departamentales, c) universidades nacionales y d) el sector productivo público y privado.

### 4.3. Programas y Proyectos del Plan de Ciencia y Tecnología Nuclear

#### Programas de Corto Plazo, 1-5 años

- Redacción y aprobación de leyes y reglamentos que viabilicen el alcance, contenido y estructura del Programa Nuclear Boliviano y de todas sus instancias incluyendo su correspondiente estructura de gestión y el Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología.
- Análisis de factibilidad de las Instalaciones Nucleares como se describe en el capítulo correspondiente tomando en cuenta las prioridades relativas entre las mismas sugerida en el capítulo sobre Instalaciones Nucleares.
- Planificación estratégica para la implementación del Plan de Formación de Recursos Humanos.
- Prospección, explotación y concentración de recursos minerales radioactivos en el territorio nacional

#### Proyectos a Corto Plazo, 1- 5 años

- Elaborar ley y reglamentos en materia de Energía Nuclear y sus Aplicaciones.
- Elaborar TdRs para realizar por lo menos un estudio de pre factibilidad y otro a nivel de diseño de una de las facilidades priorizadas para ser implementada. Realizar la convocatoria a firmas especializadas para la implementación de la facilidad.
- Instalación de un Ciclotrón: luego de aprobado el estudio de factibilidad y a diseño final y conseguido el respectivo financiamiento para la construcción de las obras civiles, fundación de la facilidad, puesta en marcha y operación (los proyectos de ciclotrón llevan generalmente de 2 a 5 años para su implementación y puesta en marcha).
- Formación de recursos humanos para la operación y mantenimiento del ciclotrón y toda la infraestructura de utilización, principalmente en radioquímica,

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

radiofarmacia, control de calidad y medicina nuclear clínica, incluyendo el uso de radiotrazadores.

- Elaboración de materiales de promoción, divulgación y capacitación según el Plan de Formación de Recursos Humanos, en particular en sus Niveles I, II y III.
- Revisión, actualización y elaboración de convenios de cooperación con gobiernos y organizaciones internacionales.
- Conjuntamente con el SERGEOTECMIN y el Ministerio de Minas y Metalurgia, elaborar proyectos para evaluar el potencial de minerales radioactivos en Bolivia. Elaboración de mapas geológicos de existencia y potencial de recursos de minerales radioactivos.
- Estudios preliminares sobre la Opción Nuclear nucleoelectrica.
- Formación de recursos humanos especializados que establezcan instrumentos para debatir la Opción Nuclear nucleoelectrica en el Estado Plurinacional.

### **Programas de Mediano Plazo, 5- 15 años**

- Implementación de otras instalaciones nucleares consideradas vitales para la consolidación del PNB (reactor de investigación y Planta multipropósito de Irradiación, y puesta en operación de las mismas siguiendo las prioridades mencionadas.
- Implementación del Plan de Formación de Recursos Humanos en su Niveles III y IV
- Elaboración de estrategias y campañas informativas y educativas para desarrollar difundir conocimiento y cultura de los beneficios para la sociedad boliviana de los usos pacíficos de la energía nuclear.
- Introducción de la Energía Nuclear de Potencia
- Conclusión de la fase de elaboración del mapa de recursos uraníferos.

### **Proyectos a Mediano Plazo, 5- 15 años**

- Estudio de pre factibilidad y otro a nivel de diseño final de una segunda instalación nuclear siguiendo las prioridades establecidas.
- Elaborar proyectos de formación de recursos humanos que sustente la operación y utilización de la segunda instalación nuclear priorizada.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- Proyectos para concentrar los minerales de dos yacimientos identificados como viables técnica y económicamente.
- El Vice Ministerio de Energía y Energías Alternativas elabora un proyecto para la realización de un estudio de pre factibilidad para analizar la Opción Nuclear de generación de energía nucleoelectrica.

### **Programas de Largo Plazo, más de 15 años con un horizonte de hasta 20 años**

- Formación de Recursos Humanos en los Niveles III y IV
- Elaboración de estrategias y campañas informativas y educativas para desarrollar difundir conocimiento y cultura de los beneficios para la sociedad boliviana de los usos pacíficos energéticos de la energía nuclear.
- Generación de energía nucleoelectrica
- Continuación de la Exploración y Explotación de recursos minerales radioactivos en el territorio nacional

### **Proyectos a Largo Plazo, más de 15 años con un horizonte de hasta 20 años.**

- Estudios de factibilidad para una Planta Nuclear de Potencia
- Implementación de la primera planta nuclear de generación de nucleoelectricidad
- 

#### **4.4. Relacionamiento y Cooperación Internacional**

Una efectiva implementación del Plan de Ciencia y Tecnología depende, además de aspectos de políticas y estrategias de gobierno, de la disponibilidad de recursos humanos de alta calificación en temas nucleares, particularmente para una racional y efectiva utilización de las Instalaciones Nucleares propuestas en este estudio. Según se desprende de los resultados de Estado de Situación, con la excepción de la existencia de actividades e instrumentación nuclear en el CIAN-Viacha y el INAMEN, no existen otras posibilidades para la formación experimental de profesionales, ni si quiera en las universidades que fueron objeto de entrevistas.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

Ante esta situación, como ya fue mencionado en varias partes de este informe, será necesario recurrir a la cooperación internacional con países amigos que operan ya por muchos años instalaciones nucleares del tipo que concierne a este estudio de consultoría; es decir, reactores nucleares de investigación, ciclotrones y plantas de irradiación. La Consultora recomienda, sin desconocer otras posibilidades y oportunidades, en primer lugar, analizar lo que puede ofrecer países vecinos como Argentina, Brasil, Chile, Perú y Uruguay.

### ***Argentina***

Este país ya por muchos opera varios tipos de reactores nucleares de investigación en sus centros nucleares de Ezeiza y Bariloche dependientes de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), sosteniendo vigorosos programas de utilización y capacitación de recursos humanos a varios niveles, llegando hasta el doctorado en ciencia e ingeniería nuclear. En términos de ciclotrones, en el Centro Nuclear de Ezeiza opera un ciclotrón de 42 MeV que es utilizado para la producción de radioisótopos para la medicina nuclear y la industria. También la CNEA opera una planta de irradiación basada en Cobalto-60 en la que se podría realizar prácticas de capacitación en este tema.

Estas tres instalaciones de Argentina son muy adecuadas para la capacitación de profesionales, no solamente teórico; pero fundamentalmente práctico y por lo tanto, son muy relevantes para la situación boliviana en su esfuerzo de capacitación de profesionales.

### ***Brasil***

También ya por muchos años, Brasil opera dos reactores de investigación en Sao Paulo y Belo Horizonte dependientes de la Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN). Además, varias de sus universidades, en particular la Universidad de Sao Paulo, otorga grados académicos en ciencia e ingeniería nuclear. Por otra parte, Brasil es el país latinoamericano que opera el mayor número de ciclotrones tanto privados como nacionales. El IPEN, el instituto de Pesquisas Nucleares, opera dos ciclotrones para la producción de radioisótopos para la medicina nuclear, y el Centro Nuclear de Belo Horizonte opera un ciclotrón. En lo que se refiere a plantas de irradiación, el IPEN tiene ya una larga experiencia que llegó inclusive a convertirlo en un fabricante de esta tecnología,

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

utilizando sus plantas tanto para la irradiación de alimentos, esterilización de material médico y otras aplicaciones, como también para la investigación.

Por consiguiente, el Brasil puede ser un país al que se puede recurrir a la hora de implementar programas de capacitación teórica y práctica en la operación, mantenimiento y aplicaciones de reactores nucleares de investigación, ciclotrones y plantas de irradiación.

### **Chile**

Al presente Chile, en su Centro Nuclear de la Reina, en la ciudad de Santiago, opera un reactor de 5 MW de potencia (el reactor de otro centro, Lo Aguirre, no está operacional) dedicado fundamentalmente a la producción de radioisótopos para la medicina e industria y la formación de recursos humanos. Además en este centro nuclear, opera un ciclotrón de mediana energía para la producción de radioisótopos PET para la medicina.

Estas dos instalaciones y la experiencia que se tiene en su operación, mantenimiento y operación, son relevantes para la capacitación de profesionales bolivianos.

### **Perú**

El Perú opera un reactor nuclear de 10 MW, el de mayor potencia en América Latina el que está fundamentalmente siendo utilizado para la producción de radioisótopos, campo en el que tiene bastante experiencia. En cuanto a ciclotrones, no podemos decir lo mismo, puesto que solo en el año 2012, será puesto en operación el primer ciclotrón público (existe uno privado que ya está en operación). Además, también por muchos ya, se opera una planta industrial de irradiación de manera comercial en la ciudad de Lima basada en Cobalto-60 la que es utilizada para la irradiación de alimentos, especies y condimentos para la exportación.

En el caso del Perú, la cooperación que se puede buscar en cuanto a la capacitación de recursos humanos es en reactores nucleares (incluyendo un reactor de baja energía, el RP-0) y en plantas de irradiación; pero no por ahora, en ciclotrones.

### **Uruguay**

En el Uruguay no existe un reactor nuclear, aunque hasta los años 80, sí operaba uno de baja potencia que fue desmantelado. En lo que se refiere a ciclotrones, aunque el único que existe en el país fue puesto en operación en el 2010, ya se cuenta con un buen

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

número de profesionales con alta capacitación, tanto en su operación como en su uso para la producción de radioisótopos para la medicina nuclear. Por otro lado, también existe excelente experiencia en la operación de plantas de irradiación, como se lo puede ver en el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU) que ofrece servicios de irradiación de alimentos entre otros.

En el caso del Uruguay, las áreas en que este país podría ofrecer colaboración para la capacitación de recursos humanos son en el campo de ciclotrones y plantas de irradiación.

Naturalmente, otros países de la América Latina podrían también ser contactados y establecer mecanismos de cooperación, entre estos vale la pena mencionar Colombia (reactores de investigación y utilización), México (reactores de investigación y plantas de irradiación) y Cuba (plantas de irradiación, programas de capacitación en ciencias e ingeniería nuclear, manejo de radioisótopos y radiofármacos). No se debe tampoco descartar posibilidades y oportunidades de capacitación en países fuera de la región, ya sea de Europa o Asia.

Esta información se la considera relevante a la hora de discutir y evaluar y plantear la suscripción de convenios de cooperación con estos países.

### **4.5. Conclusiones**

- El mecanismo de implementación de una política nuclear, debe ser la adopción de un Programa Nuclear Boliviano que priorice, administre y regule toda la actividad nuclear en el territorio nacional, además que promueva y desarrolle las aplicaciones pacíficas energéticas y no energéticas de la energía nuclear.
- El Programa Nuclear responde a los grandes objetivos nacionales establecidos en el Plan Nacional de Desarrollo que articula las políticas nacionales de desarrollo humano y social, educacional y económico, sostenibles y con responsabilidad medioambiental.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- El Programa Nuclear promueve el uso pacífico de la energía nuclear tanto en los ámbitos energéticos para generar nucleoelectricidad y en las aplicaciones de los radioisótopos y radiaciones ionizantes en la medicina, industria y agricultura.
- El Programa Nuclear define el relacionamiento estratégico y de cooperación con organismos internacionales como el OIEA y países amigos.

## **CAPITULO 5**

### **APLICACIONES ENERGÉTICAS DE LA ENERGÍA NUCLEAR Y PERSPECTIVAS EN BOLIVIA**

## 5.1 Introducción

La energía constituye el substrato básico para el funcionamiento de todos los sistemas naturales y humanos. En especial, las posibilidades de subsistencia y de crecimiento de toda civilización humana son totalmente dependientes de la disponibilidad de energía y de su abastecimiento adecuado.

En este sentido, la energía juega un papel central en el quehacer humano afectando el desarrollo económico y social, el medio ambiente y el clima en los niveles local, regional, nacional y global, y es por tanto un factor que incide fuertemente en todos los aspectos de la experiencia humana como educación, salud, economía, pobreza o riqueza, población, asuntos de género, balances de pagos e inclusive en asuntos de paz entre las naciones. En los últimos tiempos ha surgido un nuevo modo de pensar, no sólo en las esferas de decisión de los países sino particularmente en la población en general, que nace de la toma de conciencia sobre la necesidad de concebir un desarrollo humano sostenible. Este pensamiento ha inducido cambios en los conceptos tradicionales que se tenía sobre la naturaleza del problema energético en sentido de forjar su enfoque desde el punto de vista que impone la búsqueda de soluciones integrales, racionales, y medio ambientalmente compatibles con los problemas de recursos, producción, transformación y consumo de energía.

El crecimiento acelerado de la demanda de energía y la consecuente necesidad de satisfacerla han llevado a los países a buscar soluciones de diferente índole de acuerdo a sus requerimientos y posibilidades. Una de esas soluciones es la energía nuclear por las ventajas que ofrece, como se explica en el capítulo sobre Instalaciones Nucleares.

Bolivia puede ser considerada como un país privilegiado puesto que cuenta con la oportunidad de seguir su camino energético por la vía de la sostenibilidad sin la necesidad urgente de recurrir –al menos por unas 2 a 3 décadas– a la energía nuclear para satisfacer sus necesidades energéticas, aunque no descarta esta posibilidad que será tomada en consideración cuando las condiciones se manifiesten oportunas.

El Instituto Boliviano de Tecnología Nuclear (IBTEN), cuyas actividades actuales están dirigidas a la investigación y aplicación de técnicas y metodologías de las ciencias

nucleares, al control y protección radiológicos, concibe por disposición gubernamental en sus estatutos, y como uno de sus posibles objetivos, 'Planificar el desarrollo nucleoelectrico nacional, formular y ejecutar un plan de centrales nucleoelectricas'.

### **5.2 Recursos Electro-Energéticos de Bolivia**

El panorama electro-energético general de Bolivia visto desde la perspectiva de sus potencialidades y recursos primarios pro-eléctricos actuales comparados con la producción y el consumo de electricidad, expone autonomía y posibilidades de autosuficiencia para varias décadas en el futuro con el uso de las fuentes de energías convencionales y renovables. En efecto, el análisis que se presenta a continuación da cuenta de los potenciales energéticos para la producción de electricidad en base a la información actualmente disponible, que corresponde al año 2009.

La generación de electricidad en Bolivia es efectuada principalmente mediante la combustión de gas natural y el aprovechamiento del hidropotencial; y secundariamente por la combustión de biomasa constituida únicamente por bagazo, y de diesel de origen exclusivamente importado. Aunque la documentación oficial no da cuenta de las potencialidades de generación de electricidad solar, por su importancia, el presente estudio incluye esta fuente como un recurso significativo del que dispone el territorio nacional.

A título de información accesoria se menciona que en un estudio realizado en el pasado se encontró que la biomasa forestal producida anualmente y tomada como un posible recurso energético, ascendía a unos  $539.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ , que traducidos a términos energéticos térmicos significaban teóricamente unos 1,030 MMbep/año. Este valor corresponde a cerca de un décimo del potencial solar total y constituye el recurso energético terrestre renovable a más cuantioso del territorio nacional. Sin embargo, por razones medio ambientales, la dendroenergía no puede ser vista como una solución viable para la generación de electricidad.

### **5.3. El Potencial de Gas Natural**

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

Las reservas certificadas de gas natural llagan a 9,94 Tp<sup>3</sup> y la producción anual asciende a unos 456.300 Mp<sup>3</sup>, de los cuales unos 106.600 Mp<sup>3</sup> constituyen la oferta y el consumo total interno. El 9,1% de la producción, y el 39.1% de la oferta o consumo total interno son utilizados para la generación de electricidad [i]. Ver la Tabla I.

Con el nivel de producción indicado, las reservas certificadas (P1) dan al país una autonomía de 22 años; las reservas certificadas (P1) y probables (P2) juntas una autonomía de 30 años; y si se considera las reservas certificadas (P1), probables (P2) y posibles (P3), resulta una autonomía de unos 40 años [ii]. Ver la Tabla I.

**TABLA I: Bolivia 2009 - Reservas y autonomía de gas natural**

<b>Reservas<sup>/1</sup>:</b>	<b>Tp<sup>3</sup> = 10<sup>12</sup>p<sup>3</sup></b>	
Certificadas (P1):	9,94	
Certificadas (P1) + Probables (P2)	13,65	
Certificadas (P1) + Probables (P2) + Posibles (P3)	19,90	

<b>Balance<sup>/2</sup>:</b>	<b>Mp<sup>3</sup>/año</b>	<b>% en gener. EE</b>
Producción	456.299,9	9,1
Exportación + no aprovechado	349.658,9	
Oferta total interna	106.641,0	39,1
Consumo total interno	106.641,0	39,1
Generación de electricidad	41.674,9	
Tratamiento de gas + Consumo propio + Pérdidas de transformación		23.020,8
Consumo energético final por sectores + ajustes	41.945,4	

<b>Autonomía según reservas:</b>	<b>años</b>
Certificadas (P1):	22
Certificadas (P1) + Probables (P2):	30
Certificadas (P1) + Probables (P2) + Posibles (P3)	44

<sup>/1</sup>: Hidrocarburosbolivia.com “YPFB garantiza que reservas de gas natural en Bolivia cubren la demanda interna y externa.” AN-YPFB 08/04/2011.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

<sup>2</sup>: Elaboración propia en base a información del Balance Energético Nacional 2000 – 2009, Ministerio de Hidrocarburos y Energía, La Paz, Bolivia, enero de 2011.

Las reservas certificadas no están actualmente en explotación y corresponden a sólo 84 campos que fueron estudiados hasta el presente de 487 estructuras anticlinales preseleccionadas para la investigación ulterior y perforación exploratoria de un total de 518 encontradas en un área de 91,000 km<sup>2</sup> sometida a la prospección. Esta superficie corresponde al 14,9% de un total de 610,528 km<sup>2</sup> que cubren el área tradicional potencial de interés hidrocarburífero boliviano y abarca un 55,6% del territorio nacional

### 5.4 El Potencial Hidroeléctrico

La evaluación del potencial hidroeléctrico de Bolivia data de hace más de dos décadas, sin embargo, los datos establecidos en esa ocasión han sido confirmados globalmente en 2009 por expertos del Vice Ministerio de Electricidad y Energías Alternativas y de siete empresas generadoras en un taller de análisis y evaluación especializado. En ese taller se llegó a la conclusión de que en Bolivia existe un potencial hidroeléctrico de 40.000 MW (económicamente aprovechable) que es unas 40 veces la potencia instalada actual de generación eléctrica, lo que confirma la información histórica del país. Ver la Tabla II.

**TABLA II: Bolivia 2009 - Potencial hidroenergético total de Bolivia**  
**Potencia MW**

POTENCIAL	TOTAL
<b>Bruto</b>	334, 100
<b>Económicamente aprovechable</b>	39,800
<b>Inventariado</b>	10,700
<b>En explotación (2010)<sup>1</sup></b>	480

**Fuente:** IHH-UMSA, ENDE, MEH-CCE<sup>[iii]</sup>

<sup>1</sup> Autoridad de Fiscalización y Control Social de Fiscalización; El Sector en Cifras; Producción Bruta-Bolivia 2010.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

En otros términos, el potencial hidroenergético actualmente en explotación en Bolivia llega a apenas un 4,5 % del potencial inventariado y a 1,2 % del económicamente aprovechable.

En términos energéticos, tomando como sistema de generación representativo del Sistema Interconectado Nacional (SIN) a una planta tipo con una eficiencia de conversión energética del 70% y un tiempo de funcionamiento anual del 80% (unas 7000h/año), el potencial económicamente aprovechable de generación de energía eléctrica es de unos 195.000 GWh/año, unas 80 veces la energía producida actualmente. Ver la Tabla III.

**TABLA III: Bolivia 2009 - Potencial hidroenergético de Bolivia**  
**Energía GWh/año**

POTENCIAL	TOTAL
<b>Bruto</b>	1.638.961
<b>Económicamente aprovechable</b>	195.243
<b>Inventariado</b>	52.490
<b>En explotación (2010) <sup>1</sup></b>	2.355

**Fuente:** IHH-UMSA, MEH-CCE [op.cit.8]

<sup>1</sup> Autoridad de Fiscalización y Control Social de Fiscalización; El Sector en Cifras; Producción Bruta-Bolivia 2010.

### La Generación de Energía Eléctrica

La energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) es producida principalmente con gas natural en un 71,6%, con hidroenergía en un 21,2% y mediante la combustión de bagazo en un 4,9%. El uso del diesel es exclusivo de los sistemas aislados y participa en el total de la generación con un 2,3%<sup>[IV]</sup>. Ver la Tabla IV.

El dato de hidroenergía primaria aprovechada para la generación de electricidad consignado en el Balance Energético Nacional 2000-2009 ha sido corregido en función

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

del potencial hidroeléctrico en explotación y para un aprovechamiento de 7000 horas por año.

En el nivel del uso de energía primaria para producir electricidad, la generación térmica ocupa el 78,8%, y la generación hidrogravitacional el 21,2%. Ver la Tabla IV. En el nivel de la generación bruta de electricidad, el 58,5% proviene de la producción térmica y 41,5% del hidropotencial<sup>[1]</sup>. Ver la Tabla V.

La eficiencia de generación bruta de energía termo-eléctrica vs. El consumo de energía termo-generatriz primaria es de 26,3 %, y la eficiencia de generación bruta de energía hidroeléctrica vs. El consumo de energía hidrogeneratriz primaria 69,4 %.

**TABLA IV: Bolivia 2009–Consumo primario en generación de energía eléctrica Sistema Interconectado Nacional (SIN)**

---

	<b>kbec/año</b>	<b>%</b>		<b>kbec/año</b>	<b>%</b>
Gas natural	7.058,64	71,6			
Biomasa (bagazo)		483,66		4,9	
Diesel	230,49	2,3	TERMO	7.772,79	78,8
Hidroenergía/ <sup>1</sup>	2.085,10	21,2	HIDRO	2.085,10	21,2
	<b>10.379,17</b>	<b>100,0</b>	<b>TOTAL</b>	<b>10.379,17</b>	<b>100,0</b>

---

Fuente: Balance Energético Nacional 2000 – 2009, Ministerio de Hidrocarburos y Energía, La Paz, Bolivia, enero de 2011.

<sup>1</sup>: Dato de hidroenergía primaria del BEN 2000–2009 corregido en función del potencial hidroenergético en explotación y 7000 horas de funcionamiento o disponibilidad al año.

**TABLA V: Bolivia 2009–Generación bruta de energía eléctrica  
Sistema Interconectado Nacional (SIN)**

GWh/año	HIDRO		TERMO	HIDRO + TERMO	
	GWh/año	kbep/año	GWh/año	GWh/año	kbep/año
Empresas generadoras	2.336,2	1.447,51	3.298,3	2.043,63	5.634,50
	3.491,14				
	%	41,5	58,5	100,0	

Fuente: Autoridad de Fiscalización y Control Social de Fiscalización; El Sector en Cifras; Producción Bruta – Bolivia 2009.

### 5.5 El Potencial Solar

Dos terceras partes del territorio de Bolivia, cuya posición latitudinal está entre los paralelos 9° 40' S y 22° 53' S, se encuentran en la franja geográfica sur de mayor radiación solar del planeta, que se extiende entre los paralelos 15° S y 35° S. Esta situación y sus condiciones climatológicas, así como altitudinales, hacen que cuente con uno de los niveles de mayor intensidad solar sobre la Tierra. Ver las Tablas VI y VII. El territorio boliviano capta en promedio 6,48· 10<sup>6</sup> GWh/día ó 2,37·10<sup>9</sup>GWh/año de energía solar que son equivalentes a 4,02·10<sup>6</sup>kbep/día; 1.47· 10<sup>9</sup>kbep/año ó a 1.47 MMbep/año.

**TABLA VI: Bolivia 1995 - Radiación solar global incidente sobre una superficie horizontal por regiones**

A: MJ/m<sup>2</sup>.día B: kWh/m<sup>2</sup>.día

ZONA	Altiplano		Valles		Llanos		PROMEDIO	
	A	B	A	B	A	B	A	B
Promedio	21,4	5,9	19,1	5,3	17,8	4,9	19,4	5,4

Fuente: IIF-UMSA, IDE-ANCB<sup>[vi]</sup>, MEH-CC<sup>[op.cit.8]</sup>

**TABLA VII: Bolivia 1995 - Heliofanía mensual y total por Regiones**

Horas de sol por día

ZONA	Altiplano	Valles	Llanos	PROMEDIO
Promedio	8,2	7,0	5,8	7,0

Fuente: IIF-UMSA, IDE-ANCB[[op.cit.11](#)], MEH-CCE[[op.cit.8](#)]

## 5.6 El Potencial Eólico

Bolivia cuenta desde junio de 2009 con un Atlas Eólico<sup>[vii]</sup> que da cuenta de este recurso a tres alturas sobre el nivel del suelo (20, 50 y 80m) en el territorio nacional en base a resultados obtenidos de simulaciones meteorológicas sofisticadas elaboradas por el 3TIER Environmental Forecast Group Inc., dentro de la cooperación financiera internacional.

Por otra parte, la empresa Transportadora de Electricidad S.A. elaboró el primer Mapa Eólico de Bolivia<sup>[viii]</sup> con información obtenida de 201 estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) durante diez años y lo presentó en diciembre de 2009.

Los resultados, tanto presentados en el Atlas como en el Mapa Eólico de Bolivia sirven de base para la evaluación preliminar de sitios identificados para la generación de electricidad mediante el recurso eólico.

Debido a que el recurso eólico tiene una distribución geográfica puntual y su aprovechamiento en la generación de electricidad depende de muchas variables físicas propias del sitio, como la velocidad del viento, la densidad del aire, la orografía local y zonal, así como de variables tecnológicas como el diámetro, forma y eficiencia del rotor, eficiencia del sistema eléctrico en su conjunto y la cantidad de unidades integradas en una granja, no existe una fórmula única que permita estimar su aporte a la sub-matriz eléctrica nacional. Sin embargo, se puede afirmar que el desarrollo de la energía eólica en general puede contribuir en gran medida a resolver problemas de abastecimiento de

electricidad en puntos alejados del SIN y en especial a mitigar la incorporación de gases de combustión a la atmósfera.

### **5.7 El Potencial Geotérmico**

Bolivia tiene un potencial geotérmico factible de desarrollo técnico que permitiría instalar una capacidad de generación eléctrica estimada entre 280 y 370 MW. Un pozo exploratorio perforado en los años setenta en la zona de Laguna Colorada en el campo Sol de Mañana ubicado en la región sur occidental del país indicó la existencia de condiciones de alta entalpía (150° C) a 127 metros de profundidad.

En el presente este potencial está mantenido como reserva en tanto se den la necesidad y las condiciones técnico-económicas para explotarlo.

Por el momento se sabe que la Empresa Nacional de Electricidad (ENDE ), ha anunciado que el proyecto de geotermia Sol de Mañana, en Laguna Colorada, prevé generar 120 MW y que se espera su conclusión y puesta en marcha para mediados de 2012. Se calcula que una vez puesto en marcha, el proyecto tendrá una vida útil de 30 años y que deberán hacerse 18 perforaciones más para alcanzar los 120 MW de potencial esperado, según el diseño final del proyecto, elaborado por ENDE con el gobierno de Japón.

Con la energía eléctrica generada se atenderá la demanda local, en particular del sector minero, entre cuyos puntos de referencia está la mina San Cristóbal, la más importante del país.

### **5.8 Breve Descripción del Sistema Energético boliviano**

El Balance Energético Nacional proporciona información cuantitativa sobre la producción, transformación y uso de los recursos energéticos de diferente naturaleza que participan en el Sistema Energético Nacional y brinda la oportunidad de apreciar su estado, actividad y perspectivas. Este documento presenta la siguiente información resumida en la Tabla VIII.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

**TABLA VIII.: Bolivia 2009: Producción de energía primaria**

<b>FUENTE</b>	<b>[kbep]</b>	<b>[%]</b>
Gas natural	77.285,39	77,1
Petróleo crudo/condensado y/o gasolina natural	14.717,94	14,7
Hydroenergía/ <sup>1</sup>	2.085,10	2,1
Biomasa/bagazo, leña, etc.	6.162,96	6,1
<b>TOTAL</b>	<b>100.251,39</b>	<b>100.0</b>

Fuente: Balance Energético Nacional 2000 – 2009, Ministerio de Hidrocarburos y Energía, La Paz, Bolivia, enero de 2011.

<sup>1</sup>: Dato de hidroenergía primaria del BEN corregido en función del potencial hidroenergético en explotación y 7000 horas de funcionamiento o disponibilidad al año.

La mayor incidencia de producción energética recae sobre el gas natural con más de tres cuartos de la producción, siguiéndole el petróleo crudo/condensado y/o gasolina natural con algo más de un séptimo. La bioenergía (bagazo) cubre seis centésimas de la producción, quedando la hidroenergía en algo sobre las dos centésimas del total.

Se puede apreciar además que los hidrocarburos como tales ocupan el primer lugar en la producción primaria con un 91,8%, la biomasa el segundo lugar con un 6,1% y la hidroenergía con apenas el 2,1%.

Desde el punto de vista del consumo, la situación es como sintetiza la Tabla IX.

**TABLA IX: Bolivia 2009: Consumo final de energía**

<b>FUENTE</b>	<b>[kbep/año]</b>	<b>[%]</b>
<b>Gas natural</b>	6.574,94	20,5
<b>Derivados líquidos/<sup>1</sup></b>	13.625,64	42,6
<b>GLP</b>	2.831,78	8,8

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

<b>Electricidad</b>	3.542,56	11,1
<b>Biomasa/bagazo, leña, etc.</b>	5.435,30	17,0
<b>TOTAL</b>	32.010,22	100,0

Fuente: Balance Energético Nacional 2000 – 2009, Ministerio de Hidrocarburos y Energía, La Paz, Bolivia, enero de 2011.

/<sup>1</sup>: Incluye el Diesel que es de origen importado.

Este cuadro evidencia que el mayor consumo recae sobre los derivados líquidos del petróleo y que en segundo lugar está el gas natural con la mitad del primero, resultando un consumo final total de hidrocarburos del 72,0 %. En tercer lugar está la biomasa con un 17,0 %, que considera el bagazo en la producción de electricidad y el consumo general de leña. El consumo de electricidad es de 11 % y es un poco mayor que el de GLP.

La electricidad está generada por una potencia instalada total (2010) de unos 1389.6MW, de los cuales el 34,6% (480,2 MW) es hidroeléctrica y el 65,4% (909,4 MW) termoeléctrica, donde esta última es producida casi en su totalidad con gas natural.

La distribución del consumo de energía por sectores de actividad socioeconómica presenta las características consignadas en la Tabla X.

**TABLA X: Bolivia 2009: Consumo de energía por sectores**

<b>SECTOR</b>	[kbep/año]	[%]
<b>Transporte</b>	13.189,99	41,2
<b>Industrial</b>	9.081,04	28,4
<b>Residencial</b>	6.036,87	18,9
<b>Comercial</b>	897,11	2,8
<b>Agropecuario, pesca y minería</b>	2.805,21	8,8
<b>TOTAL</b>	32,010.22	100,0

**Fuente:** Balance Energético Nacional 2000 – 2009, Ministerio de Hidrocarburos y Energía, La Paz, Bolivia, enero de 2011.

El sector que más pesa en el consumo nacional de energía es el de transporte, cuya fuente motriz se basa casi completamente en el uso de hidrocarburos líquidos. En segundo lugar está el industrial con un consumo distribuido entre diferentes fuentes primarias y secundarias. El sector residencial consume principalmente GLP, luego biomasa y en último lugar electricidad. La agropecuaria, pesca y minería están en cuarto lugar con un consumo menor a un décimo. La incidencia del sector comercial es la más pequeña en el balance nacional.

Por otra parte, la referencia de los consumos de energía nacionales a la población demuestra que Bolivia es un país con índices de consumo por habitante muy bajos comparados con los de los países industrializados. En efecto, en el año 2009, el consumo de final energía per cápita nacional fue de 3,14bep/hab-año que equivalen a 5.068 kWh/hab-año; y el consumo de electricidad fue de 0,12 bep/hab-año que equivalen a unos 194 kWh/hab-año<sup>[ix]</sup>.

### **5.9 Comentarios- Perspectivas Nucleares y Nucleoeléctricas en Bolivia**

Como se puede observar, Bolivia cuenta con relativamente importantes recursos energéticos no renovables en forma de gas natural y renovables en sus diferentes manifestaciones como hidropotencial y solar. Sin embargo, no obstante estas condiciones favorables, y en particular su calidad de productor y exportador de energía, el país se encuentra rezagado en cuanto a la producción y el consumo.

La Constitución Política del Estado determina que los recursos naturales son estratégicos y de interés público para el desarrollo del país y de prosperidad del pueblo boliviano. Bajo este principio, el Estado Plurinacional asume el control y la dirección sobre la exploración, explotación, industrialización, transporte y comercialización de los recursos naturales estratégicos, así como la responsabilidad de promover y garantizar su aprovechamiento integral, sustentable y equitativo, y de su industrialización con el mayor valor agregado en el marco de la soberanía energética del país.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

El Estado Boliviano, dentro de este marco define la dirección y el control de la propiedad de los recursos naturales por parte suya y reconoce la necesidad de contar con instrumentos para implementar políticas, planes y proyectos de desarrollo que aseguren el uso sustentable de los recursos naturales y la generación de excedentes para impulsar el desarrollo económico y social del país. Asimismo advierte la obligación de además, garantizar la seguridad energética en el mercado interno, hacer más competitiva la industria nacional y cumplir con los compromisos de exportación de gas natural.

Aunque el Plan de Desarrollo Energético Nacional (julio de 2009) no consigna en sus escenarios el desarrollo de la energía nuclear, Bolivia no puede seguir ignorando los múltiples beneficios que las técnicas nucleares producen en una gran cantidad de actividades del hombre, donde la generación de electricidad es nada más que una de ellas.

La planificación de la Opción Nuclear nucleoelectrónica debe ser una acción conjunta entre el VEEA y el VCyT, en el que el IBTEN juega un rol de primera línea.

En la propuesta de programas y proyectos descripta en la Part B “Programa Nuclear Boliviano” de este tercer producto, se propone acciones concretas para la formación de recursos humanos siguiendo el Plan Nacional de Formación de Recursos Humanos en sus niveles avanzados III y IV.

### **6.0. Conclusiones**

- En el contexto energético de Bolivia, se puede afirmar que las aplicaciones nucleares para la generación de electricidad tienen una perspectiva de mediano a largo plazo, fundamentalmente, por la amplia oferta de fuentes renovables y no renovables, tradicionales y no tradicionales de energía de las que dispone el país.
- Es oportuno que se vayan dando los primeros pasos para la conformación de grupos de trabajo que discutan la opción nuclear de generación de nucleoelectricidad dentro del contexto nacional y que en su momento, contribuya a la seguridad energética.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- La oportuna formación de recursos humanos especializados en los Niveles III y IV será fundamental para la elaboración de programas y proyectos para la generación de nucleoelectricidad.
- La existencia en el país de instalaciones nucleares, en particular de un reactor de investigación, contribuirá de manera fundamental a la formación de recursos humanos que participen en proyectos relacionados con las técnicas nucleares y con la generación de núcleo-electricidad en el futuro.

### Bibliografía Capitulo C

- [1]: *Estatutos del Instituto Boliviano de Tecnología Nuclear (IBTEN)*, Artículo 9.
- [2]: Ayuda Memoria para el Ministerio de Desarrollo Sostenible preparada por la Academia Nacional de Ciencias de Bolivia (ANCB), La Paz, Bolivia, 21 de febrero de 1994.
- [3]: A. Trepp del Carpio, *Perspectivas de la Nucleoelectricidad en Bolivia*, presentado en la reunión internacional 'Competitividad de la Energía Nucleoeléctrica en las Próximas Décadas', Buenos Aires, Argentina, 18 al 21 de noviembre de 1996.
- [4]: [www.hidrocarburosbolivia.gob.bo](http://www.hidrocarburosbolivia.gob.bo)AN-YPFB 08/04/2011.
- [5]: Elaboración propia en base a información del *Balance Energético Nacional 2000 – 2009*, Ministerio de Hidrocarburos y Energía, La Paz, Bolivia, enero de 2011.
- [6]: I. Montes de Oca, *Enciclopedia Geográfica de Bolivia*, Cap. XX Yacimientos de Hidrocarburos, [www.bolivia.com/geografiadebolivia](http://www.bolivia.com/geografiadebolivia) La Paz, Bolivia, 2005.
- [7]: *Taller de Análisis y Evaluación del Potencial Hidroeléctrico de Bolivia*, Sociedad de Ingenieros de Bolivia, filial Cochabamba, Bolivia, 9 de octubre de 2009, <http://hidrocarburosbolivia.gob.bo/>
- [8]: *Proyecto Desarrollo Energético Rural con Recursos Localmente Disponibles de Energía y Énfasis en el Uso Productivo de la Energía*, CEE-MEHADE/933/84/16, La Paz, Bolivia, 1991.
- [9]: *Balance Energético Nacional 2000 – 2009, Balance Consolidado 2009*, Ministerio de Hidrocarburos y Energía, La Paz, Bolivia, enero de 2011, pág. 90.
- [10]: [www.ae.gob.bo/](http://www.ae.gob.bo/)Autoridad de Fiscalización y Control Social de Fiscalización; El Sector en Cifras; Producción Bruta-2009, Bolivia.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

- [<sup>11</sup>]: Datos inéditos del Instituto de Energía (IDE) de la Academia Nacional de Ciencias de Bolivia (ANCB) elaborados en base a datos del Instituto de Investigaciones Físicas (IIF) de la UMSA, La Paz, noviembre 1996.
- [<sup>12</sup>]: [www.tde.com.bo/eolico/5](http://www.tde.com.bo/eolico/5) Informe Atlas Eolico de Bolivia.pdf Transportadora de Electricidad S.A. (TDESA), junio 2009.
- [<sup>13</sup>]: [www.tde.com.bo/mapaeolico.asp](http://www.tde.com.bo/mapaeolico.asp) Transportadora de Electricidad S.A. (TDESA), abril 2008.
- [<sup>14</sup>]: R. Carrasco, *Manifestaciones geotérmicas en Bolivia*, Boletín GEOBOL, Serie A Vol I, No. 1; La Paz, Bolivia, 1978.
- [<sup>15</sup>]: [www.eerrbolivia.blogspot.com/2010/12/de-la-geotermia-boliviana-editorial.html](http://www.eerrbolivia.blogspot.com/2010/12/de-la-geotermia-boliviana-editorial.html) Las Energías Renovables y Desarrollo Sostenible en Bolivia, diciembre 2010.
- [<sup>16</sup>]: *Balance Energético Nacional 2000 – 2009, Balance Consolidado 2009*, Ministerio de Hidrocarburos y Energía, La Paz, Bolivia, enero de 2011, pág. 90.
- [<sup>17</sup>]: *Balance Energético Nacional 2000 – 2009, Indicadores 2009*, Ministerio de Hidrocarburos y Energía, La Paz, Bolivia, enero de 2011, pág. 71.

**CAPITULO 7**  
**PROPUESTAS DE MECANISMOS DE IMPLEMENTACIÓN**

## 7.1 Introducción

Los Programas y Proyectos del Plan de Ciencia y Tecnología Nuclear contemplan periodos de corto, mediano y largo plazo. Los mecanismos de implementación de las conclusiones de este estudio de consultoría que se incluyen en la Tabla siguiente, se refieren fundamentalmente a las actividades que se pueden ejecutar en el corto plazo, es decir, en un periodo de 1 a 5 años. También se identifican los resultados esperados y los principales responsables de la actividad los que pueden ser también promotores e iniciadores de las mismas.

En la primera columna de la tabla se incluyen al principio componentes de alto nivel, como el PNB, y luego se van presentando componentes de menor rango que involucran, naturalmente, los resultados y propuestas específicas de la consultoría, como son la definición de la estructura institucional del PNB, los programas del Plan de Ciencia y Tecnología Nuclear, las instalaciones nucleares, el plan de formación de RRHH, las aplicaciones energéticas, el ciclo del combustible e institutos nucleares.

Después de la tabla se presentan las etapas secuenciales para la realización del proyecto del ciclotrón que se sugiere como la primera instalación nuclear en Bolivia.

NOTA: En la tabla se nombra al INAMEN como ejemplo de uno de los centros de medicina nuclear que funcionan en el país, y de ninguna manera se sugiere que sea ésta la institución que lidere la formulación del proyecto ciclotrón. Lo que sugiere la consultoría es que sea una instalación con alcance nacional y que provea de los radioisótopos y radiofármacos de ciclotrón a los centros públicos de medicina nuclear del país, independientemente dónde esté finalmente instalado.

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

## 1. Tabla de Mecanismos de Implementación del Programa Nuclear Boliviano

	COMPONENTES DE LA PROPUESTA	ACTIVIDADES	PLAZOS	MECANISMO	RESULTADOS	PROMOTOR Y RESPONSABLE PRINCIPAL
1	Programa Nuclear Boliviano (PNB) / Plan de Ciencia y Tecnología Nuclear (PCyTN)	Realización de consultas a las instituciones involucradas en el PNB Definir el alcance y las prioridades del PNB Elaboración de propuesta de estructura de gestión y administración del PNB Redacción de la Ley de Creación del PNB, reglamentos	2 años	Organización de una Comisión especializada inter institucional	Ley y Reglamentos Aprobados PNB y PCyTN en operación con estructuras de operación y presupuesto asignado	VCyT-IBTEN
2	Definición de la Estructura Institucional del PNB	CREACIÓN DE LA AGENCIA DE ENERGÍA NUCLEAR Estudio de diseño de la AEN CREACIÓN DE LA AUTORIDAD REGULATORIA NACIONAL Estudio de diseño de la ARN	5 años	Organización de una Comisión especializada	AEN Creada y en funcionamiento ARN creada y en funcionamiento	IBTEN y La máxima autoridad del Programa Nuclear Boliviano, definida por ley
3	Programas del Plan de Ciencia y Tecnología Nuclear	Análisis y aprobación de la propuesta de Instalaciones Nucleares	1 año	Organización de Grupos de Trabajo multidisciplinarios	Características de las Instalaciones definidas	VCyT-IBTEN e INAMEN
		Análisis y aprobación del Plan de Formación de RRHH	1 año		Plan aprobado y en marcha	VCyT-IBTEN
		Análisis y aceptación del enfoque sobre la Opción nuclear nucleoelectrónica Definición de acciones estratégicas	1 año		Enfoque analizado y aprobado Acciones estratégicas definidas	VCyT-IBTEN, VEEA
4	Instalaciones Nucleares	Instalación de un Ciclotrón Etapa I. Elaboración Documento Marco(DM) Etapa II. Estudio de Prefactibilidad (EPF) Etapa III. Estudio de Factibilidad (EF) Etapa IV. Licitación internacional, construcción y puesta en marcha Etapa V. Producción experimental de pruebas de aceptación de F-18FDG Etapa VI. Producción rutinaria de servicio Nota: Ver a continuación punto de Etapas Secuenciales para la implementación del Ciclotrón	3 años	Grupo de Trabajo Inter Institucional y Multidisciplinario y contratación de consultorías especializadas	Primera Instalación Nuclear del PNB en operación	IBTEN-INAMEN
		REACTOR NUCLEAR Estudios de prefactibilidad y factibilidad Búsqueda de fuentes de financiamiento Establecimiento de alianzas estratégicas entre el sector público, privado y académico	5 años	Grupo de Trabajo Inter Institucional y Multidisciplinario y contratación de consultorías especializadas	Estudios completos para toma de decisiones Fuentes de financiamiento identificadas y definidas Acuerdos de cooperación y financiamiento suscritos	VCyT-IBTEN
		PLANTA DE IRRADIACIÓN Estudios de prefactibilidad y factibilidad Búsqueda de fuentes de financiamiento Establecimiento de alianzas estratégicas entre el sector público, privado y académico	5 años	Grupo de Trabajo Inter Institucional y Multidisciplinario y contratación de consultorías especializadas	Estudios completos para toma de decisiones Fuentes de financiamiento identificadas y definidas Acuerdos de cooperación y financiamiento suscritos	VCyT-IBTEN

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

(Cont.)

	COMPONENTES DE LA PROPUESTA	ACTIVIDADES	PLAZOS	MECANISMO	RESULTADOS	PROMOTOR Y RESPONSABLE PRINCIPAL
5	Plan de Formación de Recursos Humanos	Implementación del Plan en los Niveles I y II Implementación del Plan en el Nivele III para formar RRHH para el ciclotrón	5 años	Convenios interinstitucionales entre los actores de la educación pre universitaria Firma de convenios con universidades nacionales, gobiernos y la cooperación internacional, OIEA	Niveles I y II implementados en escuelas y colegios Nivel III implementado en universidades y en el exterior recursos humanos para la operación, mantenimiento y utilización del ciclotrón capacitados (3 años)	Ministerio de Educación y Deportes, VCyT-IBTEN, Universidades  INAMEN
6	Aplicaciones Energeticas	OPCIÓN NUCLEAR NUCLEOELÉCTRICA Estudios de identificación de necesidades Definición de programas específicos de formación de RRHH Elaboración de Documentos Marco	5 años	Grupo de Trabajo multidisciplinario Contratación de consultorías Cooperación especializada de la OIEA	Documentos de estudios realidados Posición oficial respecto a la opción nuclear definida Programas específicos de formación de RRHH para la opción nuclear definidos Documentos Marco elaborados	VCyT- IBTEN-VEAA
7	Ciclo del Combustible	PROSPECCIÓN DE MINERALES RADIOACTIVOS Incorporación de actividades específicas en los planes nacionales de prospección minera Elaboración de proyectos de prospección	5 años	Aplicación de las metodologías de prospección desarrolladas en el SERGEOTECMIN	Actividades específicas incorporadas en planes nacionales Proyectos de prospección elaborados	SERGEOTECMIN
8	Institutos nucleares	REFORZAMIENTO DEL CIAN Estudio fortalecimiento del CIAN CREACIÓN DE NUEVOS INSTITUTOS Estudio sobre necesidades, opciones y pertinencia para la creación de nuevos institutos especializados, complementarios al CIAN	5 años	Grupos de Trabajo especializados, Consultorías	CIAN fortalecido Nuevos Institutos definidos y en etapa de creación	VCyT-IBTEN, Universidades

## **Etapas Secuenciales para la Implementación del Proyecto Ciclotrón**

**Etapa I:** Elaboración de un Documento Estratégico Marco (DEM). Es un documento político-estratégico que estudia, examina y evalúa la necesidad, conveniencia y posibilidad de establecer un ciclotrón para la producción de radioisótopos de vida media corta emisores de positrones. En base a este documento, las autoridades tomarán la decisión de propiciar un estudio de Pre-Factibilidad. Se debe organizar un grupo especializado, multidisciplinario de trabajo con la activa participación de los médicos nucleares.

Periodo: 3meses

### **Etapa II.** Estudio de Pre-Factibilidad (EPF)

Define los lineamientos a seguir, tanto políticos y estratégicos, define necesidades, actores y beneficiarios, además define la tecnología (s) relevantes, posibles emplazamientos y el programa de utilización, el programa de capacitación de recursos humanos y muy importante, los impactos de esta tecnología en la salud de la población boliviana.

En esta etapa también se definen claramente los alcances del Estudio de Factibilidad y se preparan los respectivos TdRs y se entra en contacto informal con los fabricantes de ciclotrones para recabar información técnica y específica de sus ciclotrones. Se propone esquemas de fuentes de financiamiento nacionales y de la cooperación internacional.

Periodo: 6 meses

### **Etapa III.** Estudio de Factibilidad (EF)

Luego del estudio de factibilidad, los tomados de decisiones a nivel político toman la decisión final de financiar la instalación del ciclotrón.

Periodo: 6 meses

**Etapa IV.** Licitación Internacional para la provisión del Ciclotrón y sus componentes de equipos, construcción de las instalaciones civiles, instalación y montaje y puesta en marcha con las respectivas pruebas de aceptación.

## Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

---

En esta etapa se define y se comienza a implementar el programa de capacitación en los Niveles III y IV recurriendo a la cooperación internacional.

Periodo: 1,5 años

*Nota:* En esta etapa el centro de medicina público donde se vaya a instalar el ciclotrón, prepara su proyecto para la instalación de una cámara PET/CT.

**Etapa V.** Producción experimental de F-18 y de la F-18 FDG con sus respectivos controles de calidad, y se da comienzo a los estudios clínicos de prueba.

Periodo: 3 meses

**Etapa VI.** Producción rutinaria y prestación de servicios de medicina nuclear mediante la técnica PET. En el primer año se debe realizar 1000 estudios de PET en pacientes.

Si existieran otros centros de medicina nuclear con infraestructura PET, se debe considerar mecanismos y logística para que también se beneficien de la disponibilidad de radioisótopos de vida corta.

# ANEXOS

# Programa Nuclear de Ciencia y Tecnología

## ANEXO 1. LISTA DE MIEMBROS DE LA RED NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA NUCLEAR

<b>Nro.</b>	<b>NOMBRE COMPLETO</b>	<b>INSTITUCION</b>
1	Dr. Silverio Chávez Ríos	Universidad Mayor de San Andrés, UMSA
2	Ing. José Luis Salinas	Consultor Geógrafo
3	Lic. Samuel Fernández	Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología, IBTEN
4	Lic. Raúl Mamani	Universidad Autónoma Tomás Frías
5	Dra. Vivian Pereyra M.	Centro de Imagen Molecular
6	Ing. Luis Romero Bolaños	Director Ejecutivo IBTEN
7	Lic. Marco Taquichiri	Universidad Autónoma Juan Misael Saracho
8	Dr. Rolando Ticona	Universidad Mayor de San Andrés, UMSA
9	Lic. Isaac Luna	Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología, IBTEN
10	Lic. Fernando Barrientos	Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología, IBTEN
11	Dra. Karina Miranda	Instituto Nacional de Medicina Nuclear
12	Dr. Hernán Vera	Academia Nacional de Ciencias
13	Lic. Samuel Fernández	Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología, IBTEN
14	Lic. Isaac Poma	Universidad Mayor de San Andrés, UMSA
15	Dr. Alfredo Zambrana	Especialista Nuclear
16	Lic. Edgar Saire	Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología, IBTEN
17	Lic. José Honigsblum	Instituto Boliviano de Ciencia y Tecnología, IBTEN
18	Marco Barrero	Escuela Militar de Ingeniería
19	Ing. Jaime Paredes	AV. CONSULT
20	Lic. Francisco Sánchez	Consultor Unipersonal, Docente Investigador.



---