



Instituto Tecnológico de Costa Rica

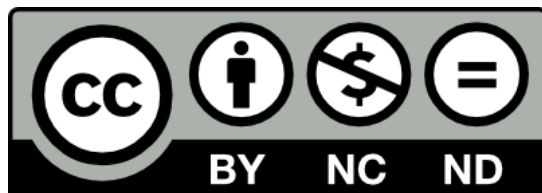
Escuela de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental

“Propuesta de un plan de mejora para minimizar la exposición a radiaciones ionizantes durante la operación del reactor FUSOR-CR en el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones del ITCR.”

Proyecto final de graduación para optar por el título de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental con el grado académico de Licenciatura

Byron Vega Chavarría

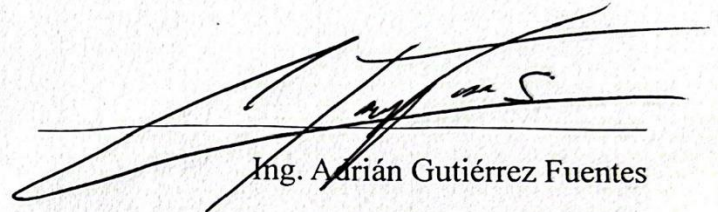
Cartago, julio de 2025



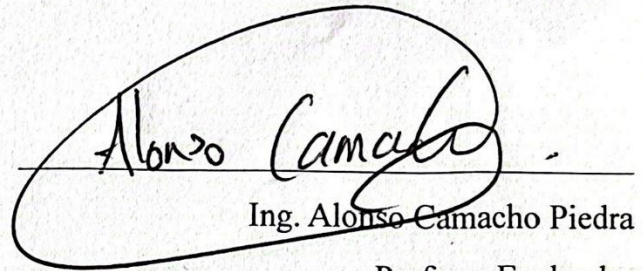
Propuesta de un plan de mejora para minimizar la exposición a radiaciones ionizantes durante la operación del reactor FUSOR-CR en el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones del ITCR © 2025 by Byron Vega Chavarría is licensed under [CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Informe presentado a la Escuela de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental con el grado de Licenciatura.

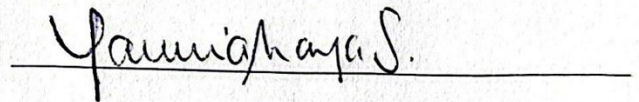
Miembros del Tribunal



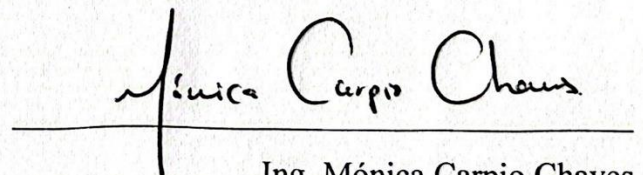
Ing. Adrián Gutiérrez Fuentes
Asesor Académico



Ing. Alonso Camacho Piedra
Profesor Evaluador



Ing. Tannia Araya Solano
Profesora Evaluadora



Ing. Mónica Carpio Chaves
Coordinación de Trabajo Final de Graduación
En representación de la Dirección EISLHA

27 de junio, 2025

Agradecimientos

En primer lugar, a mi pareja, por su amor incondicional, por estar siempre a mi lado, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por brindarme un apoyo constante en cada paso que doy. Tu presencia ha sido una fuente inagotable de fortaleza y motivación.

A mi madre, por facilitar el entorno que me ha permitido llegar hasta donde estoy, y por acompañarme a lo largo de este camino.

A mi asesor académico, por su guía, compromiso y por ayudarme a darle la dirección correcta a este proyecto.

Al coordinador del laboratorio, por brindarme la oportunidad de formar parte de este proyecto. Su apoyo hizo posible esta experiencia de aprendizaje y crecimiento profesional.

Y a los asistentes del laboratorio, quienes además de ser colegas son grandes amigos, por todos los momentos compartidos, la colaboración constante y el compañerismo que siempre estuvo presente.

Y agradezco profundamente a todas las personas que han sido parte de este proceso y que, de una u otra forma, han contribuido a la realización de este trabajo.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Daniela Velásquez, mi compañera de vida, por caminar a mi lado con amor, paciencia y fe. Por creer en mí cuando yo dudaba, por sostener mis pasos cuando flaqueaban los míos. Gracias por convertir mis metas en realidad con tu sola presencia. Este logro también es tuyo, porque sin ti, el camino habría sido muy distinto.

También deseo extender esta dedicación a mi madre Angélica Chavarría, cuyo ejemplo de resiliencia y entrega ha marcado profundamente mi vida. Tu apoyo ha sido indudablemente una base esencial en mi camino.

Resumen

Este trabajo se desarrolló en el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), lugar que se encarga de utilizar la tecnología de plasmas para proponer soluciones innovadoras a problemas complejos para universidades, centros de investigación, empresas tecnológicas y entidades gubernamentales. En la actualidad el laboratorio cuenta con aproximadamente cuarenta miembros, entre los cuales se destacan investigadores y estudiantes dedicados a diversos proyectos.

El presente estudio se enfocó en un nuevo proyecto innovador del laboratorio, denominado FUSOR-CR, el cual busca construir un fusor de Farnsworth en el mediano o largo plazo, que pueda ser utilizado como fuente de neutrones para aplicaciones científicas. Para llevar a cabo esta investigación, se realizó una identificación y evaluación de las condiciones de exposición a radiaciones ionizantes enfocada en los colaboradores involucrados en el proyecto FUSOR-CR. Como parte de este análisis, se realizó una simulación computacional en la que se determinó que la exposición ocupacional en las condiciones actuales sería de 12,33 mSv/año a una distancia de tres metros de la fuente, lo que representa un riesgo moderado y evidencia la necesidad de mejorar el sistema actual de protección radiológica.

Además, se propusieron alternativas de controles ingenieriles y administrativos que promuevan mejoras en los aspectos relacionados con la seguridad radiológica, con el propósito de minimizar la exposición ocupacional a las radiaciones ionizantes y garantizar el cumplimiento normativo. Entre estas medidas, destaca la propuesta de blindaje realizada, la cual logra reducir la exposición ocupacional a 1,23 mSv/año a una distancia de tres metros de la fuente, lo que representa un nivel de riesgo bajo y aceptable.

Palabras clave: fusión, neutrones, radiaciones ionizantes, seguridad radiológica.

Abstract

This work was developed in the Plasma Laboratory for Fusion Energy and Applications at the Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), a place dedicated to the use of plasma technology to propose innovative solutions to complex problems for universities, research centers, technology companies, and government entities. Currently, the laboratory has about forty members, including researchers and students involved in various projects.

This study focused on a new innovative project at the laboratory, called FUSOR-CR, which aims to build a Farnsworth fusor in the medium or long term to be used as a neutron source for scientific applications. To carry out this research, an identification and evaluation of exposure conditions to ionizing radiation was conducted, focusing on the collaborators involved in the FUSOR-CR project. As part of this analysis, a computational simulation was performed in which it was determined that the occupational exposure under current conditions would be 12.33 mSv/year at a distance of three meters from the source, which represents a moderate risk and highlights the need to improve the current radiological protection system.

Furthermore, alternatives for engineering and administrative controls were proposed to promote improvements in aspects related to radiological safety, with the aim of minimizing occupational exposure to ionizing radiation and ensuring regulatory compliance. Among these measures, the proposed shielding design stands out, which reduces occupational exposure to 1.23 mSv/year at a distance of three meters from the source, representing a low and acceptable risk level.

Keywords: fusion, neutrons, ionizing radiation, radiological safety.

Índice General

1. Introducción	1
1.1. Identificación de la empresa	1
1.1.1. Visión y misión de la empresa	1
1.1.2. Antecedentes históricos.....	2
1.1.3. Ubicación geográfica.....	3
1.1.4. Organigrama de la organización.....	3
1.1.5. Número de empleados	3
1.1.6. Tipos de productos o servicios.....	4
1.1.7. Mercado.....	4
1.1.8. Proceso productivo.....	4
1.2. Planteamiento del problema	5
1.3. Justificación del proyecto.....	6
1.4. Objetivos del proyecto de graduación	8
1.4.1. Objetivo general	8
1.4.2. Objetivos específicos.....	8
1.5. Alcances del proyecto	9
1.6. Limitaciones del proyecto	9
2. Marco teórico	10
3. Metodología.....	14
3.1. Tipo de investigación	14
3.2. Fuentes de información.....	14
3.2.1. Fuentes primarias.....	14
3.2.2. Fuentes secundarias	15
3.2.3. Fuentes terciarias.....	16
3.3. Población y muestra	16
3.4. Operacionalización de variables.....	17
3.5. Descripción de instrumentos o herramientas de investigación	21
3.6. Plan de análisis	28

3.6.1.	Fase de diagnóstico	28
3.6.2.	Fase de diseño.....	29
4.	<i>Análisis de la situación actual</i>	32
4.1.	Encuesta higiénica	32
4.2.	Análisis de modos de falla y efectos	35
4.3.	Diagnóstico de necesidades de capacitación.....	41
4.4.	Simulación.....	44
4.5.	Conclusiones	49
4.6.	Recomendaciones	50
5.	<i>Propuestas de solución</i>	52
5.1.	Monitoreo	52
5.2.	Señalización	53
5.3.	Blindaje.....	57
5.4.	Selección de la alternativa de solución.....	62
5.5.	Propuesta de diseño.....	62
5.6.	Validación de la solución	65
5.7.	Conclusiones	85
5.8.	Recomendaciones	86
7.	<i>Referencias bibliográficas</i>	87
	<i>Apéndice 1. Organigrama del Instituto Tecnológico de Costa Rica enfocado al Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones.</i>	90
	<i>Apéndice 2. Encuesta higiénica</i>	91
	<i>Apéndice 3. Diagnóstico de necesidades de capacitación</i>	96
	<i>Apéndice 4. Detalles de la simulación computacional</i>	97
	<i>Apéndice 5. Análisis de modos de falla y efectos</i>	111
	<i>Apéndice 6. Respuestas de la encuesta higiénica</i>	114

Apéndice 7. Acciones recomendadas a partir del análisis de modos de falla y efectos	119
Apéndice 8. Resultados del diagnóstico de necesidades de capacitación..	123
Anexo 1. Prevista de placa de poliimida	135

Índice de Figuras

Figura 1. Algoritmo de simulación	23
Figura 2. Diagrama del plan de análisis	31
Figura 3. Priorización de modos de fallo mediante Diagrama de Pareto (FMEA)	38
Figura 4. Distribución de nivel de conocimiento en temas de protección radiológica ...	42
Figura 5. Evolución del plasma en (a) 2,2 ns (b) 4,2 ns (c) 6,2 ns y (d) 8,2 ns.....	45
Figura 6. Dosis efectiva debido a las radiaciones ionizantes del FUSOR-CR.....	47
Figura 7. Perfil de dosis tridimensional según la distancia al reactor	48
Figura 8. Dosímetro personal Genesis Ultra TLD-BP.	52
Figura 9. Rótulo para la indicación de zonas vigiladas.....	54
Figura 10. Combo de luz estroboscópica (izquierda) su respectivo rótulo (derecha) ...	55
Figura 11. Señalización de uso obligatorio de dosímetro (izquierda) y cadena plástica (derecha).....	56
Figura 12. Diseño de blindaje para el FUSOR-CR	63
Figura 13. Ubicación de los controles administrativos.....	64
Figura 14. Nivel de reducción de riesgo debido al blindaje propuesto.....	66
Figura 15. Perfil de dosis 3D según la distancia al reactor blindado	67
Figura 16. Diagrama de Gantt para la implementación de medidas de control	20
Figura 17. Organigrama del Instituto Tecnológico de Costa Rica enfocado al Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones, 2025	90
Figura 18. Interpolación trilineal	103
Figura 19. Cubierta de poliimida.....	135

Índice de Tablas

Tabla 1. Operacionalización objetivo 1: Identificar las condiciones actuales de exposición a radiaciones ionizantes durante la operación del FUSOR-CR.....	18
Tabla 2. Operacionalización del objetivo 2: Evaluar las condiciones de exposición de los trabajadores a radiaciones ionizantes emitidas por el FUSOR-CR.	19
Tabla 3. Operacionalización de objetivo 3: Diseñar controles ingenieriles y administrativos que minimicen la exposición de los trabajadores a radiaciones ionizantes durante la operación del FUSOR-CR.....	20
Tabla 4. Clasificación de modos de falla en la operación del FUSOR-CR.....	36
Tabla 5. Categorías con mejor desempeño en el DNC.....	43
Tabla 6. Composición molecular del fantoma de simulación	46
Tabla 7. Resultados de simulación	50
Tabla 8. Grosor de blindaje requerido para varios materiales.....	58
Tabla 9. Matriz de comparación de alternativas para el blindaje del fusor.....	59
Tabla 10. Factores de justificación y reducción para los controles propuestos.....	65
Tabla 11. Formato de diagnóstico de necesidades de capacitación	96
Tabla 12. Escala de severidad de modos de falla.....	111
Tabla 13. Escala de Ocurrencia de los modos de falla	112
Tabla 14. Escala de detección de los modos de falla	113
Tabla 15. Acciones recomendadas	119
Tabla 16. Puntajes obtenidos en el diagnóstico de necesidades de capacitación.	123

1. Introducción

1.1. Identificación de la empresa

El lugar donde se desarrolló este proyecto corresponde a las instalaciones del Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones (PlasmaTEC) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR).

1.1.1. Visión y misión de la empresa

Visión

“El Instituto Tecnológico de Costa Rica seguirá contribuyendo mediante la sólida formación del talento humano, el desarrollo de la investigación, la extensión, la acción social y la innovación científico-tecnológica pertinente, la iniciativa emprendedora y la estrecha vinculación con los diferentes actores sociales a la edificación de una sociedad más solidaria e inclusiva; comprometida con la búsqueda de la justicia social, el respeto de los derechos humanos y del ambiente (Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2024)”.

Misión

"Contribuir al desarrollo integral del país, mediante formación del recurso humano, la investigación y la extensión; manteniendo el liderazgo científico, tecnológico y técnico, la excelencia académica y el estricto apego a las normas éticas, humanísticas y ambientales, desde una perspectiva universitaria estatal de calidad y competitividad a nivel nacional e internacional (Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2024)”.

1.1.2. Antecedentes históricos

El Laboratorio de Investigación en Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones se ha consolidado como un referente en investigación de plasmas y fusión nuclear en Latinoamérica. Su origen se remonta a septiembre de 2008, como iniciativa del científico costarricense Dr. Iván Vargas Blanco, especialista en Física de Plasmas y Fusión Nuclear, fundó el grupo de Investigaciones en Plasmas y sus Aplicaciones en el TEC. Este grupo inició su labor mediante un convenio de cooperación entre el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de España (CIEMAT), desarrollando proyectos en el 2009 y 2010 enfocados en el estudio de transporte de plasmas en el Stellarator TJ-II.

Paralelamente, en octubre de 2008, el Dr. Vargas propuso a un grupo de estudiantes la construcción de un stellarator modular para el confinamiento magnético de plasmas, proyecto que tomó forma oficialmente en enero de 2011 con financiamiento y respaldo de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del TEC. Este esfuerzo culminó el 29 de junio de 2016 con la puesta en funcionamiento del Stellarator de Costa Rica 1 (SCR-1), el primer dispositivo de este tipo en América Latina.

En 2013, la Universidad de Wisconsin-Madison donó al TEC el Tokamak Esférico MEDUSA (Madison Education Small Aspect-ratio), lo que posicionó al TEC como una de las pocas instituciones a nivel mundial en contar simultáneamente con un Stellarator y un tokamak esférico para investigaciones en energía de fusión.

El 19 de junio de 2019 se inauguró oficialmente el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones en la Sede Central del campus del Tecnológico de Costa Rica.

En la actualidad, PlasmaTEC brinda capacitaciones a estudiantes mediante los cursos Física de Plasmas para Ingeniería I y II (IF6004 - IF6005), aportando conocimientos teóricos y aplicados en el área de plasmas. Además, de asesorar a empresas/instituciones públicas y privadas en temas de tecnología de plasmas,

englobando una diversidad de enfoques, plasmas para agricultura, medicina, materiales, tratamiento de desechos, entre otras.

1.1.3. Ubicación geográfica

El laboratorio forma parte de la Sede Central del Tecnológico de Costa Rica, su edificio se encuentra ubicado 75 metros al sur del Colegio Científico de Cartago, frente a las oficinas de FUNDATEC.

1.1.4. Organigrama de la organización

En el **Apéndice 1**, se presenta el organigrama del Instituto Tecnológico de Costa Rica, con un enfoque específico en las unidades institucionales que tienen relación directa con el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones. Este organigrama permite visualizar tanto la ubicación jerárquica del laboratorio dentro de la estructura organizativa de la universidad como la totalidad de su jerarquía interna. Además, se destacan los distintos entes institucionales que interactúan con el laboratorio en aspectos clave: la Unidad de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral en temas de seguridad laboral, el Departamento Administrativo del Mantenimiento para la gestión del edificio y algunos equipos, el Departamento de Aprovisionamiento la adquisición de bienes y servicios y la Clínica de Atención Integral en Salud, que brinda soporte médico en caso de emergencias o consultas generales.

1.1.5. Número de empleados

PlasmaTEC cuenta con aproximadamente 40 miembros, entre ellos el coordinador del laboratorio, Dr. Iván Vargas Blanco, así como profesores y estudiantes que desempeñan roles como asistentes, colaboradores y coordinadores en los distintos proyectos del laboratorio.

1.1.6. Tipos de productos o servicios

En la actualidad, PlasmaTEC se orienta a brindar servicios de capacitación e investigación en el área de plasmas, colaborando con la Vicerrectoría de Investigación y Extensión. Su labor comprende el desarrollo de soluciones innovadoras para diversas problemáticas e incluye medioambiente, salud, tratamiento de residuos, agricultura, investigación en plasmas y fusión.

1.1.7. Mercado

El mercado meta, orienta sus servicios a universidades, centros de investigación, empresas tecnológicas y entidades gubernamentales que buscan desarrollar e implementar tecnologías basadas en plasmas para la solución de problemáticas específicas.

1.1.8. Proceso productivo

En PlasmaTEC, se brindan servicios de consultoría y soluciones tecnológicas en las siguientes áreas:

- 1) **Plasmas medioambientales:** Esta área se enfoca en la investigación sobre la degradación de compuestos nocivos en muestras de agua por medio de tratamientos con reactores de plasmas atmosféricos.
- 2) **Aplicaciones industriales:** Se pueden tratar materiales para mejorar sus propiedades mecánicas, químicas o dieléctricas mediante deposición de capas delgadas con blancos de cobre. También se optimiza la resistencia al desgaste y la vida útil de componentes metálicos mediante nitruración con plasmas de nitrógeno (N₂), hidrógeno (H₂) y argón (Ar).
- 3) **Plasma para medicina:** En esta área de investigación se estudia la esterilización de superficies mediante tratamientos de agua activada por plasmas, y aplicaciones de plasmas fríos a superficies. Dichas aplicaciones han probado ser efectivas contra ciertos agentes bacterianos y virales.

1.2. Planteamiento del problema

En las últimas décadas, la tecnología nuclear ha experimentado un notable avance, impulsando aplicaciones en sectores como la industria farmacéutica y la ciencia de materiales. En estos campos, las fuentes de neutrones han permitido desarrollar nuevos compuestos bioactivos y estudiar la estructura atómica de materiales, promoviendo la innovación científica y tecnológica.

Con base en estos beneficios, el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones ha iniciado la construcción del FUSOR-CR, un dispositivo experimental basado en el diseño de un fusor de Farnsworth, capaz de producir reacciones de fusión nuclear y, por ende, radiaciones ionizantes, principalmente neutrones, con potencial para diversas aplicaciones científicas.

Según el reglamento sobre protección contra radiaciones ionizantes (N° 24037-S), el FUSOR-CR se clasifica como un generador de radiaciones ionizantes. Este reglamento establece en su artículo 21 que, para obtener el permiso sanitario de funcionamiento, es obligatorio presentar información detallada sobre el personal autorizado, procedimientos operativos, de mantenimiento y de protección radiológica, así como un certificado de calibración de la fuente de radiación. Asimismo, el artículo 68 fija límites estrictos de dosis de radiación para los trabajadores ocupacionalmente expuestos, con un máximo de 20 mSv anuales en promedio, y límites adicionales acumulativos a cinco años.

La operación del FUSOR-CR sin una adecuada gestión de la protección radiológica ni el cumplimiento de los requisitos legales implicaría riesgos significativos. Entre ellos se encuentran posibles sanciones por parte del Ministerio de Salud, como multas o cierre del laboratorio, además del riesgo para la salud de los trabajadores debido a la exposición a radiaciones ionizantes. Estas condiciones podrían comprometer la seguridad del personal, la continuidad operativa del proyecto y la credibilidad del laboratorio ante la comunidad científica y las autoridades regulatorias.

1.3. Justificación del proyecto

La exposición a radiaciones ionizantes representa un riesgo significativo para la salud humana. Esta puede provocar efectos agudos como náuseas, vómitos, diarrea, fatiga, pérdida de cabello o quemaduras tras exposiciones intensas en un corto periodo; además, puede generar efectos a largo plazo como cáncer, alteraciones genéticas, problemas reproductivos y daño neurológico (Sievert, 1958). Particularmente, los neutrones son altamente dañinos: según Ciottone & Alexander (2024), su capacidad de afectar los tejidos humanos puede ser hasta veinte veces mayor que la de los rayos gamma.

Ante esta amenaza, Kim (2018) señala tres principios fundamentales para mitigar la exposición:

- 1) **Tiempo de exposición:** Puede controlarse mediante la capacitación del personal. De esta manera, se reduce el error humano asociado al proceso, evitando la necesidad de repetir procedimientos.
- 2) **Distancia a la fuente:** La intensidad de la radiación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Por lo tanto, aumentar la distancia tiene un gran impacto en la reducción de la exposición ocupacional.
- 3) **Implementación de blindajes:** Estos dispositivos actúan como una barrera física entre el personal y la fuente de radiación, bloqueando parcialmente la radiación liberada al entorno.

Sin embargo, sin una planificación estructurada, estas medidas difícilmente se implementan de forma eficaz.

El FUSOR-CR será la primera máquina generadora de radiaciones ionizantes en el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones. A medida que se avanza en su construcción y puesta en marcha, se vuelve imperativo establecer un sistema de protección radiológica que garantice la seguridad del personal y del entorno. De no

implementarse medidas adecuadas, el equipo representaría un riesgo innecesario para quienes lo operen o trabajen en sus proximidades.

Actualmente, el reglamento sobre protección contra radiaciones ionizantes exige la implementación de medidas de seguridad tanto administrativas como ingenieriles para operar fuentes emisoras. Sin embargo, el laboratorio aún no ha implementado estas medidas, lo cual representa un incumplimiento normativo que impediría su operación conforme a la legislación vigente.

Más específicamente, el Reglamento sobre Protección Contra las Radiaciones Ionizantes (Decreto 24037-S) establece que todas las instalaciones que operen generadores de radiación deben contar con sistemas de protección para el personal y terceros, además de cumplir con evaluaciones de seguridad. Asimismo, el artículo 72 de la Ley General de Salud exige que este tipo de instalaciones cuenten con una autorización especial del Ministerio de Salud, la cual solo se otorga tras verificar el cumplimiento de los estándares técnicos y legales.

Por tanto, el desarrollo de este proyecto es crucial para garantizar la seguridad radiológica del laboratorio, proteger la salud de los colaboradores y asegurar el cumplimiento de las exigencias legales. Además, este trabajo no solo facilitará la puesta en marcha del FUSOR-CR, sino que servirá como un modelo replicable para otras instituciones que trabajen con tecnologías similares, promoviendo mejores prácticas en la protección radiológica y en la investigación nuclear, tanto a nivel nacional como internacional.

1.4. Objetivos del proyecto de graduación

1.4.1. Objetivo general

Proponer un plan de mejora para minimizar la exposición a radiaciones ionizantes durante la operación del FUSOR-CR en el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica, asegurando el cumplimiento de las normativas nacionales en protección radiológica.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Identificar las condiciones actuales de exposición a radiaciones ionizantes durante la operación del FUSOR-CR.
2. Evaluar las condiciones de exposición de los trabajadores a las radiaciones ionizantes generadas por el FUSOR-CR, determinando el tiempo de exposición, la distancia de trabajo y la dosis recibida durante su operación.
3. Diseñar controles ingenieriles y administrativos que minimicen la exposición de los trabajadores a radiaciones ionizantes durante la operación del FUSOR-CR.

1.5. Alcances del proyecto

El presente proyecto propone el primer plan de implementación de controles ingenieriles y administrativos para el uso seguro del FUSOR-CR del Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones, en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, este fue desarrollado durante el primer semestre del 2025 y está dirigido al personal del proyecto FUSOR-CR, al coordinador del laboratorio y al departamento de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Este plan está enfocado en identificar, evaluar y proponer soluciones a las condiciones de riesgo relacionadas a la radiación ionizante generada durante la operación del FUSOR-CR de modo que se logre reducir el riesgo a niveles seguros, garantizando el cumplimiento normativo nacional.

1.6. Limitaciones del proyecto

Durante el desarrollo de este proyecto, no se contó con datos de dosimetrías anteriores, ya que el equipo no se encuentra operativo, lo que hace imposible utilizar esta información en el análisis. Los componentes del FUSOR-CR han sido adquiridos en el periodo del 2018 hasta el presente año, debido a esto no se puede dar garantía de su funcionalidad una vez que se ponga en marcha. Además, debido a que el equipo no está en capacidad operacional, no es posible realizar mediciones de exposición ocupacional, lo cual se deberá hacer en cuanto el equipo entre en funcionamiento. Por otro lado, se desconoce la cantidad de radiación emitida por la fuente, ya que no fue adquirida de un fabricante, sino que está siendo construida en el laboratorio. Esta limitación indica el requerimiento de una medición de verificación para lograr validar los resultados obtenidos de la simulación. Además, el presente proyecto no tendrá carácter vinculante para la institución, sino, un primer acercamiento, cuyo objetivo es evaluar viabilidad y establecer bases para futuras acciones.

2. Marco teórico

La investigación en materia de tecnología nuclear recibe cada vez más interés de la comunidad científica producto de las potenciales utilidades que presenta a nivel industrial y en sistemas controlados. El principal atractivo que presenta esta área está ligado al ámbito energético, relacionado a la generación de energía renovable, sin embargo, esta no es la única aplicación que presenta, debido a que también tiene avances que se han relacionado con el área biomédica y medicina nuclear, así como también en el área de materiales (Kiyanagi, 2021).

El proceso de fusión nuclear implica que dos núcleos atómicos ligeros, generalmente el hidrógeno y sus isótopos (deuterio y tritio), se “fusionen”. Esta reacción requiere varios millones de grados para aumentar la energía cinética de ambas partes, sin embargo, es capaz de liberar cantidades aún mayores en el proceso (Claessens, 2023). Si bien el resultado final de la fusión es la obtención de energía, también se producen subproductos durante este fenómeno, entre ellos una molécula con un núcleo más pesado (más comúnmente helio) y neutrones que escapan disparados por la fuerza generada en esta reacción (IAEA, 2021).

La fusión y, a su vez, la generación de neutrones es llevada a cabo en un dispositivo de confinamiento electrostático inercial (IEC), la herramienta más conocida es el fusor de Farnsworth. Este dispositivo utiliza campos eléctricos para mantener el plasma confinado, produciendo la aceleración de iones en un entorno de alto campo eléctrico para la producción de partículas de interés (Buzarbaruah et al., 2015). Debido a su simplicidad y al reducido costo de implementación, la investigación en este ámbito ha sido liderada principalmente por universidades e institutos de investigación. En un estudio realizado por Wulfkühler et al. (2024), se examinó el avance en la creación de dispositivos de confinamiento electrostático inercial (IEC) y se analizaron 21 experimentos llevados a cabo en diferentes partes del mundo entre 1998 y 2019. Los hallazgos revelaron una amplia generación de neutrones en estos dispositivos, pudiendo oscilar entre $1E+04$ y $1E+10$ neutrones por segundo.

Una de las áreas más estudiadas de la tecnología nuclear es la utilización de los subproductos de la fusión nuclear. En la terapia del cáncer, los neutrones se utilizan por su potencial para atacar selectivamente las células cancerosas mediante un método llamado “Terapia de Captura de Neutrones de Boro” o BNCT, presentando poco impacto en los tejidos sanos circundantes (Dorostkar et al., 2022). En otra área, en la ciencia de materiales, los neutrones tienen un uso destinado a la determinación de grietas y corrosión, así como en la estimación de la dureza de materiales (Mirfayzi et al., 2024). Las aplicaciones de los neutrones son variadas y amplias en la industria, lo que ha llevado a los laboratorios a indagar cada vez más en procesos de fusión nuclear, sin embargo, se debe considerar que estos procesos liberan radiaciones ionizantes requiriendo un adecuado manejo radiológico (Otto, 2021).

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2023), la radiación ionizante es aquella que liberan los átomos en forma de ondas electromagnéticas o partículas (neutrones). El efecto de la exposición va a depender de la dosis recibida, expresada en Gray (Gy) y la dosis efectiva, expresada en Sievert (Sv). Se considera que, por encima de 1 Sv por corto periodo de tiempo, la radiación es capaz de producir el síndrome de irradiación aguda caracterizado por enrojecimiento de la piel, caída del cabello, quemaduras por radiación, entre otros síntomas, afectando el funcionamiento de ciertos tejidos u órganos (CDC, 2024). Estos efectos son más intensos cuando mayores son las dosis y tasas de dosis, siendo 50 mSv la dosis de exposición ocupacional más pequeña comprobada que puede causar el crecimiento de un tumor si se administra durante un año. Dosis superiores a 10 Sv, independiente del tiempo de exposición, causan la muerte en pocas semanas (Talapko et al., 2024).

El impacto de la radiación ionizante ocurre directamente a nivel celular donde se produce un daño irreparable en la molécula de ADN (Jiao et al., 2022). Aun cuando existen avanzados mecanismos de reparación celular, en muchos casos el daño termina derivando en mutaciones y aberraciones cromosómicas (Belli & Tabocchini, 2020). La capacidad mutagénica de los neutrones ha derivado en un creciente interés en evaluar los sistemas de protección radiológica para medir los riesgos para la salud que tienen estos niveles de exposición (Akbar et al., 2009).

En el contexto de protección radiológica existen tres principios básicos para optimizar la exposición ocupacional a radiaciones ionizantes, según Kim (2018) estos son el tiempo de exposición de los trabajadores, el cual puede reducirse mediante la capacitación del personal de modo que se reduzca el error humano y se minimice la necesidad de repetir procedimientos. La distancia a la fuente, esto debido a que la intensidad de la radiación es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, así, el simple hecho de duplicar la distancia a la fuente reduciría los niveles de exposición en un factor de 1/4 de esta manera se torna una de las medidas más efectivas y fáciles de implementar para controlar la exposición ocupacional. En última instancia se encuentran los blindajes, estos corresponden a barreras físicas que bloquean parcialmente la radiación proveniente de la fuente, en el mercado se pueden encontrar como equipos de protección personal (anteojos de plomo, protectores de tiroides, guantes, etc) o como resguardos fijos que se colocan en la fuente.

En materia relacionada a la seguridad radiológica existe una responsabilidad a nivel nacional de regular y velar por los trabajadores implicados en actividades ocupacionales que utilicen fuentes de ionización, sin embargo, debido a las características de estas actividades es necesario tener referencias internacionales para la formulación de normativas actualizadas que permitan preservar de mejor manera la salud de los colaboradores. La principal entidad de referencia en materia de protección y seguridad radiológica es el Organismo Internacional de Energía Atómica (AIEA). Las normas de seguridad que establece esta asociación fundamentan principios, requisitos y medidas para proteger al personal de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes (IAEA, 2016).

El Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR), es otra de las entidades encargadas de estudiar a las radiaciones ionizantes. Su misión es evaluar y estimar los niveles a los que se exponen los trabajadores y emitir un informe, para posteriormente ser utilizada de referencia para la creación de normativas y literatura actualizada sobre protección radiológica. Es una de las principales referencias internacionales que existe en materia de protección ante radiación ionizante (UNSCEAR, 2022).

Adicionalmente, en temas de seguridad laboral existe la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA), organismo responsable de velar por la protección de la salud de los trabajadores en sus espacios laborales. Esta entidad, a través de la normativa OSHA 1910.1096, define directrices particulares para trabajar en ambientes donde exista exposición a radiaciones ionizantes. Se enfatiza en las adecuaciones mínimas para adaptar el entorno laboral incluyendo señalización adecuada de espacios, manejo de exposición controlada por los colaboradores y precauciones estándar para el manejo de materiales radioactivos. Además, se destaca la necesidad y obligatoriedad de llevar registros de exposición de los empleados, así como también la adecuada notificación de incidentes laborales (OSHA, 2022).

En la normativa nacional, el decreto 24037-S, “Reglamento Sobre Protección Contr las Radiaciones Ionizantes”, es la regulación vigente en el país que se encarga de regular el uso de radiaciones ionizantes y su impacto en la población. Establece requisitos que deben cumplir las instalaciones radiactivas, equipos emisores de radiaciones ionizantes y el personal que trabaja en ellas. Se establece que el límite anual de dosis para los trabajadores ocupacionalmente expuestos en el organismo, durante el transcurso de doce meses consecutivos es de 20 mSv, pudiendo sobrepasarse siempre y cuando en un periodo de cinco años no se sobrepasen los 100 mSv y nunca en un solo año los 50 msV (PGR, 2009).

Si bien, la normativa en seguridad radiológica ha adquirido una mayor relevancia en las instituciones existiendo una mayor regulación de las condiciones ambientales en exposición a las radiaciones ionizantes, se debe destacar el rol fundamental que tienen los trabajadores en la prevención de accidentes y situaciones críticas. Es indispensable asegurar que los colaboradores cuenten con un conocimiento suficiente para realizar determinados procedimientos y análisis de riesgos para la toma de decisiones, protegiéndose a sí mismos y a su entorno (Zekioğlu & Parlar, 2021). Es necesario, por tanto, mantener actualizado al personal mediante capacitaciones periódicas y formación actualizada en prácticas seguras a la exposición de radiaciones ionizantes. El trabajo colaborativo entre las instituciones y sus trabajadores permitirá realizar avances investigativos preservando la salud de quienes desempeñan labores en este ámbito.

3. Metodología

3.1. Tipo de investigación

El alcance de la investigación es a nivel descriptivo según menciona Hernández Sampieri et al. (2014, p. 92) debido a que se busca medir, especificar y recopilar información acerca de las condiciones de exposición a radiaciones ionizantes debido al uso del FUSOR-CR. En cuanto al propósito tiene un enfoque aplicado (Lozada, 2014) ya que se desea aplicar directamente el conocimiento generado con el fin de proponer soluciones al problema planteado mediante un plan mejora para el uso seguro del FUSOR-CR. Según los datos utilizados la investigación se clasifica como cuantitativa debido a que se utiliza información en forma numérica y se basa en la aplicación de principios matemáticos y estadísticos para la descripción del comportamiento de la población (Cárdenas, 2018).

3.2. Fuentes de información

A continuación, se presentan diversas fuentes de información utilizadas en el desarrollo de este proyecto:

3.2.1. Fuentes primarias

Documentos de entes internacionales

- Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad: Requisitos de Seguridad Generales, Parte 3 (World Health Organization, 2016).
- ICRP publicación 103 Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, 2007).

Artículos científicos

- New composites for neutron radiation shielding (Cataldo & Prata, 2019).
- Polyimide nanocomposites in ternary structure: “A novel simultaneous neutron and gamma-ray shielding material” (Baykara et al., 2020).

Libros de texto

- Fusion neutronics (Wu, 2017).
- Safety for particle acceleratros (Otto, 2021).
- Neutron Generators for Analytical Purposes (Radia & Rep, 2012).
- Neutron Monitoring for Radiation Protection (IAEA, 2023).

Fuentes externas

- Ministerio de Salud de Costa Rica
- Comisión de Energía Atómica de Costa Rica

3.2.2. Fuentes secundarias

Normativa nacional

- Reglamento Sobre Protección Contrás las Radiaciones Ionizantes N° 24037-S
- Código de trabajo de Costa Rica
- Ley General de Salud N° 5395

3.2.3. Fuentes terciarias

Bases de datos

- EBSCOHost
- SpringerLink
- Scopus
- ScienceDirect
- Repositorio del Instituto Tecnológico de Costa Rica

3.3. Población y muestra

En el contexto del proyecto FUSOR-CR, actualmente participan seis estudiantes, de los cuales uno tiene el rol de coordinador del proyecto y forma parte de la carrera de Ingeniería Física. Los demás, con el rol de asistentes del laboratorio, incluyen a tres estudiantes de la carrera de Ingeniería Física, uno de Ingeniería en Materiales y uno de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental. Estos estudiantes se encargan de diversas actividades, como el diseño, la elaboración de montajes experimentales, la planificación, el mantenimiento de los equipos y otras tareas que surgen conforme a las necesidades del proyecto.

Dado que la población involucrada en el proyecto es accesible, finita y de tamaño reducido, se opta por aplicar los instrumentos de diagnóstico a la totalidad de los colaboradores. Esta estrategia se fundamenta en que, cuando el tamaño de la población es muy pequeño, el uso de técnicas de muestreo estadístico no garantiza una adecuada representatividad, ni permite aplicar inferencias válidas basadas en el teorema del límite central, el cual establece que la aproximación a la distribución normal de los estadísticos muestrales solo es fiable si el tamaño de la muestra n es suficientemente grande (usualmente $n \geq 30$). Al trabajar con toda la población, se eliminan estos riesgos metodológicos, y se obtiene una visión completa y precisa de las condiciones evaluadas (Walpole, 2012).

3.4. Operacionalización de variables

A continuación, se presenta la operacionalización de variables para cada uno de los objetivos propuestos para este proyecto.

Tabla 1. Operacionalización objetivo 1: Identificar las condiciones actuales de exposición a radiaciones ionizantes durante la operación del FUSOR-CR.

Variable	Conceptualización	Indicadores	Herramientas e Instrumentos
Condiciones de exposición a radiaciones ionizantes	Características específicas de los trabajadores, procedimientos, equipos, puestos de trabajo que afectan el nivel de exposición ocupacional a radiaciones ionizantes	Cantidad de necesidades de capacitación identificadas en los trabajadores	Diagnóstico de necesidades de capacitación (DNC) basado en el Manual de diagnóstico de necesidades de capacitación y planificación formativa del INAB
		Cantidad de trabajadores expuestos	Encuesta higiénica
		Distancia del personal a la fuente emisora en metros	
		Existencia de blindajes	
		Cantidad de procedimientos de trabajo	
		Cantidad de equipos de protección personal	
		Tiempo de exposición en $\frac{\text{horas}}{\text{año}}$	

Tabla 2. Operacionalización del objetivo 2: Evaluar las condiciones de exposición de los trabajadores a radiaciones ionizantes emitidas por el FUSOR-CR.

Variable	Conceptualización	Indicadores	Herramientas e Instrumentos
Condiciones de exposición de los trabajadores a radiaciones ionizantes	Conjunto de factores que influyen en la forma en que los trabajadores del FUSOR-CR están expuestos a radiaciones ionizantes durante su labor, tales como el tiempo de permanencia cerca de la fuente, la distancia a la fuente, el uso de blindajes, y la frecuencia de exposición.	Dosis efectiva: $\frac{mS}{año}$	Simulación computacional
		Zona límite de seguridad en metros	Análisis de criticidad y efectos de modo de falla basado en la IEC 60812
		Cantidad de puntos críticos por controlar	
		Cantidad de puntos que requieren señalización	

Tabla 3. Operacionalización de objetivo 3: Diseñar controles ingenieriles y administrativos que minimicen la exposición de los trabajadores a radiaciones ionizantes durante la operación del FUSOR-CR

Variable	Conceptualización	Indicadores	Herramientas e Instrumentos
Controles ingenieriles	Reestructuración del diseño de equipos o espacio de trabajo con el fin de reducir el riesgo a radiaciones ionizantes	Cantidad de controles adoptados, nivel de reducción de riesgo	Matriz comparativa de alternativas de diseño
		Costos de implementación	Matriz de costos
Controles administrativos	Desarrollo de medidas estratégicas para reducir el riesgo mediante cambios en las prácticas, procedimientos o políticas laborales	Cantidad de capacitaciones a realizar	Cuadro/plan de capacitación
		Nivel de justificación	Factor de justificación y reducción basado en la guía técnica colombiana GTC 45
		Cantidad de tareas a realizar en el tiempo establecido	Diagrama de Gantt
		Cantidad de apartados funcionales en el manual de procedimientos del FUSOR-CR	Guía para la elaboración de Manuales de Procedimientos para Instalaciones con Aceleradores de Partículas de Uso Industrial o de Investigación del Ministerio de Salud 2023

3.5. Descripción de instrumentos o herramientas de investigación

En este apartado se detallan los instrumentos y herramientas utilizadas para el desarrollo del proyecto.

Objetivo 1. Identificar las condiciones actuales de exposición a radiaciones ionizantes durante la operación del FUSOR-CR.

Encuesta higiénica

La encuesta higiénica corresponde a un proceso sistemático de evaluación y recopilación de datos relativos a las condiciones laborales. Su propósito principal es identificar peligros potenciales en el entorno de trabajo, así como evaluar la percepción de los trabajadores sobre las medidas de seguridad implementadas. Además, permite la recopilación de datos epidemiológicos históricos, lo que facilita el análisis de tendencias y la identificación de posibles peligros recurrentes en la organización. La versión de la encuesta aplicada en el presente estudio se encuentra disponible en el **Apéndice 2**.

Diagnóstico de necesidades de capacitación (DNC)

Es un proceso sistemático que busca recolectar e identificar necesidades de fortalecimiento de las habilidades y los conocimientos de los colaboradores. Según Aguilar Morales (2019) este instrumento debe ser capaz de identificar los individuos que requieren capacitación, en cuáles temas, con qué profundidad, cuándo y en qué orden deben ser capacitados. La matriz que se aplicó en este proyecto (ver **Apéndice 3**.) se enfocó en las necesidades de capacitación de los integrantes del proyecto FUSOR-CR para poder operar este equipo de manera segura y fue construida a partir de los requisitos establecidos en el programa de estudios del Curso de Postgrado en Protección Radiológica y Seguridad de las Fuentes de Radiación (IAEA, 2019) organizándose en temas específicos. Para cada uno de estos temas, se desarrollaron preguntas alineadas con los objetivos correspondientes. En cuanto a la aplicación de la matriz, las preguntas fueron administradas a los colaboradores utilizando una escala de respuesta tipo Likert, que abarcaba las categorías: “Nunca / Totalmente en desacuerdo”, “Rara vez / En

desacuerdo”, “A veces / Neutral”, “Frecuentemente / De acuerdo”, y “Siempre / Totalmente de acuerdo”, correspondientes a los puntajes numéricos de 1 a 5, respectivamente.

Para el análisis de los datos, se calculó el puntaje individual de cada pregunta a partir del promedio de las respuestas proporcionadas por los colaboradores. Además, el puntaje de cada sección se determinó mediante el cálculo del promedio ponderado de las respuestas de las preguntas que la componían.

Objetivo 2. Evaluar las condiciones de exposición de los trabajadores a radiaciones ionizantes emitidas por el FUSOR-CR.

Simulación computacional

Es un proceso que utiliza modelos matemáticos y algoritmos para reproducir el comportamiento de un sistema físico. Estas simulaciones permiten analizar y predecir el comportamiento de sistemas físicos sin la necesidad de llevar a cabo experimentos reales (Rubin H. Landau et al., 2015).

En cuanto al proyecto concierne, la simulación que se realizó modela el comportamiento del plasma dentro de la cámara del FUSOR-CR según el algoritmo descrito en la **Figura 1**, se utilizó un modelo de partícula con el método PIC (*particle in cell*) para describir la dinámica del plasma, además las reacciones de fusión fueron estimadas mediante el método de simulación directa de Monte Carlo, a partir de estos resultados se obtuvo el flujo de neutrones que posteriormente fue utilizado para determinar la dosis efectiva de los trabajadores a varias distancias utilizando la herramienta OpenMC, para mayor detalle del procedimiento ver el **Apéndice 4**.

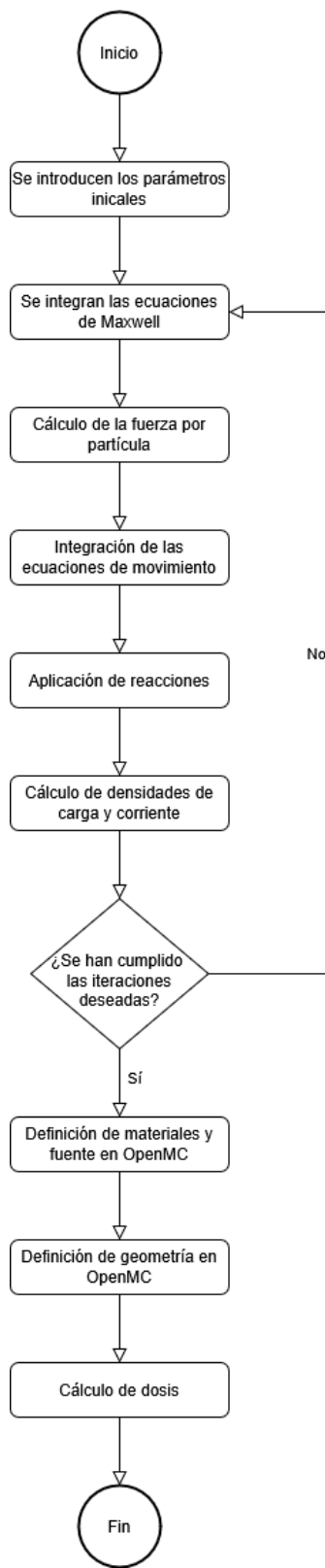


Figura 1. Algoritmo de simulación

En cuanto a las suposiciones de la simulación se encuentran:

- **El plasma y cámara es transparente para los neutrones:** La trayectoria de los neutrones no se ve afectada por las interacciones con el plasma o con la cámara de vacío.
- **Condición electrostática:** La densidad de corriente no es apreciable por lo que el potencial eléctrico se puede calcular mediante la ecuación de Poisson.
- **Mecanismos de ionización:** Se ignoraron los mecanismos de ionización por colisiones y radiación, de modo que el punto de partida es un plasma ionizado.

Análisis de criticidad y efectos de modo de falla (FMEA)

El análisis de criticidad y efectos de modos de falla (FMEA, por sus siglas en inglés) es un método estructurado utilizado para evaluar un elemento o proceso con el fin de identificar las posibles formas en que podría fallar, así como los efectos que estos fallos tendrían sobre el desempeño del sistema, el entorno y el personal involucrado. Este enfoque permite priorizar los riesgos asociados a los modos de falla en función de su gravedad, probabilidad de ocurrencia y capacidad de detección, facilitando la implementación de acciones correctivas o preventivas.

El proceso de FMEA se desarrolla a través de varias etapas, las cuales incluyen:

1. **Identificación de los modos de falla:** Se identifican todos los posibles modos de falla que podrían ocurrir en el proceso o elemento. Un "modo de falla" se refiere a cualquier tipo de defecto o mal funcionamiento que pueda alterar el rendimiento del sistema.
2. **Determinación de los efectos de cada modo de falla:** Para cada modo de falla identificado, se analizan los posibles efectos sobre el sistema en su conjunto, el entorno y las personas cercanas. Esto incluye la evaluación de cómo un fallo puede impactar en la seguridad, el rendimiento o la operación del sistema.

3. Evaluación de la severidad, ocurrencia y detección: En esta fase, se asignan valores numéricos a cada modo de falla según tres criterios clave:
 - A. **Severidad (S)**: Gravedad del efecto del fallo, en una escala del 1 al 10, donde 10 representa el efecto más grave.
 - B. **Ocurrencia (O)**: Probabilidad de que el fallo ocurra, también en una escala del 1 al 10, siendo 10 la probabilidad más alta.
 - C. **Detección (D)**: Capacidad de detectar el fallo antes de que cause un impacto significativo, en una escala del 1 al 10, donde 1 representa alta probabilidad de detección y 10 una baja probabilidad.
4. Cálculo del número de prioridad de riesgo (RPN): El RPN se calcula multiplicando los valores de severidad, ocurrencia y detección: $RPN = S \cdot O \cdot D$. Este valor ayuda a priorizar los modos de falla en función de su criticidad. Cuanto mayor sea el RPN, mayor será la prioridad para implementar medidas correctivas o preventivas.
5. Acciones correctivas y preventivas: En función de los RPN calculados, se diseñan e implementan acciones para mitigar los modos de falla más críticos.

Objetivo 3. Diseñar controles ingenieriles y administrativos que minimicen la exposición de los trabajadores a radiaciones ionizantes durante la operación del FUSOR-CR.

Matriz comparativa de alternativas de diseño

Es una herramienta utilizada para evaluar y comparar diferentes opciones o soluciones de diseño en un proceso de toma de decisiones. Se presenta en forma de una tabla donde se listan las diferentes alternativas en las filas y los criterios relevantes de evaluación en las columnas. Cada celda de la matriz contiene una evaluación de cómo cada alternativa cumple con cada criterio, lo cual permite hacer una comparación directa entre las diferentes opciones.

Matriz de costos

Es una herramienta utilizada para desglosar y analizar los costos asociados a un proyecto, producto o proceso, de manera que se pueda entender cómo se distribuyen y afectan los diferentes factores involucrados. La matriz ayuda a visualizar de forma clara cómo se asignan los recursos financieros, permitiendo realizar comparaciones y facilitar la toma de decisiones.

Plan de capacitación

Corresponde a una matriz estructurada que indica las actividades necesarias para mejorar la competencia de los trabajadores en un área específica. Esta incluye los objetivos de aprendizaje, contenidos, duración, entre otros apartados.

Factor de justificación y reducción

Es una herramienta que considera el factor de reducción de riesgo y el costo de implementación para determinar el factor de justificación de una propuesta. Donde el factor de reducción de riesgo F se obtiene a partir de la siguiente fórmula, considerando a NR_i como el nivel de riesgo inicial y el NR_f corresponde al nivel de riesgo final:

$$F = \frac{NR_i - NR_f}{NR_i} \cdot 100$$

El factor de justificación J representa la relación costo/beneficio de una propuesta, al realizar el cálculo se puede determinar qué tan viable (entre mayor sea es mejor) es la medida de intervención en consideración. Dicho factor se obtiene a partir del factor de reducción de riesgo, el nivel de riesgo inicial y el factor de costo de la propuesta d a partir de la siguiente relación.

$$J = \frac{NR_i \cdot F}{d}$$

Diagrama de Gantt

Es una herramienta visual de gestión de proyectos que se utiliza para representar gráficamente el cronograma de un proyecto. Muestra las tareas o actividades del proyecto en el eje vertical y el tiempo en el eje horizontal, permitiendo visualizar la duración de cada actividad y su secuencia lógica.

Guía para la elaboración de Manuales de Procedimientos para Instalaciones con Aceleradores de Partículas de Uso Industrial o de Investigación del Ministerio de Salud 2023

Es un documento guía elaborado por el Ministerio de Salud que proporciona una base para elaborar el manual de procedimientos requerido para solicitar el permiso de funcionamiento, en esta guía se presentan los aspectos básicos necesarios para cumplir con los requerimientos establecidos por el Ministerio de Salud.

3.6. Plan de análisis

Este análisis se dividió en dos grandes fases: la fase de diagnóstico, enfocada en identificar y evaluar las condiciones actuales de exposición a radiaciones ionizantes en el entorno del FUSOR-CR, y la fase de diseño, centrada en el desarrollo de soluciones que permitan minimizar dicha exposición mediante controles administrativos e ingenieriles. La forma en que se utilizaron las herramientas para el cumplimiento de los objetivos del proyecto se puede observar en la **Figura 2**, a continuación, se describe el procedimiento utilizado:

3.6.1. Fase de diagnóstico

En esta primera etapa se abordaron los objetivos 1 y 2 del proyecto, aplicando diversas herramientas técnicas para caracterizar tanto el entorno laboral como los factores asociados a la exposición radiológica.

Objetivo 1

Como punto de partida se aplicó la encuesta higiénica para recolectar información general sobre las condiciones de trabajo en el laboratorio, infraestructura, organización de tareas y características del entorno operativo del FUSOR-CR. Los datos recolectados se analizaron de manera descriptiva, categorizando las condiciones laborales que podrían implicar exposición a riesgos radiológicos. Posteriormente, se aplicó el diagnóstico de necesidades de capacitación en forma de una encuesta a cada uno de los colaboradores para identificar brechas en el conocimiento del personal sobre protección radiológica. Los resultados se clasificaron por áreas temáticas y se priorizaron según los puntajes más bajos obtenidos, lo cual permitió determinar los contenidos críticos para una futura capacitación.

Objetivo 2

Para el cumplimiento de este objetivo se desarrolló una simulación computacional del funcionamiento del FUSOR-CR en condiciones convencionales. Esta simulación permitió modelar el comportamiento del plasma y estimar la cantidad de radiación ionizante emitida, con el fin de calcular la dosis anual equivalente que podría recibir un operador en distintas posiciones dentro del laboratorio. Los resultados fueron expresados en milisieverts (mSv/año) y comparados con los límites permisibles establecidos por la legislación vigente, identificando zonas de mayor riesgo y distancias mínimas de seguridad.

A continuación, se aplicó un Análisis de Modos de Falla y Efectos (FMEA) al procedimiento operativo del FUSOR-CR, con el propósito de identificar fallos potenciales en el uso del equipo y su posible impacto sobre la salud de los trabajadores. Este análisis permitió localizar puntos críticos de control dentro del proceso operativo, determinar las zonas que requieren señalización de peligro radiológico y establecer las áreas de acceso restringido. La información obtenida se utilizó como base para el diseño de los controles ingenieriles y administrativos propuestos en la fase siguiente.

3.6.2. Fase de diseño

Objetivo 3

En esta etapa se trabajó en el diseño de controles ingenieriles y administrativos que permitan minimizar la exposición ocupacional a radiaciones ionizantes durante la operación del FUSOR-CR.

El diseño de las soluciones se basó en la información recolectada y analizada en la fase de diagnóstico. Como primer paso, se elaboró una matriz comparativa de alternativas de diseño, que permitió evaluar diversas opciones de control en función de criterios como salud y seguridad, impacto ambiental, económico, normativo, sociocultural

y su viabilidad técnica. A partir de esta matriz se seleccionaron las alternativas más adecuadas para la realidad del proyecto.

Una vez seleccionadas las soluciones, se procedió a construir el plan de capacitación, el cual fue diseñado específicamente para cubrir las necesidades formativas identificadas en el DNC. Este programa incluyó los temas por reforzar, la estrategia de enseñanza, los responsables de la capacitación, etc.

Con el fin de planificar las actividades necesarias para la implementación de los controles, se elaboró un diagrama de Gantt, que permitió planificar de manera secuencial las tareas necesarias para el desarrollo del plan de mejora. Esta herramienta fue esencial para asegurar un control efectivo del tiempo y facilitar la ejecución ordenada del proyecto.

Objetivo general: Proponer un plan de mejora para minimizar la exposición a radiaciones ionizantes durante la operación del FUSOR-CR en el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica, asegurando el cumplimiento de las normativas nacionales en protección radiológica.

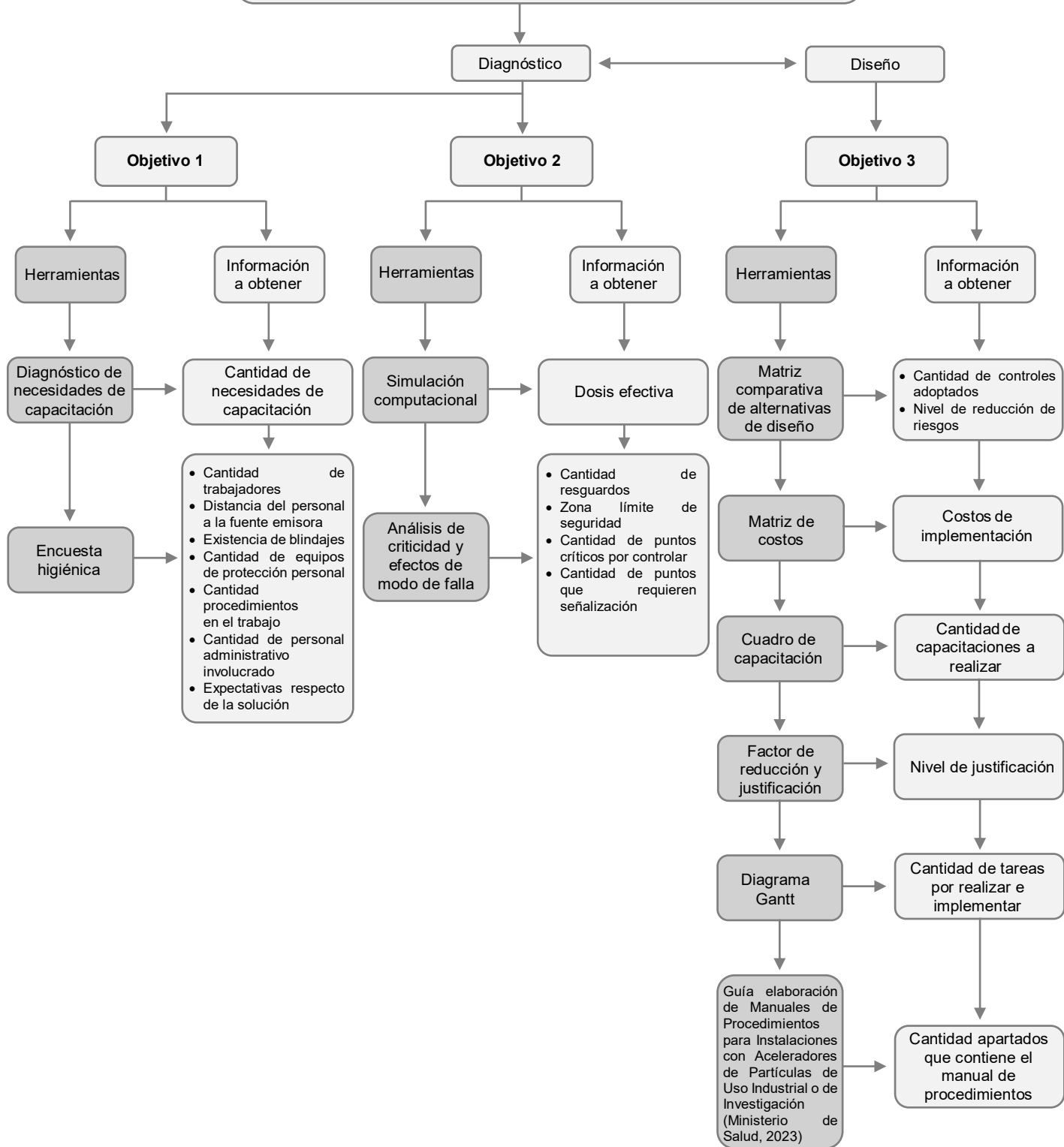


Figura 2. Diagrama del plan de análisis

4. Análisis de la situación actual

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de las herramientas de análisis utilizadas para evaluar la situación actual. A través de estas herramientas, se lograron identificar las principales deficiencias y puntos de mejora, lo que proporciona una base sólida para diseñar las posibles soluciones.

4.1. Encuesta higiénica

Para evaluar la preparación del laboratorio en la incorporación de un generador de radiaciones ionizantes, se aplicó la encuesta higiénica (ver **Apéndice 6.**) dirigida al coordinador del proyecto.

Datos generales

El cuestionario fue respondido por Francisco Javier Núñez Murillo, quien desempeña el rol de coordinador del proyecto FUSOR-CR y cuenta con más de un año de experiencia en este puesto, lo cual le otorga una perspectiva sólida sobre las condiciones operativas del laboratorio. Según su percepción, el laboratorio aún se encuentra en proceso de adecuación para incorporar un generador de radiaciones ionizantes, lo que evidencia la existencia de labores pendientes en materia de infraestructura y condiciones técnicas. Asimismo, se indica que actualmente no se dispone de un espacio específico para la operación segura del generador, lo que representa una limitación importante desde el punto de vista de la seguridad radiológica. También se identifica una falta de claridad respecto a las normativas nacionales aplicables, lo cual sugiere la necesidad de fortalecer la capacitación del personal en aspectos regulatorios y de asegurar el cumplimiento normativo antes de iniciar la operación del equipo. Finalmente, se indica que el proyecto está conformado por 6 personas, lo que permite establecer una población definida y limitada para implementar acciones correctivas y planes de capacitación de forma integral.

Capacitación y Conocimiento del Personal

Los resultados obtenidos reflejan una situación crítica en cuanto al nivel de preparación del personal del laboratorio en materia de protección radiológica. El coordinador del proyecto indica que ningún integrante ha recibido capacitación formal en protección radiológica ni ha sido entrenado específicamente en el manejo de generadores de radiaciones ionizantes, lo cual representa un riesgo significativo frente a la futura operación del FUSOR-CR. Además, se reporta la ausencia de procedimientos establecidos de seguridad radiológica, lo que compromete la aplicación de prácticas estandarizadas para la protección del personal antes, durante y después del uso del equipo. También se evidencia un desconocimiento generalizado sobre el uso adecuado de los equipos de protección personal (EPP), incluyendo delantales de plomo, gafas, guantes y dosímetros. Esta falta de familiaridad con elementos esenciales de protección sugiere la necesidad de implementar un plan de formación integral y de establecer protocolos formales que garanticen un entorno seguro conforme a los requisitos normativos vigentes.

Infraestructura y Equipos de Seguridad

La evaluación de la infraestructura y los equipos de seguridad revela que, aunque se contempla la implementación de ciertas medidas preventivas, actualmente existen importantes carencias en la preparación del laboratorio. Se tiene previsto ubicar el generador de radiaciones ionizantes en una zona señalizada y restringida al acceso del personal autorizado, lo cual es una práctica adecuada conforme a la normativa vigente. Asimismo, se indica que el equipo contará con sistemas de seguridad como interbloques y apagado automático, y que se realizarán mediciones periódicas de radiación en las zonas adyacentes, lo cual fortalece el control operativo y la capacidad de respuesta ante emergencias. No obstante, se identifica la ausencia de barreras físicas de contención (muros, biombos u otras estructuras), lo que podría comprometer la protección pasiva del entorno inmediato. Además, el laboratorio no dispone aún de dispositivos de monitoreo ambiental, como dosímetros de área o detectores de radiación,

elementos esenciales para una vigilancia radiológica continua. Estas limitaciones deben ser atendidas con prioridad para asegurar que el entorno cumpla con los requisitos mínimos de seguridad para la operación del FUSOR-CR.

Procedimientos y Protocolos

Los resultados obtenidos en esta sección reflejan una preparación parcial en cuanto a la gestión operativa y de emergencias asociadas al uso del generador de radiaciones ionizantes. Si bien se prevé la implementación de un plan de mantenimiento preventivo y se contempla la verificación periódica del equipo de protección personal (EPP), aún no existen protocolos específicos para el manejo de emergencias ni se han realizado simulacros que permitan entrenar al personal en situaciones de exposición accidental. Esta ausencia representa una debilidad significativa en la capacidad de respuesta ante incidentes radiológicos y puede comprometer la seguridad del equipo de trabajo. Por otro lado, se reporta un conocimiento claro de los parámetros técnicos de operación del generador (presión entre 10^{-6} y 10^{-3} Torr, voltaje de hasta 60 kV y corriente máxima de 0,5 mA), lo cual es un aspecto positivo, ya que permite establecer límites operativos seguros. En cuanto al tiempo de uso previsto, no se ha definido una carga operativa fija, pero se estima un rango entre una y ocho horas mensuales, dependiendo de los requerimientos experimentales. Esta información será útil para planificar las estrategias de monitoreo y establecer controles proporcionales a la frecuencia de operación del FUSOR-CR.

Recomendaciones

Las respuestas en esta sección revelan una visión integral por parte del coordinador del proyecto en cuanto a los aspectos clave que deben ser abordados antes de poner en operación el generador de radiaciones ionizantes. Se identifican cuatro áreas prioritarias: la formación y capacitación del personal, la mejora de la infraestructura y barreras de seguridad, la adquisición e implementación de equipos de monitoreo y protección

radiológica, y el establecimiento de procedimientos adecuados para el manejo de emergencias y riesgos. Esta priorización evidencia una comprensión clara de los pilares fundamentales de la protección radiológica. Además, la sugerencia de realizar revisiones periódicas por parte de un ente competente para evaluar las competencias del equipo y la calidad de los equipos de protección y monitoreo, así como la actualización de los procedimientos de emergencia, resulta pertinente y alineada con las buenas prácticas recomendadas por organismos internacionales como el OIEA. Estas observaciones permiten fortalecer la estrategia de seguridad radiológica del proyecto, promoviendo un enfoque preventivo y sistemático en el desarrollo de las actividades del FUSOR-CR.

4.2. Análisis de modos de falla y efectos

A partir de esta herramienta se evaluó el proceso general de operación del fusor. Se analizaron 18 modos de falla, identificando sus causas, efectos y niveles de riesgo en función de la Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detección (D). A continuación, se describe el proceso de operación que consiste en los siguientes pasos:

- 1) **Establecer vacío:** Se debe alcanzar un nivel de vacío base de al menos 10^{-4} torr. A menor presión, mejor. Este paso presupone que no existen fugas de vacío significativas al desconectar la válvula del sistema de bombeo. Proceda a reducir progresivamente la velocidad de la válvula de vacío de la cámara hasta que la bomba turbo sea capaz de mantener únicamente este nivel mínimo de vacío.
- 2) **Establecimiento del potencial interno:** Se aumenta gradualmente la tensión de la fuente de alimentación de alto voltaje, con corriente limitada, conectada al fusor, hasta alcanzar el valor deseado (por ejemplo, 10 kV para comenzar). En este punto, no se generará plasma, o debería evitarse que lo haga.
- 3) **Inyección de gas:** Se introduce de manera cuidadosa y progresiva el gas deuterio, incrementando su flujo de forma muy lenta. A medida que la presión del gas aumente, se iniciará la descarga. Mantenga atención para reducir el voltaje en caso de que la corriente aumente demasiado rápidamente o de forma excesiva.

- 4) **Control de condiciones de fusión:** En esta fase, el proceso de fusión será supervisado por el operador, quien deberá equilibrar de manera precisa las tres variables clave: voltaje, presión y corriente. El operador debe ajustar estos parámetros de forma dinámica para mantener las condiciones óptimas de fusión.
- 5) **Procedimiento de apagado:** Para proceder con el apagado del equipo, primero debe cesar la inyección de gas. Posteriormente, se reduce gradualmente el voltaje de la fuente de alto voltaje hasta que se apague la descarga. A continuación, se detiene la bomba turbo y, finalmente, se apaga la bomba mecánica.

Conforme se menciona en la **Tabla 4**, a partir de estos datos se logró determinar cuáles son los factores que contribuyen de manera más significativa al riesgo en la operación del reactor.

Tabla 4. Clasificación de modos de falla en la operación del FUSOR-CR

Paso	Modo potencial de falla	Ocurrencia inicial	Severidad inicial	Detección inicial	RPN inicial
Control de condiciones de fusión	Desajuste entre voltaje, corriente y presión	9	7	8	504
	Inestabilidad del plasma	7	7	5	245
	Inestabilidad en la presión de la cámara	5	7	6	210
	Sobrecarga de corriente	7	8	7	392
Establecer vacío	Fallos en válvulas de control	5	7	7	245
	Fugas de aire	8	6	7	336

Paso	Modo potencial de falla	Ocurrencia inicial	Severidad inicial	Detección inicial	RPN inicial
	Mal funcionamiento de alguna bomba	6	9	4	216
	Obstrucción de en una bomba	5	7	7	245
	Sobrecarga de la bomba de vacío	4	8	7	224
Establecimiento del potencial interno	Arcos eléctricos entre el electrodo y la cámara de vacío	6	7	2	84
	Ionización prematura	6	7	2	84
	Sobrecalentamiento de los componentes eléctricos	4	8	9	288
Inyección de gas	Daño a la fuente de alimentación por aumento rápido de la corriente	7	9	8	504
	Inyección de gas no homogénea	6	6	5	180
	Inyección excesiva de gas	8	8	7	448
Procedimiento de apagado	Apagado no secuencial del sistema de vacío	5	10	5	250
	No detener la inyección de gas	5	9	5	225
	No reducción de voltaje de la fuente de alta tensión	5	9	5	225

El 38 % del RPN está concentrado en cinco modos de falla como se observa en la **Figura 3**. El primer modo corresponde al daño de la fuente de potencial debido a un transitorio de corriente, considerado crítico, ya que este componente es esencial para el funcionamiento del reactor. Su deterioro implicaría no solo el detenimiento del proceso de fusión, sino también reparaciones costosas y un prolongado tiempo de inactividad. Otro modo relevante son los desajustes en la tensión, presión y corriente, los cuales podrían comprometer la estabilidad del plasma y afectar el funcionamiento general del reactor. Además, un desbalance sostenido podría elevar inesperadamente la temperatura del electrodo, provocando fallos adicionales en el sistema.

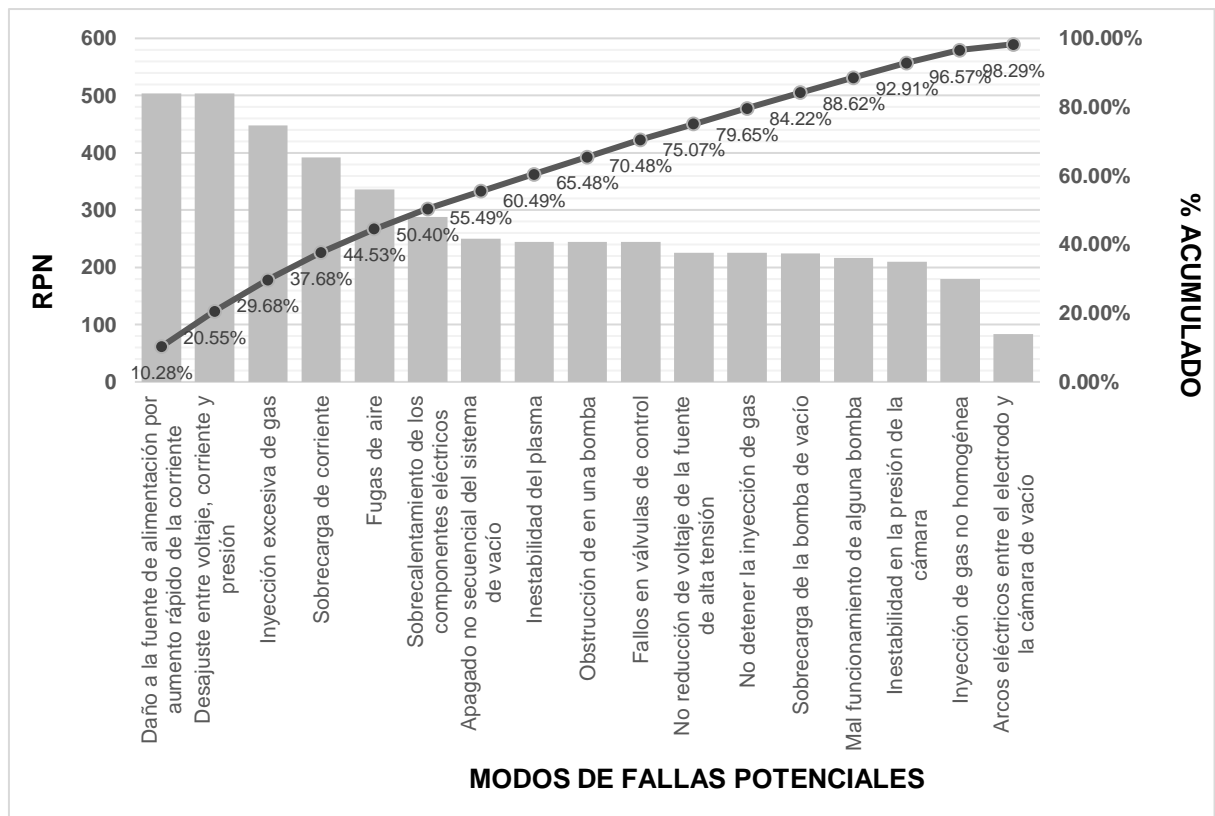


Figura 3. Priorización de modos de fallo mediante Diagrama de Pareto (FMEA)

Asimismo, se identificaron otros modos de falla relevantes. Por ejemplo, la inyección excesiva de gas puede comprometer la estabilidad del plasma y reducir la eficiencia del proceso, mientras que un aumento de presión no controlado podría generar daños en componentes críticos como la bomba turbo molecular o la fuente de poder. Las fugas de aire, por su parte, constituyen fallos comunes en procesos de fusión: afectan la pureza del plasma y suelen requerir inspecciones minuciosas para ser detectadas. Finalmente, las sobrecargas de corriente representan un riesgo considerable, ya que pueden ocasionar el sobrecalentamiento y la falla prematura de componentes eléctricos, forzando la interrupción del sistema.

El análisis de los modos de falla más críticos en la operación del FUSOR-CR revela una tendencia común hacia deficiencias en el control automático, errores en el monitoreo en tiempo de los parámetros de operación y los errores en la configuración inicial de parámetros operativos. El daño a la fuente de alimentación por un aumento rápido de la corriente puede estar directamente relacionado con una inyección de gas demasiado acelerada, lo cual induce un cambio brusco en la impedancia del sistema. Esta situación se ve agravada por la falta de límites de corriente y voltaje preestablecidos en el sistema de control, así como por la ausencia de mecanismos de protección ante transitorios eléctricos. De forma complementaria, el desajuste entre voltaje, corriente y presión se origina frecuentemente en la intervención humana, particularmente por una configuración incorrecta por parte del operador, además de una respuesta deficiente del sistema de control automático y la carencia de monitoreo constante. Las fugas de aire, aunque de naturaleza mecánica, representan un modo de falla común en cámaras de vacío y suelen derivarse de juntas desgastadas, sellos defectuosos o errores en el ensamblaje del sistema, comprometiendo la calidad del plasma. En el caso de la inyección excesiva de gas, las causas se asocian a errores humanos en la apertura de válvulas o en la programación del flujo, así como a fallos en los sistemas de medición o regulación de presión. Por último, la sobrecarga de corriente refleja un problema multifactorial, en el que intervienen tanto desequilibrios entre presión y voltaje, como una programación inadecuada y una reacción tardía del sistema de control ante variaciones abruptas. Estos hallazgos indican la necesidad de mejorar los sistemas de control automático, reforzar la

capacitación operativa y establecer protocolos de respuesta rápida ante desviaciones en los parámetros críticos del reactor.

Lo anterior resalta la necesidad de implementar medidas de control que mitiguen los posibles fallos del equipo, por lo tanto, las medidas propuestas se detallan en el **Apéndice 7**. A continuación, se resumen las medidas propuestas para los modos de fallo prioritarios

Modo de fallo	Acciones recomendadas
Daño a la fuente de alimentación por aumento rápido de la corriente	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer límites automáticos de corriente que permitan reducir el voltaje si la corriente aumenta demasiado rápido. • Monitorear la corriente de forma continua durante todo el proceso de inyección de gas. • Implementar un sistema de protección en la fuente de alimentación que se active en caso de aumento excesivo de corriente.
Desajuste entre voltaje, corriente y presión	<ul style="list-style-type: none"> • Capacitar al personal para que adquiera la habilidad de equilibrar correctamente voltaje, corriente y presión de forma continua. • Implementar un sistema de monitoreo constante que mida las tres variables y alerte sobre cualquier desajuste. • Utilizar sistemas de control automático para regular las variables de acuerdo con las necesidades del proceso. • Realizar ajustes pequeños e incrementales en las tres variables en lugar de cambios bruscos.
Inyección excesiva de gas	<ul style="list-style-type: none"> • Instalar reguladores de flujo de gas precisos para asegurar que la inyección sea lenta y controlada. • Monitorear en tiempo real la presión y el flujo del gas con sensores de alta precisión.

Modo de fallo	Acciones recomendadas
	<ul style="list-style-type: none"> • Capacitar al personal en la regulación precisa del flujo de gas y en los procedimientos adecuados. • Implementar alarmas de presión para alertar al operador si la presión excede los niveles seguros.
Sobrecarga de corriente	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer límites de corriente automáticos que reduzcan el voltaje si la corriente se incrementa demasiado. • Monitorear la corriente constantemente con sensores para detectar aumentos repentinos. • Ajustar el voltaje y la presión de manera gradual para evitar picos de corriente. • Implementar sistemas de protección que desconecten el sistema si la corriente excede el límite máximo preestablecido.
Fugas de aire	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazar o mejorar los sellos y juntas de la cámara con materiales de mayor durabilidad y resistencia. • Asegurar un adecuado mantenimiento de los componentes críticos (válvulas, conexiones, etc.). • Capacitar al personal en la correcta instalación y manejo de las juntas y válvulas.

4.3. Diagnóstico de necesidades de capacitación

Para determinar las deficiencias principales en cuanto a los conocimientos técnicos y habilidades blandas se aplicó el diagnóstico de necesidades de capacitación (ver **Apéndice 3.**), con los temas recomendados del programa estándar del curso de postgrado educativo en protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación de la IAEA para trabajadores expuestos. Según se observa en la **Figura 4** los puntajes del DNC fluctuaron entre 1,0 a 4,7 con un promedio de $2,0 \pm 1,0$ además el 50 % de los datos están por debajo del 1,6. Esto indica que la mayoría de los participantes presenta

un nivel de dominio muy bajo respecto a los contenidos evaluados, reflejando una alta necesidad de capacitación en los temas fundamentales de protección radiológica.

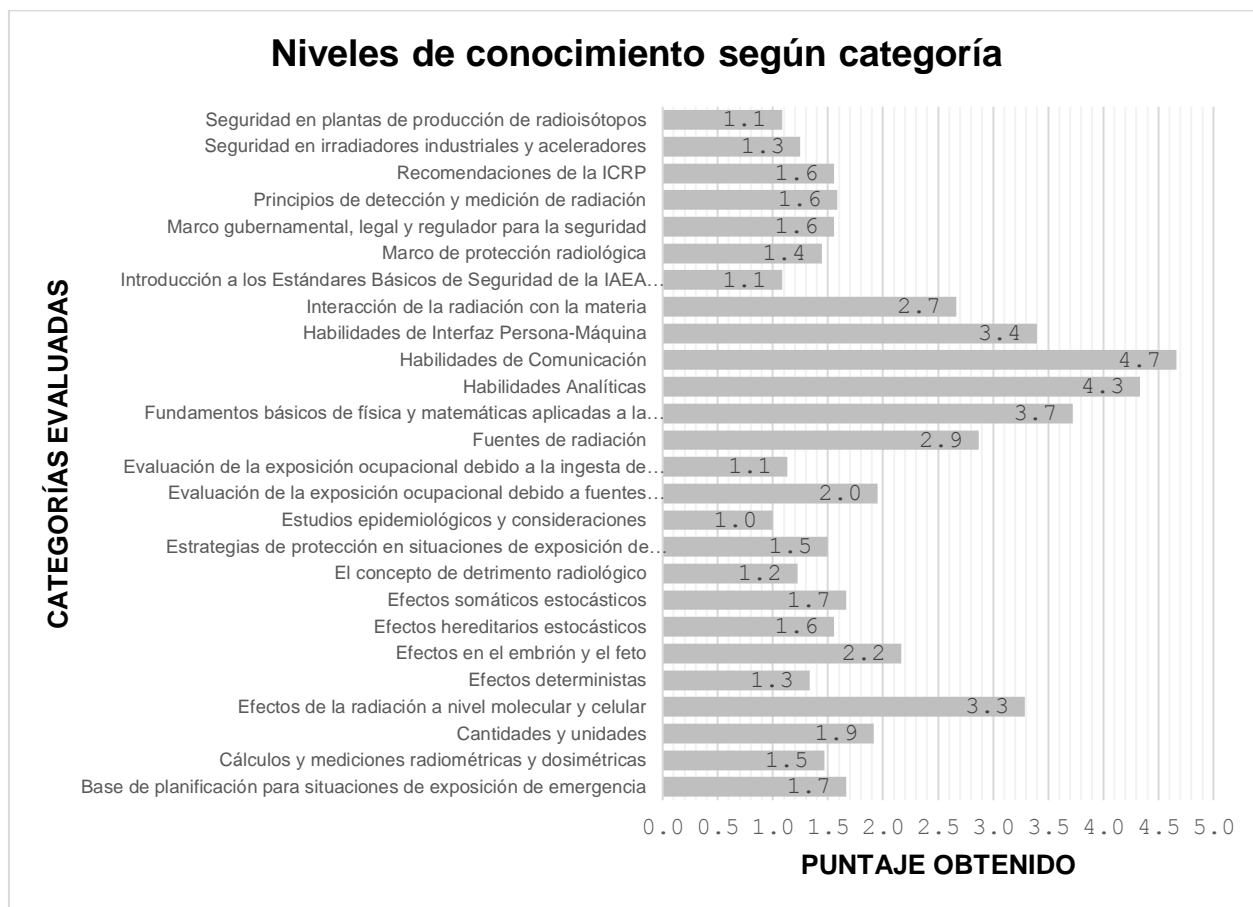


Figura 4. Distribución de nivel de conocimiento en temas de protección radiológica

En particular, lo anterior evidencia que el personal posee conocimientos limitados sobre diversos temas relevantes para el trabajo seguro con fuentes de radiaciones ionizantes principalmente en aquellos relacionados a la aplicación práctica de los principios de protección radiológica y seguridad ocupacional, en particular el resultado estrategias de protección en situaciones de exposición de emergencia (1,5) se considera crítico debido a que todo el personal del laboratorio debe estar preparado para manejar escenarios de exposición accidental.

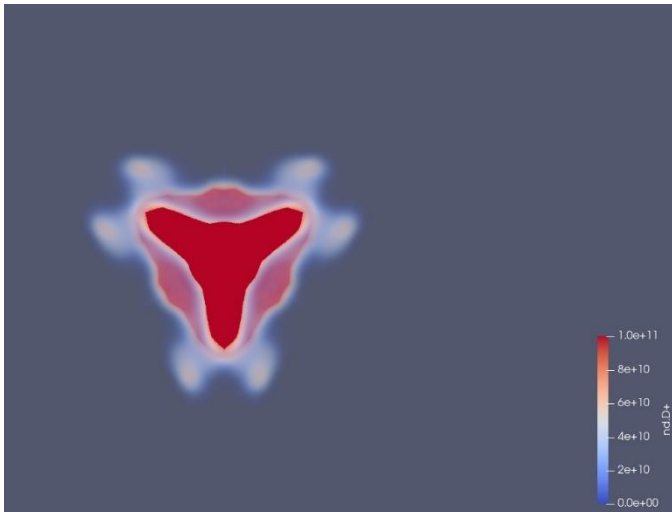
Del mismo modo, los resultados obtenidos en la categoría de evaluación de la exposición ocupacional (1,1; 2,0) evidencian la necesidad de entrenar al personal en monitoreo de dosis y gestión de riesgos. Por otro lado, se puede observar en la **Tabla 5** que aquellas áreas relacionadas con habilidades blandas (habilidades analíticas, habilidades de comunicación y habilidades de interfaz persona-máquina) fueron de los mejores resultados junto con los fundamentos de física y matemática. El desempeño en estas áreas no técnicas resalta el potencial del personal para adaptarse y aprender en contextos de alta complejidad, lo que, si se complementa con una formación adecuada en temas técnicos, podría resultar en una mejora significativa en la reducción de exposición ocupacional a radiaciones ionizantes, el fortalecimiento de las prácticas de seguridad y en la creación de un entorno laboral más seguro y eficiente.

Tabla 5. Categorías con mejor desempeño en el DNC.

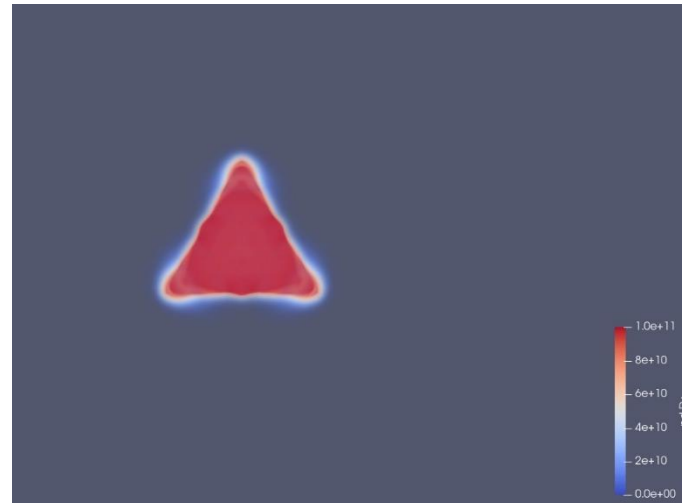
Categoría	Promedio de Nivel de conocimiento
Fundamentos básicos de física y matemáticas aplicadas a la protección radiológica	3,7
Habilidades Analíticas	4,3
Habilidades de Comunicación	4,7
Habilidades de Interfaz Persona-Máquina	3,4

4.4. Simulación

Un reactor de confinamiento inercial electrostático opera mediante la aceleración de iones dentro de un potencial electrostático típicamente entre una o más rejillas (electrodos) y la cámara de vacío. Como se puede ver en la **Figura 5**, debido a la geometría del campo eléctrico y las interacciones entre partículas, los iones pueden oscilar a través del centro en trayectorias repetitivas, experimentando múltiples colisiones antes de disipar su energía (Miley & Murali, 2014). La simulación computacional permite visualizar la densidad de iones en diferentes momentos del proceso, lo que permite identificar zonas donde se forman acumulaciones de partículas (zonas de color rojo). Estas regiones son los puntos principales para la generación de reacciones de fusión. Cuando los iones alcanzan energías suficientemente altas y colisionan, pueden superar la barrera de Coulomb y fusionarse, dando lugar a la generación de neutrones. De esta manera se logró obtener la tasa de generación de neutrones con las condiciones de operación propuestas por el coordinador, la cual corresponde a $2,7 \times 10^7 \frac{\text{neutrones}}{\text{s}}$, con aproximadamente $18,9 \times 10^6 \frac{\text{neutrones}}{\text{s}}$ a 2,45 MeV y $8,1 \times 10^6 \frac{\text{neutrones}}{\text{s}}$ a 14,1 MeV.



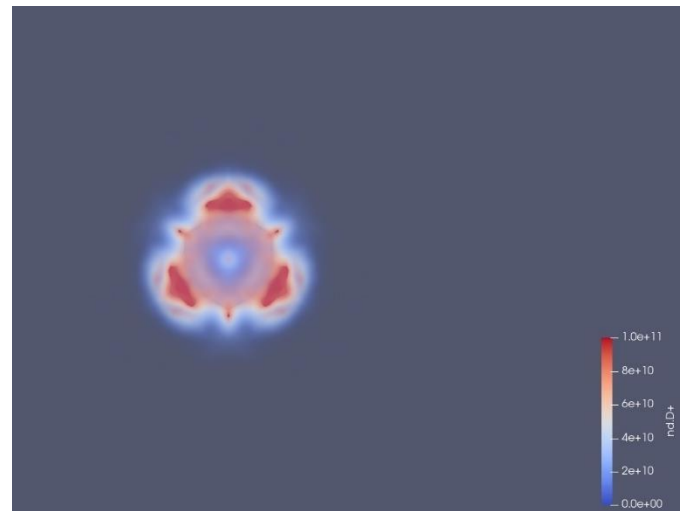
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5. Evolución del plasma en (a) 2,2 ns (b) 4,2 ns (c) 6,2 ns y (d) 8,2 ns

Para estimar la dosis efectiva que recibe un trabajador expuesto a la radiación de neutrones emitida por el FUSOR-CR se construyó un fantasma cilíndrico con un equivalente tisular humano, específicamente se utilizó el modelo MS20 del PNNL, comúnmente utilizado en simulaciones de protección radiológica. Este material está compuesto por los elementos oxígeno, carbono, hidrógeno, nitrógeno, magnesio y cloro cuyas proporciones se pueden observar en la **Tabla 6**, estas imitan la composición elemental promedio del cuerpo humano y se definió con una densidad de 1 g/cm³.

Tabla 6. Composición molecular del fantoma de simulación

Elemento	Proporción %
Oxígeno	7,9013
Carbono	32,948
Hidrógeno	54,6359
Nitrógeno	0,8619
Magnesio	3,6358
Cloro	0,0172

En cuanto al modelo geométrico este consiste en el fantasma cilíndrico que representa a un ser humano promedio, con una altura de 169.75 cm y un radio de 10.782 cm, dimensiones que corresponden a un volumen de aproximadamente 62,000 cm³, equivalente al volumen corporal humano. El fantoma se ubica a distintas distancias de la fuente de neutrones, desde 100 cm hasta 500 cm en incrementos de 10 cm. La fuente se sitúa en el origen del sistema de coordenadas, y se asume un entorno vacío exterior mediante una esfera de contención con condiciones de frontera de tipo vacío, lo que asegura que los neutrones que abandonan el sistema no vuelven a interactuar.

Para calcular la dosis absorbida, se utilizó un recuento (*tally*) de flujo de neutrones ponderado por coeficientes de dosis, siguiendo las recomendaciones del ICRP para la geometría "anteroposterior" (AP). Estos coeficientes se aplicaron mediante un la función un filtro de función de energía (*EnergyFunctionFilter*) con interpolación cúbica la cual multiplica el espectro de energías de las partículas por el coeficiente de dosis efectivo, lo que permite convertir el flujo de neutrones en dosis efectiva. La dosis se calculó en unidades de $\mu\text{Sv} \cdot \text{cm}^3/\text{neutrón}$ y posteriormente se escaló teniendo en cuenta la tasa de emisión de neutrones obtenida en la simulación del plasma. Finalmente, se proyectó el resultado obtenido a mSv/año multiplicándolo por la cantidad de tiempo de operación anual. Esta dosis se calculó para cada distancia simulada, y los resultados se compararon con el límite anual de 20 mSv para trabajadores expuestos, generando una gráfica de dosis en función de la distancia.

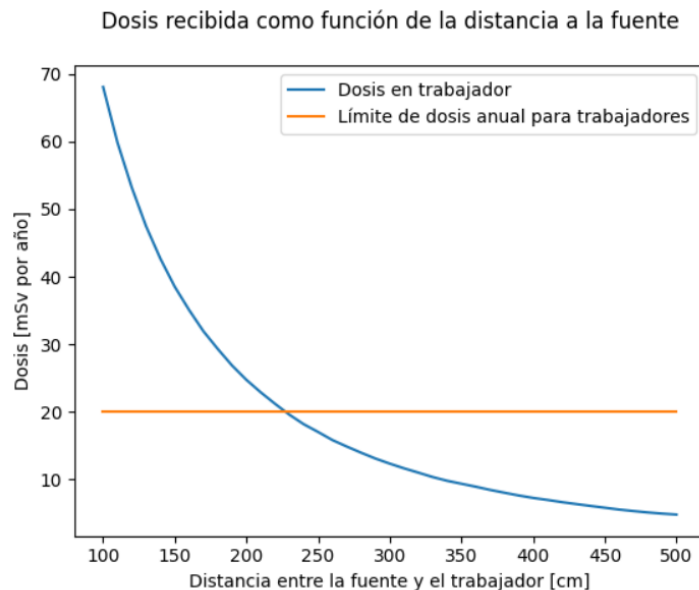


Figura 6. Dosis efectiva debido a las radiaciones ionizantes del FUSOR-CR

Los resultados obtenidos se resumen en la **Figura 6** donde se observa claramente que, a distancias inferiores a aproximadamente 250 cm de la fuente de neutrones, la dosis anual recibida por los trabajadores excede los límites máximos permitidos por la legislación nacional vigente. Este hecho representa un riesgo significativo para la salud

ocupacional. Además, incluso a distancias mayores, por ejemplo, a 400 cm la dosis anual acumulada continúa siendo considerablemente alta, alcanzando valores superiores a los 7 mSv/año. A continuación, en la **Figura 7** se puede visualizar una representación tridimensional los resultados mencionados anteriormente.

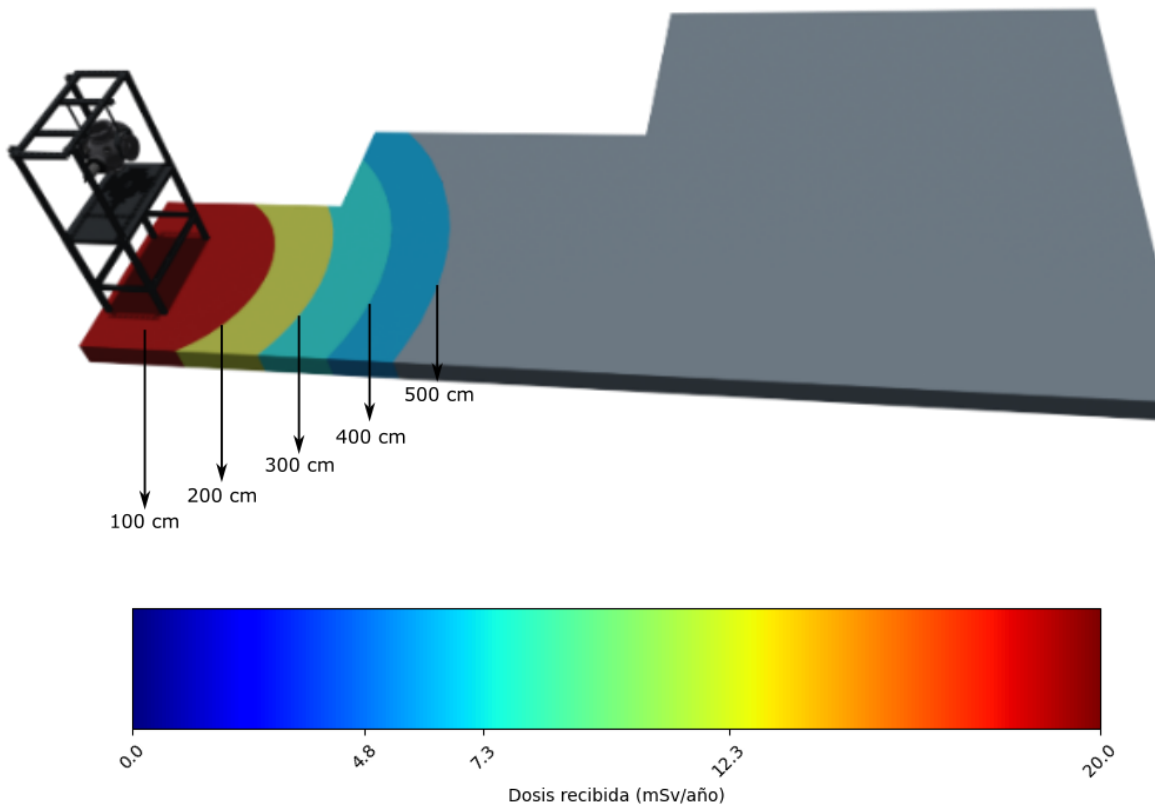


Figura 7. Perfil de dosis tridimensional según la distancia al reactor

4.5. Conclusiones

- Se concluye que el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones actualmente no cuenta con los equipos necesarios para la dosimetría ni con mecanismos adecuados para el control de la exposición ocupacional a radiaciones ionizantes, lo que limita su capacidad para gestionar adecuadamente los riesgos radiológicos.
- Se identificó una ausencia de señalización preventiva en el área de operación del FUSOR-CR, lo cual dificulta la comunicación efectiva de los peligros presentes, incumpliendo con principios básicos de protección radiológica.
- Se determinó que el personal ocupacionalmente expuesto no ha recibido capacitación formal en protección radiológica ni posee licencia para operar equipos emisores de radiaciones ionizantes, lo que representa una condición crítica de incumplimiento con lo estipulado por el Ministerio de Salud de Costa Rica en materia de seguridad radiológica.
- También se evidenció la falta de procedimientos definidos para el mantenimiento del FUSOR-CR, lo que podría derivar en fallos operativos que incrementen los riesgos para la salud y la seguridad del personal.
- Los resultados obtenidos a partir de la simulación computacional evidencian una disminución significativa en la dosis de radiación recibida conforme aumenta la distancia respecto al fusor. A continuación, se presentan los valores registrados:

Tabla 7. Resultados de simulación

Distancia (m)	Dosis de Radiación (mSv/año)
1	68,07
2	24,73
3	12,33
4	7,26
5	4,80

Estos resultados reflejan que, en ausencia de blindaje, incluso a distancias consideradas moderadas, las dosis superan los límites anuales recomendados para exposición ocupacional, representando un riesgo considerable para la salud de los colaboradores. En este contexto, la falta de protectores de barrera expone a los trabajadores a un riesgo significativo, poniendo en peligro su salud y bienestar.

- Estos resultados confirman la necesidad de implementar controles ingenieriles, como blindajes y delimitación de áreas, así como de establecer tiempos de exposición controlados, para garantizar que las dosis recibidas se mantengan dentro de los márgenes permitidos por la normativa nacional e internacional.

4.6. Recomendaciones

- Es necesario implementar un plan de capacitación para el trabajo seguro con generadores de radiaciones ionizantes, ya que las actividades que se desean desarrollar son catalogadas como peligrosas y es importante que los colaboradores comprendan la gravedad de los peligros a los que están expuestos y lo que deben hacer para llevar a cabo de manera segura los experimentos en el laboratorio.

- Es necesario adquirir equipos de monitoreo de radiación personal y ambiente ya que es esencial detectar, medir y controlar la radiación en el laboratorio. Estas herramientas son fundamentales para la protección de los trabajadores ya que permiten determinar la exposición en tiempo real, permitiendo evitar situaciones de exposición accidental y tomar decisiones rápidas para mitigar los riesgos.
- Se recomienda que el laboratorio implemente un sistema de señalización integral que abarque diversos aspectos de seguridad. Este sistema debe considerar la ubicación del reactor, incorporar elementos físicos para evitar el acceso de personal no autorizado, incluir dispositivos de alarma, y contar con una adecuada rotulación que indique tanto el equipo de protección personal necesario como las áreas con posibles riesgos de exposición a radiaciones ionizantes.
- El laboratorio debe atender a los modos de fallo críticos mediante la implementación de controles ingenieriles y administrativos como la adquisición de limitadores de corriente para la fuente de poder, sensores de intensidad de corriente para monitorear en tiempo real esta variable y supresores de transitorios para controlar los incrementos súbitos de la corriente. Además de lo anterior, se deberá capacitar al personal para el uso correcto de los equipos y el control adecuado de las variables del proceso.

5. Propuestas de solución

A continuación, se presentan y detallan las distintas propuestas de controles administrativos e ingenieriles que se consideran necesarios para reducir al máximo la exposición de los trabajadores a radiaciones ionizantes.

5.1. Monitoreo

Con el fin de garantizar que los niveles de exposición ocupacional anuales se encuentran dentro de los rangos establecidos por el reglamento 24037-S surge la necesidad de implementar un sistema de dosimetría personal para el control y registro de las dosis recibidas por el personal ocupacionalmente expuesto.



Figura 8. Dosímetro personal Genesis Ultra TLD-BP.

Se recomienda la adquisición de dosímetros personales Genesis Ultra TLD-BP (ver **Figura 8**) para cada uno de los trabajadores que se encuentren en proximidad al FUSOR-CR. Los dosímetros se deberán entregar previo al inicio de cada operación y deberán ser devueltos al finalizar, permitiendo llevar un registro sistemático de la exposición acumulada. Se sugiere este dispositivo ya que este modelo está diseñado para medir no sólo la radiación de neutrones, sino también la radiación de rayos X, beta y gamma, lo que lo convierte en una herramienta versátil para la monitorización de la radiación.

Su diseño ligero de dos piezas ayuda a reducir el tiempo de procesamiento y los costes de envío, mientras que su blíster de plástico está fabricado con materiales 99 % reciclables, lo que contribuye a la sostenibilidad ambiental y a la reducción de la huella de carbono.

Además de su diseño robusto, el dosímetro ofrece varias características y ventajas importantes. Incluye factores de corrección de elementos únicos, lo que le permite informar con precisión dosis profundas, en el cristalino y superficiales. El dosímetro tiene una dosis mínima reportable (DMR) impresionantemente baja de 1 mrem (0,01 mSv), muy inferior a la DMR de 10 mrem (0,10 mSv) que se encuentra en muchos otros productos TLD. Cada dosímetro cuenta con un número de serie único, lo que facilita su identificación y seguimiento.

5.2. Señalización

En concordancia con el artículo 65 del Reglamento sobre Protección Contra las Radiaciones Ionizantes (Decreto Ejecutivo 24037-S), el cual establece que toda zona vigilada debe estar claramente señalizada, se propone un sistema holístico de señalización para garantizar la seguridad del personal y visitantes en el entorno del FUSOR-CR. Esta señalización incluye rótulos, luces estroboscópicas de advertencia y barreras físicas, todos orientados a comunicar efectivamente la presencia de riesgos radiológicos.

Rótulo de zona vigilada

Se propone la instalación de un rótulo de advertencia de zona vigilada, conforme al diseño mostrado en la **Figura 9**. Este rótulo contará con las proporciones de 240 mm x 168 mm. El material sugerido es lámina de PVC de 3 mm de espesor, resistente a condiciones ambientales internas.

El fondo del rótulo será de color gris lavanda (código hexadecimal #807c94). Este rótulo será instalado justo antes del inicio de las escaleras del mezanine, en una posición a la altura visual (aproximadamente 1.6 m desde el suelo) que permita su lectura sin obstrucciones.

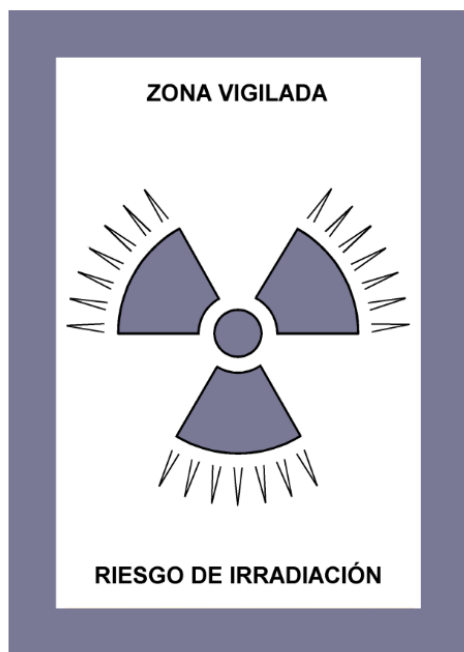


Figura 9. Rótulo para la indicación de zonas vigiladas

Sistema visual de advertencia: luz estroboscópica y rótulo informativo

Con el objetivo de advertir activamente cuando el equipo se encuentre en funcionamiento, se instalarán dos luces estroboscópicas amarillas de alta intensidad, acompañadas de un rótulo informativo que indicando que el fusor se encuentra operativo. Las luces serán de tipo LED estroboscópico de 24 VDC, difusor de policarbonato y una frecuencia de destello de hasta 250 por minuto. El material del rótulo será PVC de 3 mm de espesor, color de fondo amarillo con letras negras como se observa en la **Figura 10**.

La ubicación propuesta para estos elementos es:

- Una luz y rótulo en el descanso de las escaleras del mezanine, visible desde la planta baja.
- Otra luz y rótulo en el mezanine, visible desde el acceso lateral al área del reactor.

Esto garantiza que cualquier persona en proximidad al área de riesgo esté debidamente informada antes de ingresar.



Figura 10. Combo de luz estroboscópica (izquierda) su respectivo rótulo (derecha)

Rótulo de uso obligatorio de dosímetro y delimitación física del área

Adicionalmente, se propone la colocación de un rótulo informativo que indique la obligatoriedad del uso del dosímetro personal, el cual será ubicado en el puesto de trabajo. Este rótulo tendrá un diseño visual tipo obligación (círculo azul con pictograma blanco). El material será de PVC de 3 mm de espesor con dimensiones 240 mm x 168 mm como se muestra en la **Figura 11**.

Junto con esta señal, se instalará una cadena plástica de seguridad color amarillo, sostenida en la baranda del mezanine, para restringir físicamente el acceso al área de operación del FUSOR-CR durante procedimientos activos. Esta delimitación permite un control visual y físico del ingreso, garantizando que solo personal autorizado y debidamente equipado acceda a zonas críticas.



Figura 11. Señalización de uso obligatorio de dosímetro (izquierda) y cadena plástica (derecha)

5.3. Blindaje

En cuanto a los controles para reducir la intensidad de radiación liberada por el fusor, se propone la construcción de un encerramiento completo de la cámara de vacío (parte del fusor donde se genera la radiación ionizante), a continuación, se considerarán tres materiales distintos para determinar cuál es el más adecuado para el blindaje. Para evaluar la efectividad de atenuación se utilizará la ley de atenuación exponencial:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu x)$$

Donde:

I = Intensidad del haz de partículas a una profundidad x del material $\left(\frac{mSv}{h}\right)$

I_0 = Intensidad inicial del haz de partículas $\left(\frac{mSv}{h}\right)$

μ = Coeficiente de atenuación lineal del material $\left(\frac{1}{cm}\right)$

x = Grosor del material de blindaje (cm)

Para el diseño de la barrera es conveniente despejar de esta ecuación el grosor del blindaje y evaluar la función en $I = n \cdot I_0$ donde n representa porcentaje de intensidad deseada al atravesar la barrera. Lo anterior se puede observar en la siguiente ecuación:

$$x = \frac{1}{\mu} \log\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

$$\Rightarrow x = \frac{1}{\mu} \log\left(\frac{I_0}{n \cdot I_0}\right)$$

$$\Rightarrow x = \frac{1}{\mu} \log\left(\frac{1}{n}\right)$$

Para el presente proyecto se considerará una reducción del 90% de la radiación valor también conocido como “capa de valor décimo”, esto implica el siguiente requerimiento para el grosor del blindaje:

$$x = \frac{1}{\mu} \log\left(\frac{1}{0,1}\right) \approx \frac{2,30}{\mu}$$

En la siguiente tabla se presentan los cálculos obtenidos para tres materiales distintos:

Tabla 8. Grosor de blindaje requerido para varios materiales

Propuesta	Material	Coefficiente de atenuación lineal (μ)	Grosor del blindaje (x)
Número 1	Hormigón de barita	0.101	22,80
Número 2	Poliimida dopada con 7wt% h-BN y 3wt% Gd ₂ O ₃	0,29	7,99
Número 3	Poliimida dopada con 11wt% h-BN y 3wt% Gd ₂ O ₃	0,4	5,76

Para la selección del material más adecuado para la construcción del blindaje del FUSOR-CR se realizó una evaluación comparativa entre tres propuestas. Esta evaluación se llevó a cabo utilizando una matriz de decisión multicriterio, donde cada alternativa fue calificada según seis criterios clave: salud y seguridad, impacto ambiental, costo económico, cumplimiento normativo, aceptación sociocultural y viabilidad técnica.

Cada criterio fue valorado en una escala de 1 (bajo) a 3 (alto desempeño), y se asignó un puntaje total por propuesta. La matriz resultante se presenta a continuación:

Tabla 9. Matriz de comparación de alternativas para el blindaje del fusor

Propuesta	Salud y seguridad	Impacto ambiental	Económico	Normativo	Socio-cultural	Viabilidad técnica	Total
Número 1	3	3	3	3	3	1	16
Número 2	3	3	2	3	2	3	16
Número 3	3	3	1	3	2	3	15

A continuación, se presenta la justificación de los valores asignados:

- **Seguridad y salud**

Las tres alternativas fueron diseñadas siguiendo los mismos criterios de salud y seguridad laboral, por lo que mantienen el mismo desempeño en este aspecto.

- **Hormigón de barita:** Material inerte y no tóxico, ampliamente utilizado en entornos hospitalarios y nucleares. Riesgo mínimo para los trabajadores.
- **Poliimida dopada (7% h-BN / 3% Gd₂O₃ y 11% h-BN / 3% Gd₂O₃):** Al ser polímeros técnicos, presentan buena estabilidad térmica y química. La manipulación de nanopartículas debe realizarse bajo protocolos controlados para evitar exposición en la etapa de fabricación, sin embargo, una vez fabricado no es peligroso para la salud.

- **Impacto ambiental**

Las tres alternativas presentan un bajo impacto ambiental en condiciones normales de operación.

- **Hormigón de barita:** Alta durabilidad, reciclable parcialmente. Su producción, sin embargo, tiene una huella de carbono moderada debido al uso de cemento.
- **Poliimidias dopadas:** Larga vida útil sin degradación apreciable. Su fabricación implica el uso de procesos más especializados, pero su volumen y masa total son mucho menores.

- **Económico**

El hormigón de barita es significativamente más económico. Las alternativas de poliimida presentan un costo más alto, pero pueden justificarse si se prioriza la eficiencia espacial y tecnológica.

- **Hormigón de barita:** Costo estimado de fabricación e instalación de aproximadamente 150 000 ₡, con materiales disponibles localmente y mano de obra común.
- **Poliimida dopada 7% h-BN / 3% Gd₂O₃:** Costo estimado 550 000 ₡ USD debido al uso de nanomateriales y procesos especializados.
- **Poliimida dopada 11% h-BN / 3% Gd₂O₃:** Ligeramente más costosa (700 000 ₡) que la alternativa anterior, debido a la mayor proporción de h-BN, sin embargo, proporciona un mayor rendimiento.

- **Normativo**

Las tres opciones contemplan con los requisitos del **Reglamento 24037-S** sobre protección contra las radiaciones ionizantes, garantizando límites seguros de exposición. En particular, todas las propuestas fueron diseñadas con el principio de optimización en mente y poseen el mismo rendimiento mediante el ajuste de espesor.

- **Sociocultural**

El hormigón tiene una amplia aceptación en prácticamente todas las culturas y sectores industriales. Su uso en la construcción de infraestructuras críticas lo convierte en un material confiable y bien comprendido. Por otro lado, el uso de un material avanzado como la poliimida dopada puede ser visto de manera positiva en comunidades científicas y tecnológicas, ya que representa un avance hacia soluciones más innovadoras y eficientes. Sin embargo, en sectores menos familiarizados con los avances en polímeros y nanotecnología, puede generar escepticismo, además, las tecnologías emergentes suelen ser percibidas con precaución en particular en contextos más conservadores como la seguridad radiológica.

- **Viabilidad técnica**

Debido a la menor capacidad de atenuación del hormigón, es necesario utilizar un grosor considerable, lo que limita su integración en la estructura del FUSOR-CR. Además, su peso elevado restringe las opciones de ubicación del equipo. En contraste, el blindaje de poliimida, al ser mucho más ligero y delgado, ofrece una mayor flexibilidad en términos de diseño y ubicación, permitiendo una integración más eficiente.

5.4. Selección de la alternativa de solución

A partir de los resultados obtenidos en la evaluación, tanto el hormigón como la poliimida dopada con 7wt% h-BN y 3wt% Gd₂O₃ alcanzaron un puntaje igual de 16 puntos, lo que establece un empate entre ambas opciones. Sin embargo, a pesar de que ambos materiales presentan un desempeño similar en términos de atenuación y propiedades funcionales, la decisión final se inclina a favor de la poliimida. Esto se debe a que, al considerar el criterio de viabilidad, la poliimida ofrece ventajas significativas en términos de su mayor ligereza, mayor flexibilidad de diseño y facilidad de integración en la estructura del FUSOR-CR. Además, su menor peso y mayor flexibilidad permiten un diseño más compacto y manejable, lo que facilita el trabajo de los operadores, reduciendo la carga física y mejorando la comodidad durante el uso del equipo.

5.5. Propuesta de diseño

En función de los riesgos radiológicos evaluados durante la operación del FUSOR-CR, se propone un sistema de blindaje compuesto y modular, orientado a reducir significativamente la exposición a neutrones generada durante el funcionamiento del dispositivo.

El sistema de soporte estructural del FUSOR-CR fue diseñado con el objetivo de garantizar la estabilidad mecánica del montaje experimental, facilitar el ensamble modular del blindaje y permitir el acceso seguro a los componentes durante el mantenimiento. La base del sistema consiste en una mesa fabricada con varilla cuadrada de acero, cuyas uniones serán realizadas mediante soldadura. Sobre esta base se instala un sistema de soportería elaborado con rieles tipo strut de perfil alto, comúnmente utilizados en instalaciones industriales por su versatilidad y capacidad de carga.

La cámara de vacío del fusor se suspende desde los rieles mediante gomas tipo Clevis como se observa en la **Figura 12** (izquierda), lo cual permite su posicionamiento preciso y su aislamiento estructural respecto de la mesa base. Adicionalmente, el blindaje (una prevista de cómo se ve el material en la vida real se encuentra en el **Anexo 1**) se acopla a los rieles laterales utilizando herrajes compatibles con el sistema strut, lo que permite desmontar o ajustar los paneles de blindaje sin afectar el resto de la instalación. Este diseño favorece la modularidad, la inspección técnica periódica y la adaptación futura del sistema de blindaje ante posibles actualizaciones del reactor o sus condiciones operativas.

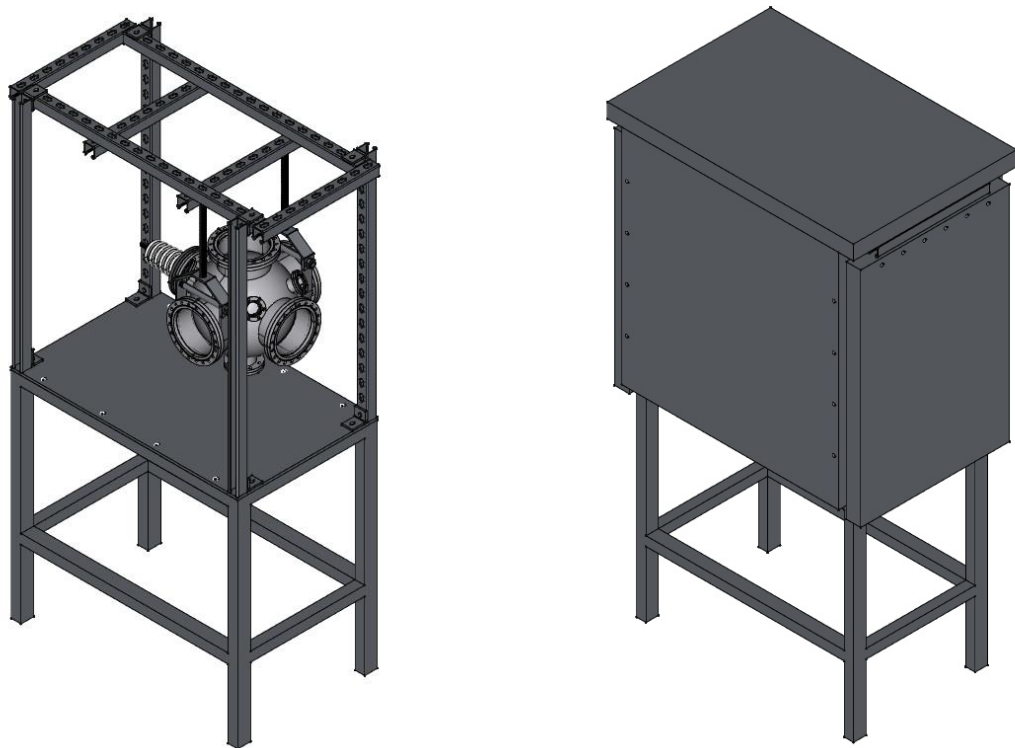


Figura 12. *Diseño de blindaje para el FUSOR-CR*

En relación con las propuestas administrativas, la **Figura 13** presenta la disposición recomendada de los elementos de control. En la planta baja, inmediatamente antes del acceso a las escaleras, se ha instalado un rótulo de “Zona Vigilada”. En el descanso intermedio de la escalera se dispone una lámpara estroboscópica acompañada de señalización que indica la activación del equipo. Al finalizar el ascenso, en el segundo nivel, se encuentra una segunda lámpara estroboscópica con su correspondiente rótulo. A la derecha, en el acceso a la zona de trabajo, además se ha colocado señalización que indica la obligatoriedad del uso de dosímetro personal. Finalmente, una cadena de color amarillo delimita físicamente el acceso restringido al área del equipo, impidiendo el ingreso de personal no autorizado.

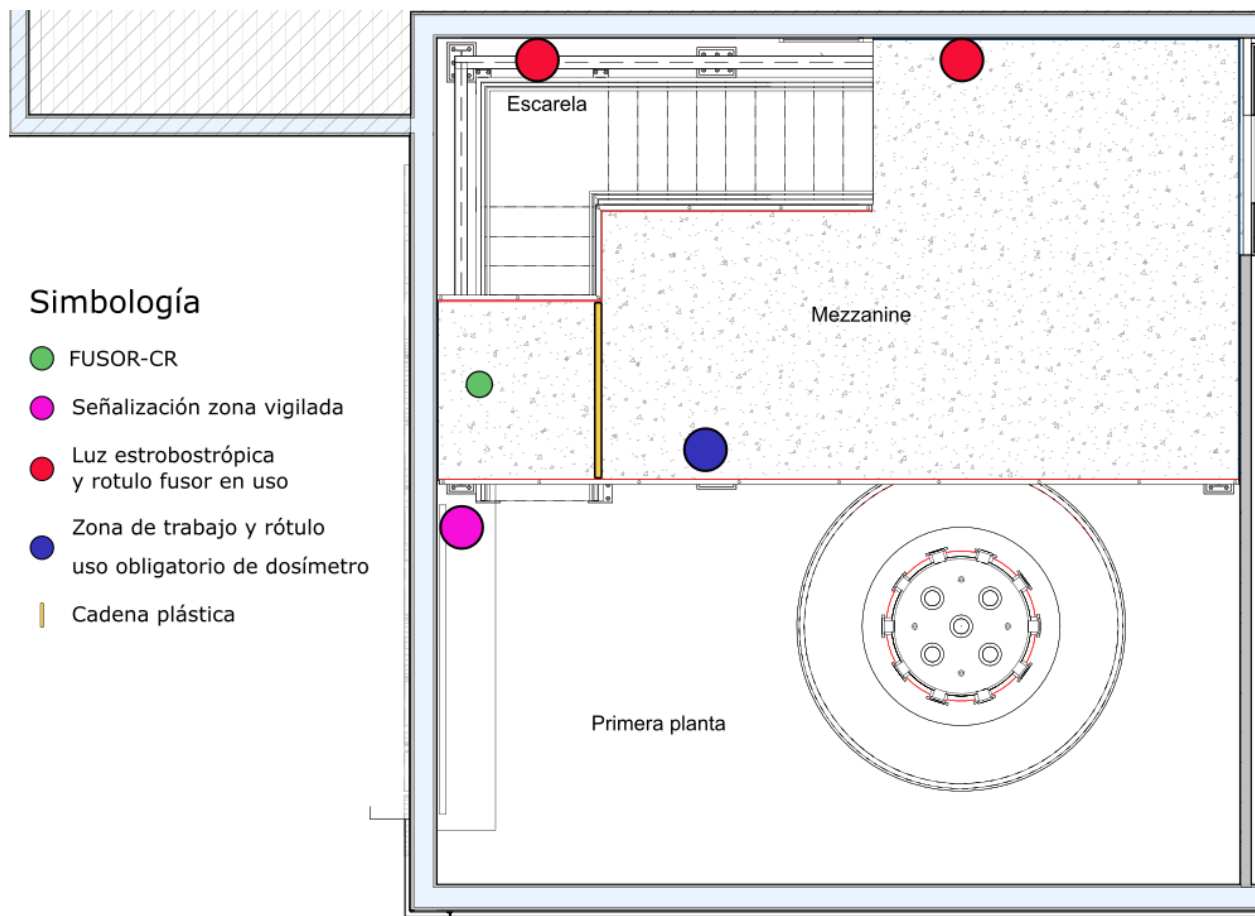


Figura 13. Ubicación de los controles administrativos

5.6. Validación de la solución

Con el objetivo de validar los controles propuestos en la sección anterior, en la **Tabla 10**, se presentan los resultados obtenidos mediante el método de factores de justificación y reducción. En ella se observa que la solución de señalización, si bien alcanza un valor aceptable en términos de justificación, no logra reducir el riesgo a un nivel aceptable. Por lo tanto, la segunda opción con el mejor factor de justificación corresponde a la combinación de las tres propuestas, la cual presenta un valor de 59,000 y logra situar el nivel de riesgo dentro de los límites aceptables.

Tabla 10. Factores de justificación y reducción para los controles propuestos

Identificación	Medidas de intervención	ND	NE	NP	NC	NR	Aceptabilidad del riesgo	Factor de reducción del riesgo (F)	Monto de la inversión (colones)	Factor de costo (d)	Factor de Justificación (J)
Exposición a radiaciones ionizantes	Situación actual	10	2	20	60	1200	No aceptable: situación crítica	Situación actual			
Exposición a radiaciones ionizantes	Señalización	6	2	12	25	300	No aceptable o Aceptable con control específico	75,00	52680	1	90000
Exposición a radiaciones ionizantes	Monitoreo	6	2	12	25	300	No aceptable o Aceptable con control específico	75,00	253203	2	45000
Exposición a radiaciones ionizantes	Blindaje	2	2	4	10	40	Aceptable, mejorar si es posible	96,67	552787	2	58000
Exposición a radiaciones ionizantes	Combinación de las tres propuestas		2	2	10	20	Aceptable, mantener las medidas de control existentes	98,33	858670	2	59000

La efectividad del blindaje propuesto se presenta en la **Figura 14**, donde se evidencia una reducción significativa del nivel de riesgo en comparación con la condición sin protección. En particular, se observa que, tras la implementación del blindaje, la dosis anual de radiación recibida por los trabajadores se mantiene por debajo del límite de exposición ocupacional de 20 mSv/año, independientemente de la distancia entre la fuente y el punto de evaluación.

Esta disminución en los niveles de exposición demuestra que el diseño del blindaje cumple con los objetivos de protección radiológica, garantizando un entorno de trabajo seguro y conforme a los estándares establecidos por la legislación nacional. Por lo tanto, se valida la eficacia de la propuesta como una medida adecuada para mitigar el riesgo asociado a la radiación emitida por el FUSOR-CR.

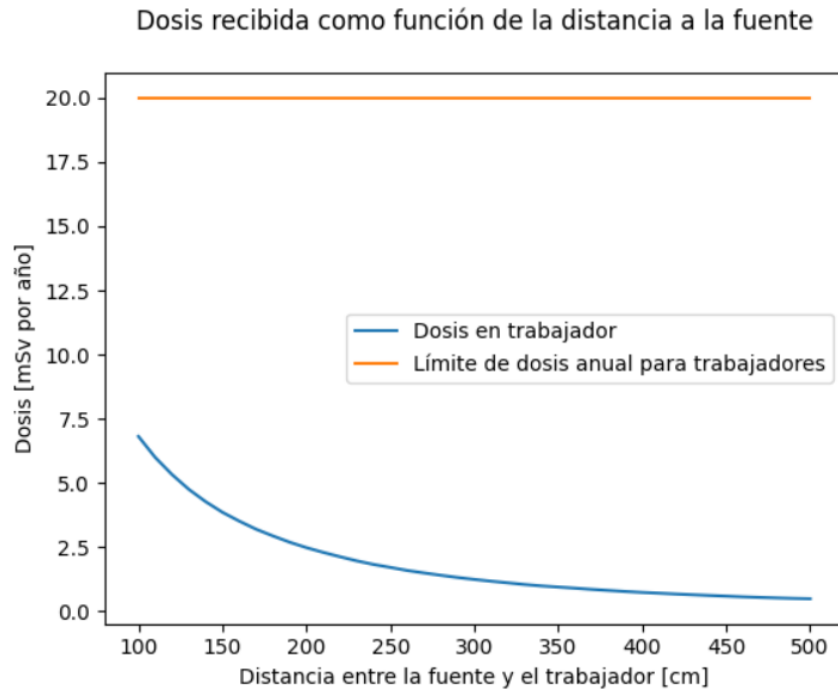


Figura 14. Nivel de reducción de riesgo debido al blindaje propuesto.

Y a continuación en la **Figura 15** se puede visualizar la representación tridimensional de los resultados mencionados previamente.

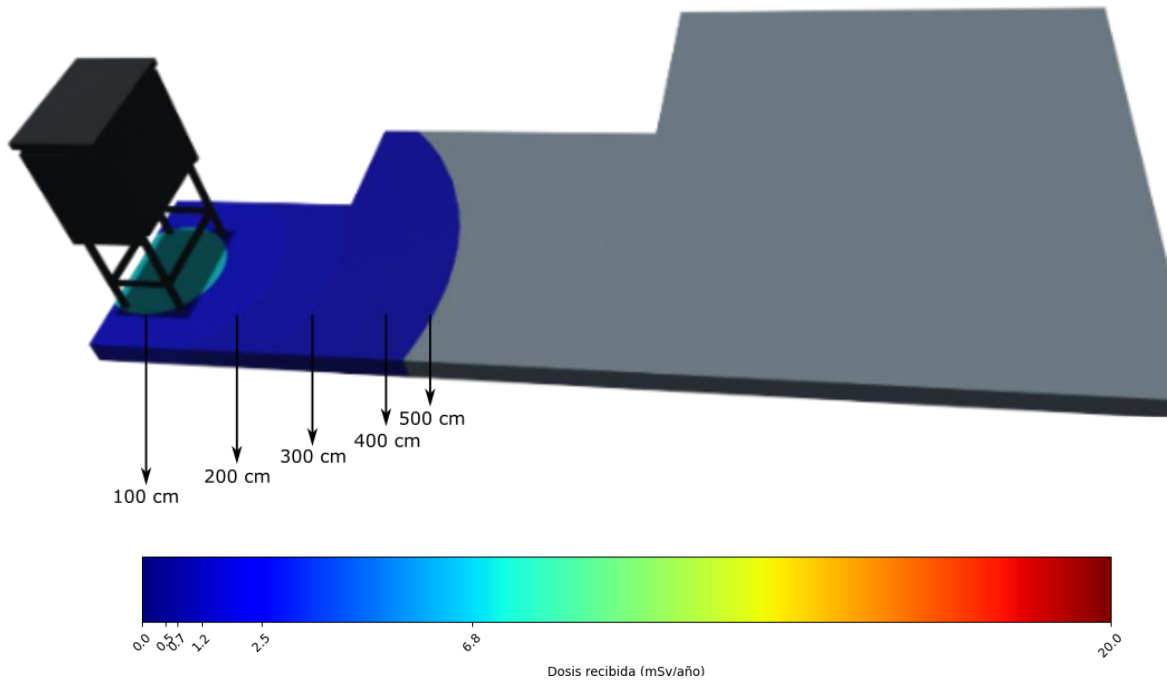
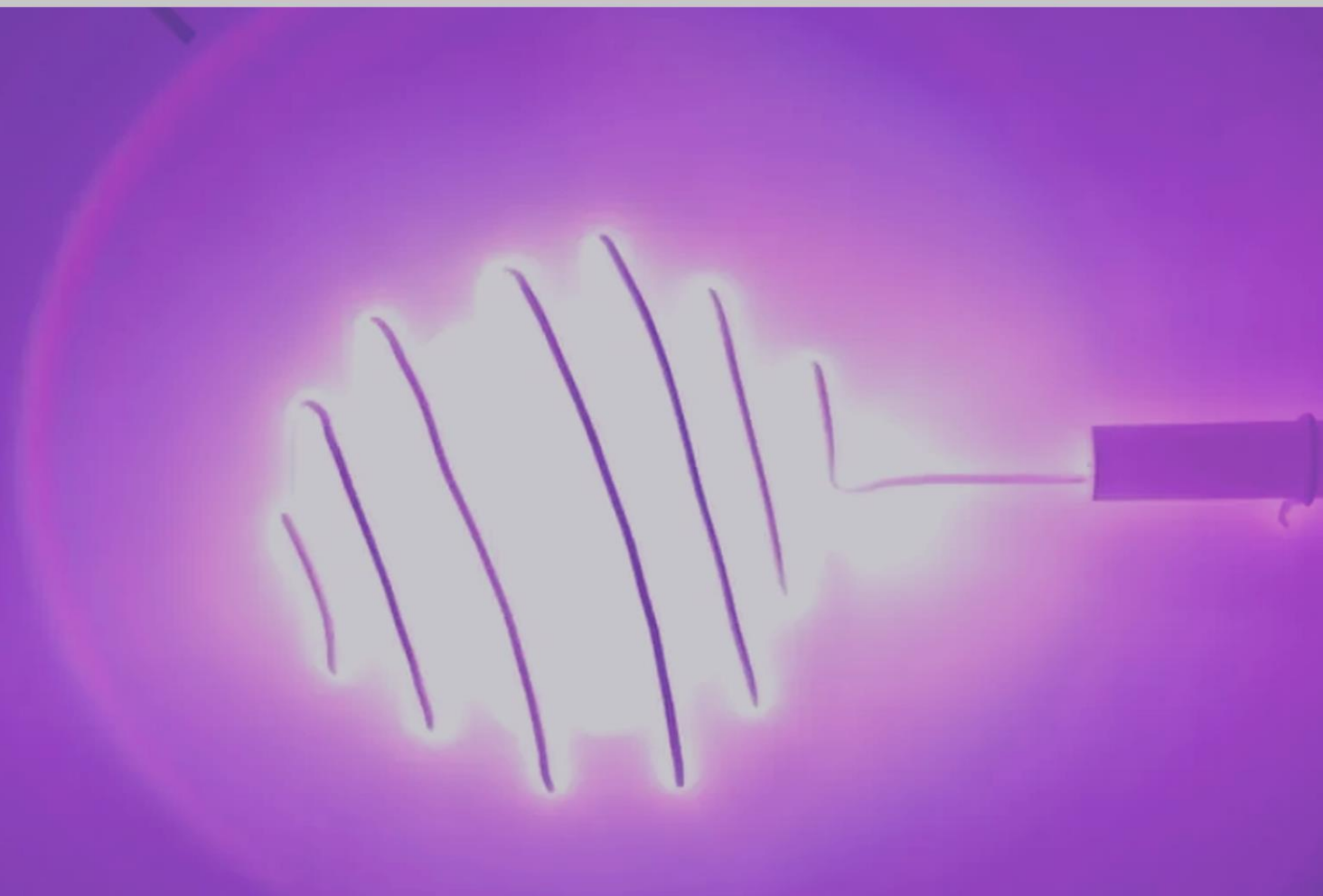


Figura 15. Perfil de dosis 3D según la distancia al reactor blindado

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS PARA EL USO DEL FUSOR-CR

ORIENTACIONES PARA EL MANEJO SEGURO DEL FUSOR-CR EN EL LABORATORIO
DE PLASMAS PARA ENERGÍA DE FUSIÓN Y APLICACIONES DEL ITCR



Byron Vega Chavarría
1ª Edición, 2025

Tabla de Contenidos

Información del manual 2

Datos Generales del establecimiento 3

Procedimientos Operativos 5

Plan de implementación 20

Costo de implementación 25

Información del manual

Fecha de elaboración: jul.-25

Número de Versión: 1.0

Tabla 1. Responsables del manual de procedimientos

Responsabilidad	Nombre	Cargo	Firma
Elaboración del manual			
Revisión del manual			
Revisión del manual			
Revisión del manual			
Aprobación del manual			

Datos Generales del establecimiento

Razón social del establecimiento: _____

Cédula jurídica del establecimiento: _____

Nombre del Titular de la autorización: _____

Nombre comercial: _____

Número del permiso sanitario: _____

Vigencia: _____

Responsable de protección radiológica

Nombre completo: _____

Código RPR asignado: _____

Vigencia del nombramiento: _____

Responsable de protección radiológica sustituto

Nombre completo: _____

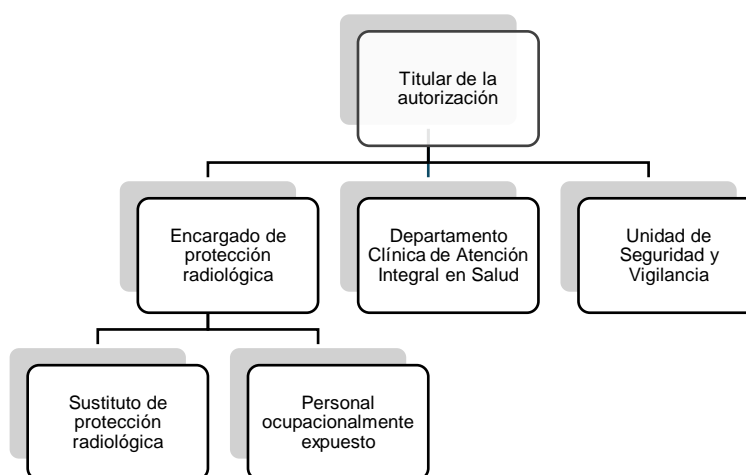
Código RPR asignado: _____

Vigencia del nombramiento: _____

Tabla 2. Lista del personal ocupacionalmente expuesto

Nombre	Nombre	Cargo	Firma

Organigrama en materia de protección radiológica



Procedimientos Operativos

Tipo de Instalación

Este establecimiento está dentro de la categoría de establecimientos tipo I como las instalaciones en donde se produzca, fabrique, repare o se haga manutención de fuentes o equipos generadores de radiaciones ionizantes y, además, los aceleradores de partículas o de investigación o de uso industrial.

Descripción de las actividades

Las prácticas realizadas en este establecimiento en materia de radiaciones ionizantes se centran en la investigación de plasmas de deuterio, con el objetivo de explorar el potencial de la energía de fusión y sus aplicaciones científicas. Estas actividades implican el uso de equipos emisores para generar y diagnosticar condiciones de plasma controlado, bajo parámetros específicos de operación que permiten estudiar los fenómenos físicos asociados a la fusión nuclear.

Emisores instalados en el establecimiento:


Equipo: FUSOR-CR

Tipo: Fusor de Farnsworth

Ubicación: Segundo piso de la nave industrial

Rango de operación de voltaje: 0 a 60kV

Carga de trabajo: 2 horas semanales

 TEC Tecnológico de Costa Rica	Instituto Tecnológico de Costa Rica	Código: PROC-FUS-001-OP
	Nombre del documento: Protocolo de descarga eléctrica para fusión	Página: 1 de 6
	Versión: 1	Última revisión: Junio, 2025

Protocolo de descarga eléctrica para fusión

Fecha:


Autorización por:

Encargado de operación:

Este protocolo permite generar descargas eléctricas para fusión en el FUSOR-CR del Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y aplicaciones del Tecnológico de Costa Rica. Este procedimiento tiene el fin de garantizar la seguridad y la calidad de las operaciones.

Los equipos utilizados en este procedimiento son los siguientes:


- Convector
- Ion gauge
- Bomba mecánica
- Bomba turbomoleular
- Fuente de alto voltaje

	Instituto Tecnológico de Costa Rica	Código: PROC-FUS-001-OP
	Nombre del documento: Protocolo de descarga eléctrica para fusión	Página: 2 de 6
	Versión: 1	Última revisión: Junio, 2025

Etapa 1: Preparación del área de trabajo

Antes de iniciar cualquier actividad en el laboratorio, se debe asegurar que el área de trabajo se encuentre en condiciones óptimas para operar de forma segura y eficiente. La siguiente lista de verificación corresponde preparación del área de trabajo y debe ser completada rigurosamente antes de encender los equipos o manipular gases.

Ítem por verificar	Cumple sí o no	Observaciones
¿Se poseen todos los equipos de protección personal (gafas de seguridad, gabacha con manga larga)?		
Las herramientas de trabajo se encuentran libres de aceites o grasas.		
¿Hay suficiente ventilación en el área de trabajo?		
Las conexiones de todos los equipos no se encuentran apoyadas en la cámara de vacío.		
Todas las regletas y controladores están listos para su utilización.		
Ningún equipo se encuentra en alarma.		
La válvula manual de venteo se encuentre cerrada y sin el protector.		
Todas las gate-valve se encuentren abiertas (Tornillo afuera).		
Los tanques de gas se encuentren conectados al sistema de inyección correspondiente y abiertos.		
La presión en todas las líneas de gas debe estar entre 20 y 40 PSI.		

 TEC Tecnológico de Costa Rica	Instituto Tecnológico de Costa Rica	Código: PROC-FUS-001-OP
	Nombre del documento: Protocolo de descarga eléctrica para fusión	Página: 3 de 6
	Versión: 1	Última revisión: Junio, 2025


Etapa 2: Preparación, arranque y operación del sistema de vacío

En esta fase se establecerán las condiciones necesarias de presión dentro de la cámara y asegurar un entorno controlado para los procesos posteriores. A continuación, se detallan los pasos a seguir:

Ítem por verificar	Cumple sí o no	Observaciones
La pantalla del controlador ACT600TH indica que se encuentra a la espera para iniciar la bomba turbomolecular.		
Existen alarmas en las bombas		
Inicie la bomba ATP150 presionando "Start" cuando la presión sea aproximadamente de 7 Torr		
Active el Ion Gauge cuando la presión dada por el convector sea alrededor de un 1 mTorr.		


Etapa 3: Regulación de la presión a partir de la inyección de gas

Ítem por verificar	Cumple sí o no	Observaciones
Apague el Ion Gauge		
Establezca el flujo deseado en el setpoint (SP1) (mayor que 10 sccm)		
Verifique que el flujo (F1L) coincida con el setpoint.		
Ajuste la presión controlando la Gate Valve (cerrar totalmente y dar una vuelta de nuevo para empezar a regular) hasta obtener la presión de trabajo (con el gas)		

 TEC Tecnológico de Costa Rica	Instituto Tecnológico de Costa Rica	Código: PROC-FUS-001-OP
	Nombre del documento: Protocolo de descarga eléctrica para fusión	Página: 4 de 6
	Versión: 1	Última revisión: Junio, 2025


Etapa 4: Preparación para el arranque y operación de la fuente de alto voltaje

Ítem por verificar	Cumple sí o no	Observaciones
¿Todas las conexiones eléctricas están en buenas condiciones?		
¿La perilla esté en posición totalmente antihoraria?		
Encienda la fuente y verifique que funciona correctamente (enciende la luz roja)		
Es importante que lentamente se gire la perilla en dirección horaria (el voltaje no debe superar los 60kV)		

 TEC Tecnológico de Costa Rica	Instituto Tecnológico de Costa Rica	Código: PROC-FUS-001-OP
	Nombre del documento: Protocolo de descarga eléctrica para fusión	Página: 5 de 6
	Versión: 1	Última revisión: Junio, 2025

Etapa 5: Procedimiento de apagado

Ítem por verificar	Cumple sí o no	Observaciones
¿La fuente no está en modo de operación?		
Apague la fuente mediante el interruptor ON/OFF		
¿Todas las conexiones eléctricas están en buenas condiciones?		
¿Los componentes eléctricos están a temperatura ambiente?		
Manipule el indicador del flujómetro para que el setpoint (SP1) sea de cero		
Apague la inyección de gas con el botón OFF.		
Apague el dispositivo con el botón de POWER.		
Verifique que la Gate-Valve se encuentren abiertas (Tornillo afuera)		
Apague la bomba turbomolecular al presionar el botón STOP		
Espere hasta que las revoluciones de la bomba lleguen a cero.		
Apague la bomba mecánica		
Coloque un filtro en la entrada de venteo		
Abra la válvula de venteo lentamente		
Verifique que la presión se ha estabilizado a la presión atmosférica.		
Cierre la llave del manómetro en la dirección antihoraria		
Cierre la llave de los tanques utilizados		

 TEC Tecnológico de Costa Rica	Instituto Tecnológico de Costa Rica	Código: PROC-FUS-001-OP
	Nombre del documento: Protocolo de descarga eléctrica para fusión	Página: 6 de 6
	Versión: 1	Última revisión: Junio, 2025

Etapa 6: Verificación final

Ítem por verificar	Cumple sí o no	Observaciones
¿Se han guardado los datos recolectados para su posterior análisis?		
¿Todas las gate-valve se encuentren abiertas?		
¿Los controladores de los equipos no se encuentren en alarma?		
¿Todos los controladores de los equipos están apagados?		
¿Todas las líneas de gas conectadas a la cámara se encuentren cerradas?		
¿Todos los tanques de gas se encuentran cerrados?		
¿Todas las regletas están apagadas?		
¿La estación de trabajo está limpia y ordenada?		

A continuación, se presenta la infografía resumen correspondiente al protocolo previamente descrito, el cual debe estar disponible en el área de trabajo para su consulta y aplicación.

PROTOCOLO DE DESCARGA ELÉCTRICA PARA FUSIÓN

Guiar paso a paso el procedimiento seguro y eficiente para ejecutar una descarga de fusión nuclear controlada en el FUSOR-CR



1

Preparación del Área de Trabajo

Objetivo: Garantizar condiciones seguras y controladas.

Acciones:

- Confirmar el uso de EPP (guantes, gafas, bata antiestática).
- Herramientas libres de grasa o aceite
- Activar ventilación y señalización de área restringida.
- Verificar integridad física del sistema.



2

Preparación, Arranque y Operación del Sistema de Vacío

Objetivo: Garantizar condiciones seguras y controladas.

Acciones:

- Encender bombas de vacío en orden recomendado (ej. mecánica → turbo).
- No hay alarmas en las bombas



3

Regulación de Presión por Inyección de Gas

Objetivo: Alcanzar presión base adecuada.

Acciones:

- Configurar el Ion Gauge
- Monitorear presión con precisión.
- Ajustar caudal en el Gate Valve para estabilidad antes de aplicar alto voltaje.



4

Preparación para el Arranque y Operación de la Fuente de Alto Voltaje

Objetivo: Condiciones listas para iniciar descarga eléctrica.

Acciones:

- Verificar conectores, cables y aislamiento del sistema.
- Verificar que la fuente esté en 0 V antes de comenzar.
- Elevar lentamente el voltaje hasta la tensión de operación.



5

Procedimiento de Apagado

Objetivo: Finalizar la operación sin riesgos.

Acciones:

- Apagar fuente de alto voltaje.
- Cerrar válvula de gas.
- Apagar bombas en orden inverso (turbo → mecánica).
- Ventilar la cámara lentamente si es necesario.



6

Verificación final

Objetivo: Confirmar condiciones seguras post-experimento

Acciones:

- Medir presión y confirmar vacío residual.
- Inspeccionar daños visibles en la cámara o electrodos.
- Registrar parámetros clave del disparo (presión, voltaje, duración, observaciones).
- Verificar ausencia de alarmas.
- Verificar que los tanques estén cerrados.
- Desactivar señalización de riesgo.
- El área de trabajo está limpia.

Registros: Con el fin de garantizar la trazabilidad, el control y la supervisión de las prácticas desarrolladas en la instalación, es obligatorio mantener un registro detallado y verificable de todas las actividades operativas realizadas, por lo tanto, se deberá llenar el siguiente formato de registro cada vez que se utilice un emisor de radiaciones.

Fecha	Equipo	Operador	Actividad realizada	Cantidad de exposiciones	Observaciones	Firma del operador	Firma del responsable

Plan interno de capacitación en materia de protección radiológica

1. Alcance

Este plan de capacitación aplica a todos los estudiantes y colaboradores involucrados directamente en el proyecto FUSOR-CR, desarrollado en el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Está diseñado para fortalecer sus competencias técnicas, operativas y de seguridad en el manejo de fuentes de radiación ionizante.

2. Fines del plan de capacitación

Este plan contribuye a:

- Reducir los riesgos de exposición mediante la aplicación de buenas prácticas.
- Mejorar el cumplimiento de la normativa nacional e internacional vigente.
- Fomentar una cultura institucional de seguridad radiológica.
- Prevenir la obsolescencia del conocimiento técnico del personal.
- Promover el bienestar físico y mental de los participantes en ambientes controlados.

3. Objetivos del plan de capacitación

Objetivo General

Fortalecer el conocimiento del personal del proyecto FUSOR-CR en protección radiológica, mediante sesiones teóricas y prácticas, con el fin de garantizar el cumplimiento normativo, reducir la exposición a radiaciones ionizantes y mejorar la seguridad operativa del laboratorio.

Objetivos Específicos

- 1) Mejorar la competencia técnica del personal en los principios fundamentales de la protección radiológica a través de talleres prácticos y simulaciones, para promover prácticas seguras en el uso de generadores de radiaciones ionizantes.
- 2) Instruir sobre la normativa nacional e internacional aplicable, así como los procedimientos institucionales, para asegurar el cumplimiento legal y técnico en las actividades que involucren radiación.
- 3) Desarrollar habilidades prácticas para la identificación, evaluación y control de riesgos radiológicos, mediante simulaciones, ejercicios operativos y análisis de casos reales que fortalezcan la respuesta ante incidentes y emergencias radiológicas.

4. Metas

- Capacitar al 100% del personal activo del proyecto FUSOR-CR en al menos 80% de los temas definidos en este plan.
- Evaluar el aprendizaje con al menos un 80% de aprobación en pruebas teóricas y prácticas.

5. Estrategias de formación

- Clases magistrales presenciales y/o virtuales sobre conceptos teóricos clave.
- Talleres prácticos y simulaciones para fortalecer la habilidad operativa.
- Análisis de casos reales y ejercicios de aplicación.
- Pruebas parciales y exámenes cortos.

6. Periodicidad y responsables

El plan se ejecutará de forma anual o cuando se incorporen nuevos integrantes al proyecto. El coordinador del FUSOR-CR, en conjunto con el responsable de protección radiológica, será responsable de la planificación, ejecución y evaluación del plan.

7. Acciones por desarrollar

Temas de capacitación

Capítulo	Tema	Subtemas
Principios básicos	Física y matemáticas básicas utilizadas en la protección radiológica	<ul style="list-style-type: none"> • Física atómica y nuclear básica • Radiactividad • Reacciones nucleares • Matemáticas básicas • Estadística
	Interacción de la radiación con la materia	<ul style="list-style-type: none"> • Radiación de partículas cargadas • Radiación sin carga
	Fuentes de radiación	<ul style="list-style-type: none"> • Fuentes naturales • Fuentes radiactivas artificiales • Generadores de radiación
Cantidades y mediciones	Cantidades y unidades	<ul style="list-style-type: none"> • Magnitudes radiométricas y coeficientes de interacción • Magnitudes dosimétricas • Protección radiológica y magnitudes operacionales
	Cálculos y mediciones radiométricas y dosimétricas	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculos radiométricos y dosimétricos
	Principios de detección y medición de la radiación	<ul style="list-style-type: none"> • Detectores • Comparación de los distintos tipos de detectores para fines de medición adecuados
Efectos biológicos de la radiación ionizante	Efectos de la radiación a nivel molecular y celular	<ul style="list-style-type: none"> • Repaso de biología celular • Efectos de la radiación en las células. Fases del daño y factores modificadores.
	Efectos deterministas	<ul style="list-style-type: none"> • Efectos de las dosis altas
	Efectos somáticos estocásticos	<ul style="list-style-type: none"> • Tumorigénesis (también oncogénesis o carcinogénesis) • Relación dosis-respuesta

Capítulo	Tema	Subtemas
	Efectos hereditarios estocásticos	<ul style="list-style-type: none"> • Efectos hereditarios
	Efectos sobre el embrión y el feto	<ul style="list-style-type: none"> • Efectos de la radiación
	El concepto de detrimento por radiación	<ul style="list-style-type: none"> • Deterioro por radiación
Sistema internacional de protección radiológica y marcos reguladores	Recomendaciones de la ICRP's	<ul style="list-style-type: none"> • Introducción a las recomendaciones de la CIPR • El sistema de protección radiológica humana • Principios de la protección radiológica
	Fundamentos de seguridad	<ul style="list-style-type: none"> • Objetivo y principios de seguridad
	Normas básicas de seguridad del OIEA	<ul style="list-style-type: none"> • Introducción a las normas básicas de seguridad • Requisitos generales de protección y seguridad
	Evaluación de seguridad de instalaciones y actividades	<ul style="list-style-type: none"> • Implementación de requisitos para la evaluación de seguridad
	Seguridad y protección de las fuentes radiactivas	<ul style="list-style-type: none"> • Código de Conducta sobre la seguridad tecnológica y física de las fuentes radiactivas • Herramienta del OIEA para apoyar las actividades reguladoras
	Cultura de seguridad y desarrollo de competencias en seguridad radiológica	<ul style="list-style-type: none"> • Cultura de seguridad del personal en todos los niveles
Evaluación de exposiciones externas e internas (no medicas)	Evaluación de la exposición ocupacional debida a fuentes externas de radiación	<ul style="list-style-type: none"> • Programas de monitorización para la evaluación de dosis individuales • Técnicas de reconstrucción de dosis • Programa de monitorización del puesto de trabajo

Capítulo	Tema	Subtemas
		<ul style="list-style-type: none"> • Interpretación de mediciones
	Evaluación de la exposición ocupacional debida a la ingesta de radionucleidos	<ul style="list-style-type: none"> • Modos de administración • Cálculo de la dosis efectiva comprometida
Situaciones de exposición planificada en aplicaciones no medicas	Seguridad en irradiadores y aceleradores industriales	<ul style="list-style-type: none"> • Irradiadores y aceleradores industriales
Situaciones de exposición a emergencias y su preparación/respuesta	Requisitos básicos y principios	<ul style="list-style-type: none"> • Requisitos de las Normas Básicas de Seguridad • Principios generales
	Bases de planificación para situaciones de exposición a emergencias	<ul style="list-style-type: none"> • Base de planificación
	Estrategias de protección para situaciones de exposición de emergencia	<ul style="list-style-type: none"> • Estrategia de protección
	Sistema de gestión de emergencias y operaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de gestión de emergencias
	Planes y procedimientos, entrenamiento y ejercicios	<ul style="list-style-type: none"> • Elementos de infraestructura
Situaciones de exposición existentes	Requisitos y principios básicos	<ul style="list-style-type: none"> • Introducción y antecedentes • Requisitos de las normas básicas de seguridad • Requisitos generales para situaciones de exposición existentes

Plan de implementación

El presente plan (ver **Figura 16**[Error! Reference source not found.](#)) tiene como objetivo guiar la implementación efectiva y eficiente de las medidas propuestas orientadas a garantizar la protección radiológica, operativa y organizativa en el laboratorio. Estas medidas han sido agrupadas en cinco etapas fundamentales: señalización, monitoreo, blindaje del reactor, plan de capacitación para el personal e inicio de operaciones. A continuación, se detalla la planificación de cada componente, su cronograma de ejecución y la lógica de su implementación.

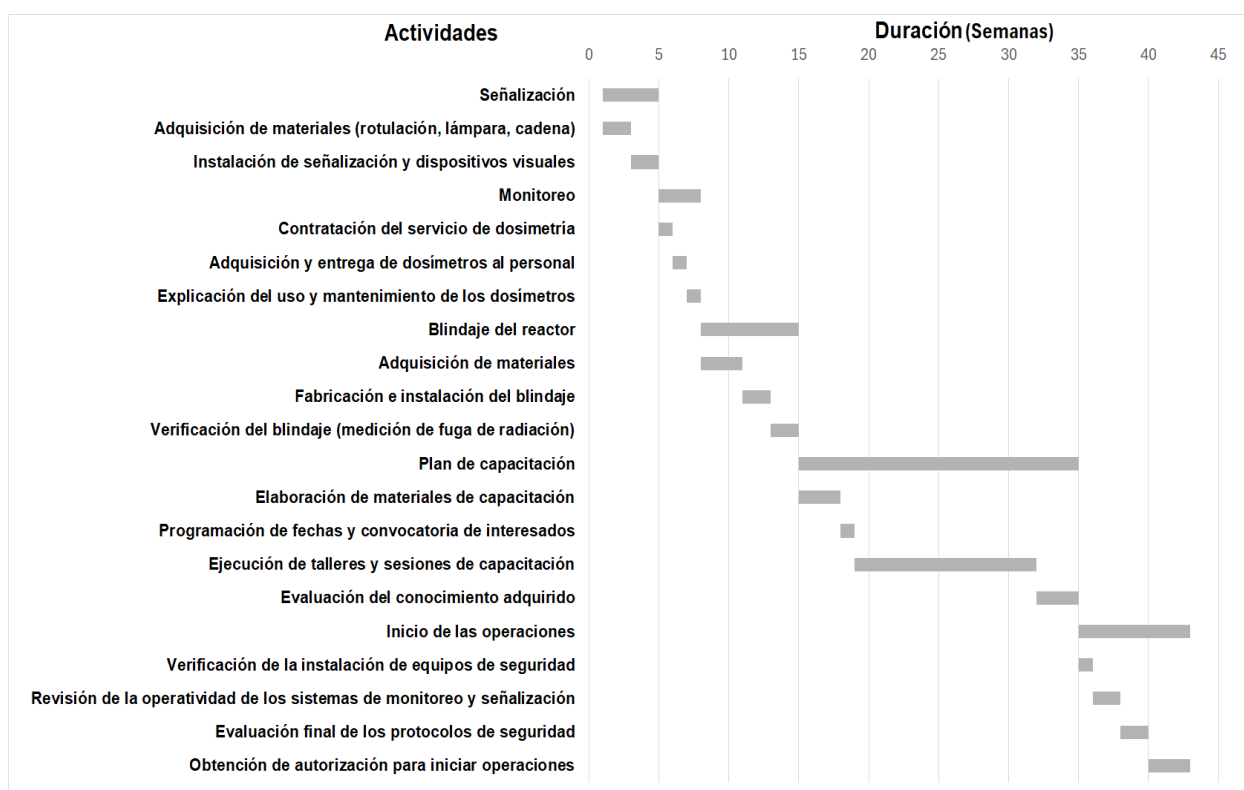


Figura 16. Diagrama de Gantt para la implementación de medidas de control

1. Señalización

La primera etapa se centra en la instalación de señalización de seguridad en el área del reactor. La señalización se clasifica en diferentes tipos según su función y objetivo de advertencia, los cuales incluyen:

- **Señalización de advertencia:** Se colocará rotulación visible que indique “Zona Vigilada”, conforme a la normativa nacional de protección radiológica, con el fin de alertar a las personas sobre la presencia de radiación en el área.
- **Señalización de operación:** Se instalará una lámpara estroboscópica junto con su rotulación que advierta cuando el reactor esté en operación, brindando una señal visual clara para alertar a los trabajadores sobre el estado de la maquinaria.
- **Señalización de restricción de acceso:** Se utilizarán cadenas plásticas amarillas para restringir el acceso al área del reactor, asegurando que solo el personal autorizado ingrese a la zona de operación.
- **Señalización de uso obligatorio de equipo de protección personal:** Se instalará rotulación indicando el uso obligatorio de dosímetros personales en la área de trabajo, para garantizar que todos los trabajadores monitoreen su exposición a la radiación.

Para llevar a cabo esta etapa, se realiza primero la adquisición de los materiales, la cual tiene una duración de dos semanas. Una vez que los materiales estén disponibles, se procede a su instalación, que se lleva a cabo durante las siguientes dos semanas.

2. Monitoreo

El segundo componente corresponde al establecimiento de un sistema de monitoreo. Este proceso incluye los siguientes pasos:

- Contratación del servicio de dosimetría.
- Adquisición y distribución de dosímetros al personal que trabajará con el reactor.
- Explicación del uso y mantenimiento de los dosímetros.

Inicialmente se realiza la contratación del servicio en la semana cinco, posteriormente se adquieren los dosímetros personales TLD asegurando que todos los trabajadores cuenten con un dosímetro personal antes de la puesta en marcha. Finalmente se instruye a los colaboradores acerca del uso de los dispositivos y las buenas prácticas.

3. Blindaje del Reactor

En esta etapa se concreta uno de los pilares más importantes del proyecto, la preparación e instalación del blindaje, esta ocurre entre las semanas ocho y trece. Las actividades incluidas en esta etapa son:

- Adquisición de materiales.
- Fabricación e instalación del blindaje.
- Verificación del blindaje (medición de radiación).

Se comienza en la semana trece con la compra de los materiales con una duración aproximada de tres semanas, luego se procede a comenzar la fabricación del blindaje en un tiempo aproximado de dos semanas. Finalmente se debe realizar una comprobación de la calidad del blindaje mediante una medición de la radiación generada por el reactor y la atenuación obtenida por el blindaje para lograr garantizar que los niveles de radiación cumplan con los límites requeridos.

4. Plan de Capacitación

El componente formativo está orientado a desarrollar una cultura de seguridad en el laboratorio. Este plan incluye:

- Elaboración de materiales de capacitación.
- Programación de fechas y convocatoria de todos los interesados.
- Ejecución de talleres y sesiones de capacitación.
- Evaluación del conocimiento adquirido.

Esta etapa comienza en la semana quince con la elaboración de los materiales didácticos necesarios para la formación de los colaboradores con el objetivo de facilitar la comprensión de una manera accesible independiente de su nivel técnico y tiene una duración tres semanas. Una vez que se han preparado los recursos audiovisuales se procederá a organizar las fechas más convenientes para las sesiones de capacitación y talleres basándose en la disponibilidad de los colaboradores, esto podría involucrar el uso de encuestas o entrevistas. Posteriormente, se enviarán invitaciones formales a los participantes y todos los interesados, donde se detallarán las fechas, los horarios, los objetivos de la capacitación y la información relevante sobre el acceso a los materiales, esta programación tiene una duración estimada de una semana.

La siguiente actividad es la parte central de esta etapa y consiste en la ejecución de los talleres y sesiones de capacitación. En esta etapa, los participantes tendrán la oportunidad de interactuar directamente con los temas. Dependiendo de las circunstancias, las sesiones podrán ser presenciales o virtuales, adaptándose a la ubicación de los participantes. Durante esta fase, se fomentará la participación activa, incentivando a los usuarios a resolver dudas y compartir sus experiencias. Además, se deberá establecer un canal de retroalimentación para garantizar que los participantes se sientan apoyados durante todo el proceso.

Una vez finalizadas las sesiones de capacitación, se procederá a evaluar el nivel de conocimiento adquirido por los participantes. El instructor deberá diseñar pruebas escritas o exámenes en línea, enfocados en los aspectos fundamentales de protección radiológica estudiados previamente, con el fin de medir el grado de comprensión y la capacidad de los participantes para aplicar lo aprendido. Finalmente, se llevará a cabo un proceso de retroalimentación mediante encuestas o entrevistas individuales, donde los participantes podrán expresar sus impresiones sobre el proceso de capacitación y las dificultades que hayan encontrado, esto con el fin de mejorar continuamente el plan de capacitación.

5. Inicio de operaciones

En esta etapa se debe garantizar que todos los elementos y procedimientos de seguridad se encuentran funcionales, para ello se tienen las siguientes actividades:

- Verificación de la instalación de equipos de seguridad.
- Revisión de la operatividad de los sistemas de monitoreo y señalización.
- Evaluación final de los protocolos de seguridad.
- Obtención de autorización para iniciar operaciones.

Esta etapa inicia con la verificación de los equipos de seguridad instalados. Esta actividad tiene como objetivo garantizar que todos los equipos de seguridad necesarios estén presentes y correctamente instalados, para lograrlo se dispondrá de una semana. Una vez que los equipos de seguridad estén verificados, se procederá a evaluar el correcto funcionamiento de los sistemas de monitoreo y señalización. La revisión incluirá la realización de pruebas de activación, asegurando que los sistemas de monitoreo estén registrando adecuadamente los eventos y que las señales de alerta se activen oportunamente, asegurándose de que cada dispositivo cumpla con los estándares técnicos y operativos previstos, se considera que esta para ello se requerirán dos semanas.

Al concluir con la revisión de los equipos se procede a la evaluación final de los protocolos de seguridad en este paso se verifica que todos los procedimientos establecidos para la protección de los equipos y las personas sean eficaces. En esta etapa, se realizará una revisión de los protocolos de seguridad definidos previamente, evaluando su aplicabilidad en escenarios reales. Se analizará cómo el personal logra aplicar los procedimientos como las respuestas ante emergencias y las acciones de evacuación, mediante simulaciones y simulacros, para esta actividad se contará con dos semanas.

Una vez completadas las verificaciones y evaluaciones de los sistemas de seguridad, se procederá a obtener la autorización formal para iniciar las operaciones. Esta etapa marca el momento en que el proyecto se encuentra listo para entrar en su fase operativa.

Costo de implementación

En este apartado (ver Tabla 3) se muestra el presupuesto necesario para poder implementar las medidas de control sugeridas para garantizar salud y seguridad de los colaboradores del proyecto FUSOR-CR.

Tabla 3. Presupuesto para la implementación de medidas de control

Control	Material/Equipo	Proveedor	Precio unitario (₡)	Precio total (₡)
Señalización	Cadena plástica (m)	Novex	600	2400
	Luz estroboscópica	Steren	13500	27 000
	Rótulos	LWS	5820	23 280
Monitoreo	Genesis Ultra TLD-BP (anual)	Mirion	31650	253 203
Blindaje	Saco de poliimida	SABIC	16238	32 476
	Óxido de gadolinio (III) 100g	Thermo Fisher Scientific	237681	237 681
	Nitruro de boro 50 g	Sigma Aldrich	94210	282 630
Total	-	-	-	858670

5.7. Conclusiones

- Los controles recomendados para la puesta en marcha del FUSOR-CR han sido desarrolladas a partir del análisis de las condiciones actuales en el área de trabajo y la evaluación de los riesgos asociados con la fuente en cuestión. Por tanto, las propuestas se ajustan tanto a las características específicas del entorno como a las necesidades de protección para los trabajadores expuestos y la infraestructura existente.
- El sistema de señalización propuesto es una medida clave para garantizar la seguridad en el lugar de trabajo. La integración de tecnologías visuales como las lámparas estroboscópicas, junto con la señalización clara de zonas de riesgo y la implementación de mecanismos físicos de bloqueo, crea un entorno seguro y controlado. Además, la indicación de EPP en las áreas correspondientes asegura que cada trabajador esté adecuadamente protegido.
- La correcta definición y estandarización de los pasos a seguir, mediante el protocolo de operación no solo optimiza el rendimiento del proceso, sino que también minimiza significativamente la exposición ocupacional a riesgos radiológicos. Al establecer un procedimiento claro y detallado, se logra una reducción sustancial en los posibles fallos operativos, asegurando que los trabajadores estén protegidos y los equipos operen dentro de los parámetros más seguros y eficientes.
- El plan de capacitación propuesto proporcionará a los colaboradores del proyecto con los conocimientos y habilidades necesarias para cumplir con las responsabilidades relacionadas con la seguridad radiológica. Esta formación garantizará que todos los involucrados en la operación y manejo del fusor estén preparados para prevenir y mitigar posibles riesgos.

5.8. Recomendaciones

- Se recomienda que los controles propuestos sean revisados de forma exhaustiva por todas las partes interesadas con el fin de verificar su eficacia y asegurarse que estos están alineados a la estructura actual de la institución.
- Se recomienda la participación y compromiso de todos los interesados en la implementación y seguimiento de los controles propuestos.
- Se recomienda la divulgación de los controles propuestos a todos los colaboradores involucrados en el proyecto FUSOR-CR.
- Se recomienda realizar evaluaciones cuantitativas de la exposición ocupacional a radiaciones ionizantes para determinar la efectividad de los controles propuestos.

7. Referencias bibliográficas

Aguilar Morales, J. E. (2019). El diagnóstico de necesidades de capacitación. Network De Psicología Organizacional. México: Asociación Oaxaqueña De Psicología AC,

Akbar, S., Khalil, M. S., & Ahmad, S. (2009). (2009). Protection and Monitoring of Ionizing Radiation-Nuclear Medicine. Paper presented at the *International Conference on Nuclear Engineering*, , 43529

Baykara, O., İrim, Ş G., Wis, A. A., Keskin, M. A., Ozkoc, G., Avci, A., & Doğru, M. (2020). Polyimide nanocomposites in ternary structure: "A novel simultaneous neutron and gamma-ray shielding material". *Polymers for Advanced Technologies*, 31(11), 2466–2479.

Belli, M., & Tabocchini, M. A. (2020). Ionizing radiation-induced epigenetic modifications and their relevance to radiation protection. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(17)

Cárdenas, J. (2018). Investigación cuantitativa.

Cataldo, F., & Prata, M. (2019). New composites for neutron radiation shielding. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 320(3), 831–839.

CDC. (2024). *Acute Radiation Syndrome: Information for Clinicians*. <https://www.cdc.gov/radiation-emergencies/hcp/clinical-guidance/ars.html>

Ciottone, G. R., & Alexander, G. A. (2024). Nuclear and radiation disaster management. *Ciottone's Disaster Medicine* (pp. 492–497). Elsevier.

Claessens, M. (2023). *ITER: The Giant Fusion Reactor : Bringing a Sun to Earth* (Second edition ed.)10.1007/978-3-031-37762-4

Dorostkar, M. M., Rasouli, F. S., & Salehkoutahi, S. M. (2022). A simulation study on proton accelerator-based sources for BNCT of shallow tumors. *Progress in Nuclear Energy*, 153

Folgueiras Bertomeu, P. (2016). La entrevista.

Hernández Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación. 6ta edición, ISBN: 978-1-4562-2396-0. México DF: *Publicaciones De Mc Graw Hill Educación*,

IAEA. (2016). Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad: Requisitos de Seguridad Generales, Parte 3 N° GSR Part 3

IAEA. (2021). *¿Qué es la fusión y por qué es tan difícil de lograr?* <https://www.iaea.org/es/energia-de-fusion/que-es-la-fusion-y-por-que-es-tan-dificil-de-lograr>

IAEA. (2023). Neutron Monitoring for Radiation Protection

ICRP. (2007). Publicación 103 Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica

Instituto Tecnológico de Costa Rica. (2024). *Qué es el TEC.* <https://www.tec.ac.cr/que-es-tec>

Jiao, Y., Cao, F., & Liu, H. (2022). Radiation-induced cell death and its mechanisms. *Health Physics*, 123(5)

Kim, J. H. (2018). Three principles for radiation safety: time, distance, and shielding. *The Korean Journal of Pain*, 31(3), 145.

Kiyanagi, Y. (2021). Neutron applications developing at compact accelerator-driven neutron sources. *AAPPS Bulletin*, 31(1), 22.

Lozada, J. (2014). Investigación aplicada: Definición, propiedad intelectual e industria. *CienciaAmérica: Revista De Divulgación Científica De La Universidad Tecnológica Indoamérica*, 3(1), 47–50.

Mirfayzi, S. R., Gryaznevich, M., Lonsdale, O., Naylor, G., Takase, Y., & Kingham, D. (2024). Recent developments on plasma based neutron sources from microscopic innovations to meter-scale applications. *Japanese Journal of Applied Physics*,

OMS. (2023). *Efectos en la salud de las radiaciones ionizantes.* <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-and-health-effects>

Otto, T. (2021). *Safety for Particle Accelerators.* Springer Nature.

PGR. (2009). *Reglamento sobre protección contra radiaciones ionizantes N°24037-S.* http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=15464&nValor3=76357&strTipM=TC

Radia, I., & Rep, Y. (2012). Neutron generators for analytical purposes. *IAEA Radiation Technology Reports Series, ISSN, , 2225–8833.*

Rubin H. Landau, Manuel J. Páez, & Cristian C. Bordeianu. (2015). *Computational Physics: problem solving with python* (3ra ed.)

Talapko, J., Talapko, D., Katalinić, D., Kotris, I., Erić, I., Belić, D., Vasilj Mihaljević, M., Vasilj, A., Erić, S., & Flam, J. (2024). Health effects of Ionizing Radiation on the human body. *Medicina*, 60(4)

UNE. (2011). UNE-EN 31010 gestión del riesgo: Técnicas de apreciación del riesgo.

UNSCEAR. (2022). SOURCES, EFFECTS AND RISKS OF IONIZING RADIATION
United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation UNSCEAR
2020/2021 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes VOLUME IV
Scientific Annex D

World Health Organization. (2016). Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards. General safety requirements. Pt. 3 (Spanish Edition).

Wu, Y. (2017). *Fusion neutronics*. Springer.

Apéndice 1. Organigrama del Instituto Tecnológico de Costa Rica enfocado al Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones.

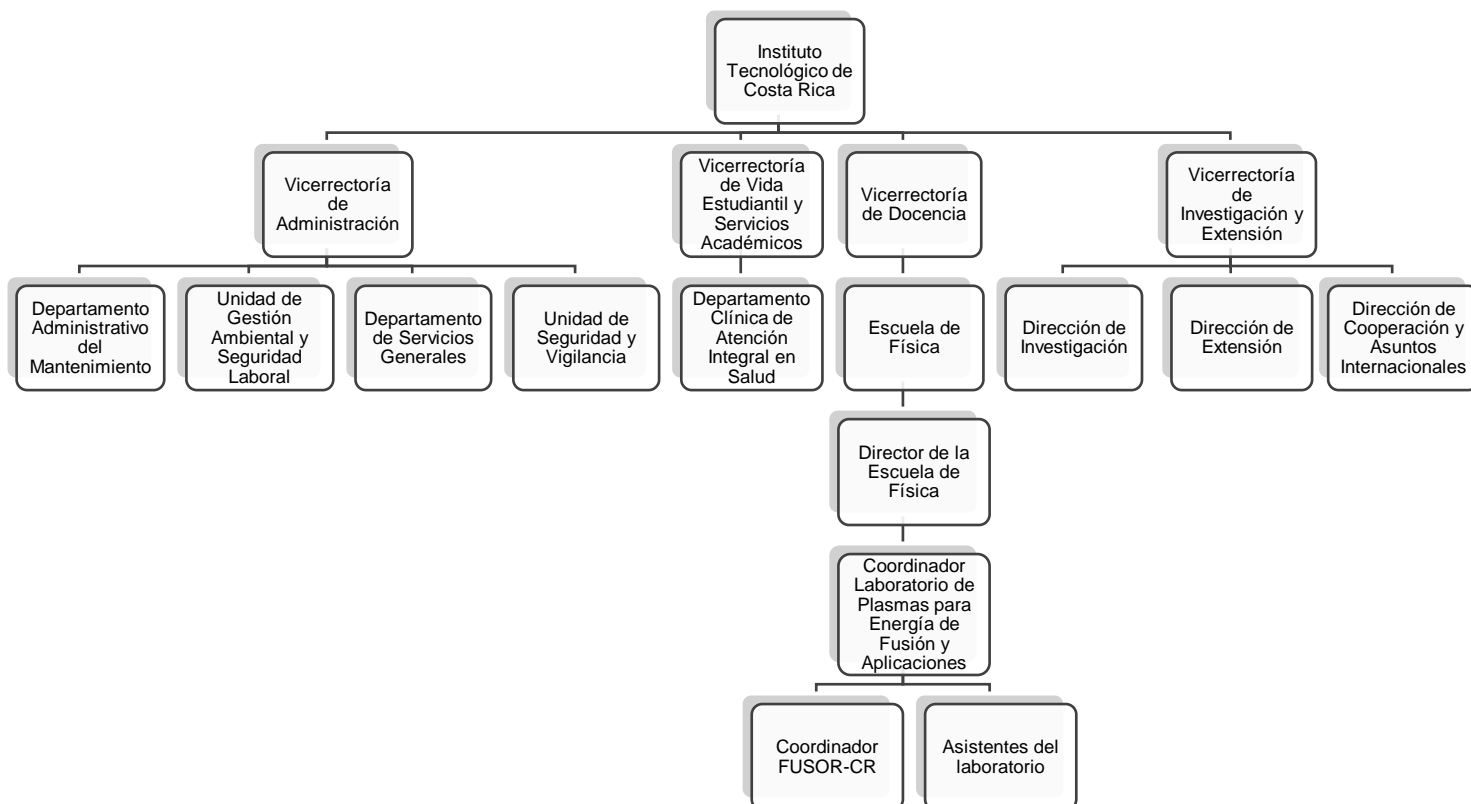


Figura 17. Organigrama del Instituto Tecnológico de Costa Rica enfocado al Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones, 2025

Apéndice 2. Encuesta higiénica

Objetivo: Evaluar el grado de preparación del laboratorio y del personal para la incorporación de un generador de radiaciones ionizantes, así como identificar las necesidades de seguridad radiológica y capacitación.

Datos Generales

1. *Nombre del colaborador:* _____
2. *Cargo/Posición:* _____
3. *Tiempo en el puesto:* _____
 - Menos de 6 meses
 - De 6 meses a 1 año
 - Más de 1 año
4. *¿Está el laboratorio diseñado y preparado para incorporar un generador de radiaciones ionizantes?*
 - Sí
 - No
 - En proceso
5. *¿El laboratorio dispone de un espacio específico y aislado para el generador de radiaciones ionizantes?*
 - Sí
 - No
6. *¿Están claras las normativas y reglamentaciones locales o nacionales sobre el uso de generadores de radiaciones ionizantes en el laboratorio?*
 - Sí
 - No
7. *¿Cuántas personas colaboran en el proyecto FUSOR-CR?*

Capacitación y Conocimiento del Personal

8. *¿El personal del laboratorio ha recibido capacitación en protección radiológica?*
- Sí
- No
9. *¿El personal ha sido entrenado específicamente sobre el manejo de generadores de radiaciones ionizantes?*
- Sí
- No
- Aún no
10. *¿Existen procedimientos establecidos de seguridad radiológica que el personal debe seguir antes, durante y después de la operación del generador de radiaciones?*
- Sí
- No
11. *¿El personal está familiarizado con el uso de equipos de protección personal (EPP) adecuado como delantales de plomo, guantes, gafas y dosímetros?*
- Sí
- No

Infraestructura y Equipos de Seguridad

12. *¿El generador de radiaciones ionizantes estará ubicado en una zona debidamente señalizada y restringida solo a personal autorizado?*

Sí

No

13. *¿El laboratorio dispone de barreras físicas (muros, pantallas, biombos, etc.) para evitar la exposición directa a la radiación?*

Sí

No

14. *¿Existen dispositivos de monitoreo de radiación ambiental (dosímetros de área, detectores de radiación) en el laboratorio?*

Sí

No

15. *¿El generador de radiaciones ionizantes contará con sistemas de protección de seguridad, como interbloqueos y apagado automático en caso de emergencia?*

Sí

No

Aún no lo sé

16. *¿Está previsto realizar mediciones periódicas de radiación en las áreas cercanas al generador de radiaciones ionizantes?*

Sí, de forma regular

Sí, de forma esporádica

No

Procedimientos y Protocolos

17. *¿Existen protocolos específicos para el manejo de emergencias en caso de exposición accidental a radiación?*

Sí

No

18. *¿Se ha realizado una simulación o simulacros para situaciones de emergencia?*

Sí

No

19. *¿El generador de radiaciones estará sometido a un plan de mantenimiento preventivo y revisiones periódicas?*

Sí

No

20. *¿Se realizará un control periódico sobre la calidad y eficacia del equipo de protección personal (EPP)?*

Sí

No

21. *¿Se conocen los parámetros de operación del FUSOR-CR?*

Sí, ¿Cuáles son? _____

No

22. *¿Cuántas horas al mes se espera que se utilice el FUSOR-CR para experimentos de fusión?*

Recomendaciones

23. *¿Qué áreas del laboratorio o del procedimiento requieren más atención antes de poner en funcionamiento el generador de radiaciones ionizantes?*

- Formación y capacitación del personal
- Infraestructura y barreras de seguridad
- Equipos de monitoreo y protección radiológica
- Procedimientos de emergencia y manejo de riesgos
- Otro: _____

24. *¿Alguna sugerencia adicional para mejorar la seguridad radiológica en el laboratorio?*

Apéndice 3. Diagnóstico de necesidades de capacitación

Tabla 11. Formato de diagnóstico de necesidades de capacitación

Preguntas para evaluación	Nivel de conocimiento (1-5)
Categoría 1	
Pregunta 1	
Pregunta 2	
Pregunta 3	
Categoría 2	
Pregunta 1	
Pregunta 2	
Pregunta 3	

Apéndice 4. Detalles de la simulación computacional

Para describir adecuadamente el comportamiento del plasma, es necesario comenzar por elegir un nivel de descripción específico. Cada modelo dentro de esta jerarquía resalta propiedades que van desde lo microscópico hasta lo macroscópico, dependiendo del enfoque del estudio. Los modelos más comunes en este contexto son los siguientes:

- **Modelo de partícula:** Este modelo describe el comportamiento del plasma a nivel individual de partículas, considerando las interacciones entre electrones, iones y otras partículas. Es útil para estudiar fenómenos a escalas muy pequeñas, donde las propiedades del plasma dependen de las trayectorias y colisiones de partículas individuales.
- **Modelo de distribución:** Este enfoque se centra en la distribución estadística de las partículas en el plasma, considerando cómo se distribuyen en términos de energía, velocidad o posición. Es útil para entender el comportamiento colectivo del plasma a partir de las propiedades estadísticas de las partículas.
- **Modelo de fluido:** Este modelo trata al plasma como un conjunto continuo de partículas, describiendo su comportamiento en términos de variables macroscópicas como la densidad, la velocidad y la temperatura, similar a los fluidos. Es ideal para estudiar plasmas en escalas grandes, donde los detalles microscópicos de las partículas individuales pueden ser menos relevantes.

En el contexto del proyecto, se ha seleccionado el modelo de partícula y para su descripción numérica se ha utilizado el método PIC (*Particle-in-Cell*), una técnica numérica que simula la interacción entre partículas cargadas y campos electromagnéticos. Su principio básico consiste en estimar para cada partícula simulada P_i su evolución temporal mediante la segunda Ley de Newton: $F_i = m_i a_i$, donde F_i es la fuerza total sobre la partícula, m_i es su masa y a_i es su aceleración, lo que permite calcular el movimiento de las partículas en función de las fuerzas que experimentan en el plasma.

La fuerza que experimenta cada en presencia de campos eléctricos y magnéticos se conoce como fuerza de Lorentz, y se expresa mediante la ecuación $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$, donde q es la carga de la partícula, \vec{E} es el campo eléctrico y \vec{v} la velocidad de la partícula y \vec{B} es el campo magnético. Estos campos, no son independientes entre sí, sino que están relacionados y gobernados por las ecuaciones de Maxwell, que se describen a continuación:

$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	Ley de Gauss para el campo eléctrico
$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$	Ley de Gauss para el campo magnético
$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	Ley de Faraday
$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	Ley de Ampère generalizada

Para los fines del presente proyecto, y bajo la suposición de un régimen electrostático, se considera que el campo magnético no tiene un impacto significativo en el sistema. En este contexto, la dinámica está dominada por el campo eléctrico, lo que permite simplificar las ecuaciones de Maxwell. En particular, la ley de Gauss para el campo eléctrico puede reducirse a la ecuación de Poisson, la cual se presenta a continuación como $\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$, donde ϕ es un campo escalar conocido como el potencial eléctrico (o voltaje), ρ es la densidad de carga y ϵ_0 es la permitividad eléctrica del vacío y tiene un valor de $8,854 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$. A partir de este potencial, se puede obtener el campo eléctrico mediante la relación $\vec{E} = -\nabla \phi$. Tomando en consideración los conceptos previamente expuestos, a continuación, se detallan los pasos que conforman el algoritmo de simulación desarrollado.

Solución de las ecuaciones de Maxwell

Para representar numéricamente el voltaje en el dominio de estudio, es necesario discretizar tanto el potencial eléctrico como sus derivadas espaciales. Para ello, se define una malla cartesiana sobre la región de interés, en la cual se evaluará el potencial eléctrico en un número finito de puntos nodales. Esta discretización permite aproximar la solución continua mediante un conjunto de valores definidos en la malla. Los valores del potencial en ubicaciones intermedias o fuera de los nodos definidos serán estimados posteriormente mediante técnicas de interpolación, lo que permite reconstruir una representación continua del campo a partir de datos discretos.

La técnica de discretización empleada para resolver la ecuación de Poisson es el método de diferencias finitas, el cual permite aproximar numéricamente las derivadas parciales de una función utilizando los valores que esta adquiere en nodos vecinos de la malla. Dependiendo de la ubicación del nodo y de los valores disponibles, se pueden utilizar distintas formulaciones. La más común es la diferencia central, que utiliza el nodo actual, el anterior y el siguiente. Esta aproximación es simétrica y resulta especialmente útil para los nodos internos de la malla, donde hay vecinos en ambas direcciones. Para los nodos ubicados en los bordes de la malla, donde no se cuenta con información en ambos sentidos, se recurre a las aproximaciones delantera y trasera: la diferencia finita trasera utiliza el nodo actual, el anterior y el subanterior; mientras que la diferencia finita delantera se basa en el nodo actual, el siguiente y el subsiguiente. Estas variantes permiten aproximar derivadas incluso en regiones donde los datos son limitados por las condiciones de frontera. A continuación, se presentan las expresiones utilizadas para aproximar la primera y la segunda derivada mediante diferencias finitas.¹

¹ En las expresiones, Δx representa la distancia entre nodos en la dirección x . Las ecuaciones son análogas para las direcciones y y z . Para evitar sobrecargar visualmente las expresiones, se indicará únicamente el índice n correspondiente a la dimensión en la que se calcula la diferencia.

$\frac{\partial \phi}{\partial x} \approx \frac{-3\phi_n + 4\phi_{n+1} - \phi_{n+2}}{2\Delta h}$	Diferencia delantera
$\frac{\partial \phi}{\partial x} \approx \frac{-\phi_{n-1} + \phi_{n+1}}{2\Delta h}$	Diferencia central
$\frac{\partial \phi}{\partial x} \approx \frac{\phi_{n-2} - 4\phi_{n-1} + 3\phi_n}{2\Delta h}$	Diferencia trasera
$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \approx \frac{\phi_n - 2\phi_{n+1} + \phi_{n+2}}{(\Delta h)^2}$	Diferencia delantera
$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \approx \frac{\phi_{n-1} - 2\phi_n + \phi_{n+1}}{(\Delta h)^2}$	Diferencia central
$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \approx \frac{\phi_{n-2} - 2\phi_{n-1} + \phi_n}{(\Delta h)^2}$	Diferencia trasera

Una vez definidas las expresiones de diferencias finitas para las derivadas, se procede a aplicarlas directamente sobre la ecuación de Poisson. Al sustituir las derivadas parciales por sus respectivas aproximaciones discretas, se obtiene una versión algebraica de la ecuación, expresada en términos de los valores del potencial eléctrico en los nodos de la malla, por ejemplo, para los nodos internos aplicando la diferencia central se obtiene lo siguiente:

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\Rightarrow \frac{\phi_{i-1jk} - 2\phi_{ijk} + \phi_{i+1jk}}{(\Delta x)^2} + \frac{\phi_{ij-1k} - 2\phi_{ijk} + \phi_{ij+1k}}{(\Delta y)^2} + \frac{\phi_{i-1jk} - 2\phi_{ijk} + \phi_{ijk+1}}{(\Delta z)^2} = -\frac{\rho_{ijk}}{\epsilon_0}$$

Resolviendo para ϕ_{ijk} obtenemos el siguiente resultado:

$$\phi_{ijk} \left(\frac{2}{(\Delta x)^2} + \frac{2}{(\Delta y)^2} + \frac{2}{(\Delta z)^2} \right) = \frac{\rho_{ijk}}{\epsilon_0} + \frac{\phi_{i-1jk} + \phi_{i+1jk}}{(\Delta x)^2} + \frac{\phi_{ij-1k} + \phi_{ij+1k}}{(\Delta y)^2} + \frac{\phi_{i-1jk} + \phi_{ijk+1}}{(\Delta z)^2}$$

$$\Rightarrow \phi_{ijk} = \frac{\left(\frac{\rho_{ijk}}{\epsilon_0} + \frac{\phi_{i-1jk} + \phi_{i+1jk}}{(\Delta x)^2} + \frac{\phi_{ij-1k} + \phi_{ij+1k}}{(\Delta y)^2} + \frac{\phi_{i-1jk} + \phi_{ijk+1}}{(\Delta z)^2} \right)}{\left(\frac{2}{(\Delta x)^2} + \frac{2}{(\Delta y)^2} + \frac{2}{(\Delta z)^2} \right)}$$

A partir del resultado anterior se obtiene un sistema de ecuaciones lineales que describe el comportamiento del potencial eléctrico en los nodos de la malla. Este sistema se cierra al incorporar las condiciones de frontera de Dirichlet, las cuales fijan los valores del potencial tanto en los bordes del dominio como en la región correspondiente al electrodo. Con el sistema completamente definido, es posible proceder a su resolución mediante técnicas numéricas, como el método de Gauss-Seidel con sobre relajación sucesiva (SOR), el cual se describe a continuación.

El método de Gauss-Seidel con sobre relajación sucesiva (SOR, por sus siglas en inglés) es una mejora del método iterativo de Gauss-Seidel, que incorpora un parámetro adicional ω , conocido como el factor de relajación. Este factor tiene como objetivo acelerar la convergencia del método cuando se elige adecuadamente ($1 < \omega < 2$), o bien mejorar su estabilidad cuando se selecciona un valor menor que 1. El procedimiento consiste en realizar primero una iteración convencional de Gauss-Seidel, obteniendo un valor provisional del potencial eléctrico ϕ_{ijk}^* (este valor es obtenido al evaluar la fórmula discretizada de ϕ_{ijk} con los valores conocidos de la iteración anterior). Luego, el valor actualizado del potencial se calcula mediante la expresión $\phi_{ijk} \leftarrow \phi_{ijk} + \omega(\phi_{ijk}^* - \phi_{ijk})$, lo que ajusta el avance de cada iteración con base en el nuevo valor calculado.

Una vez resuelto el sistema de ecuaciones y obtenidos los valores del potencial eléctrico en toda la malla, se procede a calcular el campo eléctrico en cada nodo. Para ello, se utilizan nuevamente las ecuaciones de diferencias finitas, esta vez aplicadas a la primera derivada del potencial eléctrico. Recordando que el campo eléctrico está relacionado con el potencial mediante la expresión $\vec{E} = -\nabla\phi = -\left\langle \frac{\partial\phi}{\partial x}, \frac{\partial\phi}{\partial y}, \frac{\partial\phi}{\partial z} \right\rangle$. De esta manera se finaliza esta etapa del algoritmo.

Cálculo de fuerza por partícula

Con los valores del campo eléctrico ya calculados en los nodos de la malla, el siguiente paso consiste en determinar el valor del campo en las posiciones específicas que ocupan las partículas, las cuales en general no coinciden exactamente con los nodos. Para ello, es necesario estimar el valor del campo eléctrico en puntos intermedios del dominio. Esta estimación se realiza mediante el algoritmo de interpolación trilineal, el cual permite obtener una aproximación precisa del campo en cualquier punto del espacio contenido dentro de una celda de la malla. A continuación, se describe el procedimiento de este método.

La interpolación trilineal es una extensión del concepto de interpolación lineal a tres dimensiones, y se utiliza para estimar el valor de una función escalar o vectorial en un punto interior de un cubo definido por una malla tridimensional. Al igual que en el caso unidimensional, este método se basa en polinomios de primer grado, lo que permite una interpolación de bajo costo computacional comparado con otros métodos. Para realizar la interpolación trilineal, se requiere conocer el valor de la función en los 8 vértices de la celda cúbica que encierra a la partícula.

El procedimiento puede entenderse como una secuencia de interpolaciones lineales: primero, se realiza una interpolación en el eje x entre pares de vértices del cubo, trasladando así los valores desde los vértices hacia un plano intermedio que contiene la posición de la partícula. Luego, se aplican interpolaciones en el eje y sobre los resultados anteriores, ajustando los valores hacia la línea que pasa por la proyección de la posición de la partícula. Finalmente, se interpola a lo largo del eje z , obteniendo así el valor estimado del campo eléctrico justo en la ubicación de la partícula, lo anterior se puede observar en la **Figura 18**.

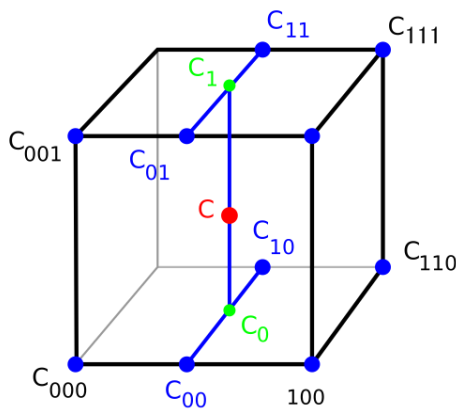


Figura 18. Interpolación trilineal. Fuente: Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3D_interpolation2.svg

Una vez que es posible evaluar el campo eléctrico en la posición exacta de cada partícula mediante la interpolación trilineal, se puede calcular la fuerza eléctrica que actúa sobre ellas. Recordando que la fuerza se determina utilizando la ley de Lorentz en su forma electrostática, expresada como $\vec{F}_i = q_i \vec{E}$. Esta fuerza constituye el insumo principal para la siguiente etapa del algoritmo, en la cual se integran las ecuaciones del movimiento para actualizar la posición y la velocidad de cada partícula en el tiempo.

Integración de las ecuaciones de movimiento

Para poder avanzar las partículas en el tiempo es necesario resolver, para cada una de ellas, la segunda ley de Newton, donde establece que la aceleración está dada por $\frac{\vec{F}_i}{m_i} = \vec{a}_i$. Esto implica resolver la ecuación $\frac{\vec{F}_i}{m_i} = \frac{d\vec{v}_i}{dt}$ junto con $\frac{d\vec{x}_i}{dt} = \vec{v}_i$, que describe la evolución temporal de la velocidad y la posición, respectivamente. A diferencia de la resolución de las ecuaciones de Maxwell, que pueden formularse en un esquema simétrico, en este caso el tiempo solo avanza hacia adelante, por lo que el uso de diferencias finitas centrales no es viable. Aplicarlas implicaría que el estado actual de la partícula dependería del estado futuro, lo cual contradice la causalidad y la estructura del problema. Por esta razón, se recurre a esquemas numéricos explícitos adecuados para sistemas dinámicos, como el método *Leapfrog*, que se describe a continuación.

El método Leapfrog (o método de rana saltante) es un esquema numérico explícito ampliamente utilizado para integrar ecuaciones de movimiento en sistemas dinámicos, especialmente en simulaciones de partículas, debido a su estabilidad y buena conservación de la energía en el tiempo. Su nombre proviene del hecho de que la posición y la velocidad "saltan" una sobre otra en el tiempo, ya que se evalúan en instantes desfasados por medio paso. En este método, las velocidades se actualizan en los instantes $t + \frac{\Delta t}{2}$, mientras que las posiciones se actualizan en los enteros $t + \Delta t$. El procedimiento general consiste en aplicar las siguientes ecuaciones:

$$\vec{a}_i = \frac{\vec{F}_i}{m_i} \Rightarrow \frac{q \cdot \vec{E}}{m_i}$$

$$v_{i+0,5} = v_{i-0,5} + \vec{a}_i \cdot \Delta t$$

$$\vec{x}_{i+1} = \vec{x}_i + \vec{v}_{i+0,5} \cdot \Delta t$$

Aplicación de las reacciones

Para iniciar la evaluación de las reacciones de fusión, se estima la cantidad esperada de eventos de fusión dentro de una celda utilizando el método *No Time Counter (NTC)*. Este método permite calcular el número de eventos de fusión N_g mediante la siguiente expresión:

$$N_g = \frac{N_1 N_2 (\sigma v_{rel})_{\max} \Delta t}{2V}$$

En esta fórmula:

- N_1 y N_2 representan la cantidad de partículas de cada especie presentes en la celda.
- $(\sigma v_{rel})_{\max}$ es el valor máximo del producto entre la sección transversal de fusión σ y la velocidad relativa v_{rel} entre las partículas.
- V es el volumen de la celda.
- Δt es la duración de cada paso de la simulación.

El término σv_{rel} , conocido como reactividad de fusión, representa la probabilidad de ocurrencia de una reacción de fusión. La sección transversal σ depende de la energía en el sistema del centro de masa, la cual se calcula como:

$$E = \frac{1}{2} m_r v_{rel}^2$$

Donde:

- $v_{rel} = |v_1 - v_2|$ es la magnitud de la velocidad relativa
- $m_r = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$ es la masa reducida del sistema

Los valores de σ pueden obtenerse a partir de datos semiempíricos tabulados, disponibles en bases de datos especializadas, como la base de datos de reacciones nucleares de la IAEA.

Una vez estimado el número de eventos de fusión a simular, se procede a seleccionar aleatoriamente pares de partículas dentro de cada celda. Para cada par, se calcula el cociente de probabilidades P , dado por:

$$P = \frac{\sigma v_{rel}}{(\sigma v_{rel})_{\max}}$$

Este valor se compara con una variable aleatoria R , distribuida uniformemente entre 0 y 1. Si $P > R$, se considera que la reacción de fusión ha ocurrido para ese par de partículas.

Cálculo de densidad de carga

En esta etapa de la simulación es necesario estimar la densidad de carga. Esta se define como la suma de las cargas dentro de una región, dividida entre el volumen de la celda que las contiene. No obstante, dado que nos interesa conocer el campo eléctrico en los nodos, también es necesario calcular la densidad de carga en dichos puntos. Para ello, se asigna un volumen centrado en cada nodo. En una malla cartesiana, el volumen de una celda está dado por $V = \Delta x \Delta y \Delta z$; sin embargo, cuando se trata de nodos ubicados en la frontera del dominio, el volumen asignado se reduce en un factor de $\frac{1}{2}$ por cada cara

que coincide con el límite del dominio. Una vez determinado el volumen asociado a cada nodo, se puede depositar la carga de cada partícula mediante el algoritmo de interpolación previamente descrito.

Con la aplicación de estos pasos se completa una iteración del proceso de simulación, el cual se repite hasta alcanzar el número de ciclos establecidos. Una vez finalizada cada iteración, se procede a estimar la dosis de radiación recibida por los trabajadores. Para ello, se utilizó el código de simulación OpenMC, una herramienta de Monte Carlo especializada en transporte de partículas, particularmente neutrones y fotones. Este código permite modelar la interacción de la radiación con la materia, permitiendo estimar cantidades físicas como el flujo, la tasa de reacción y la dosis absorbida. El proceso de simulación se dividió en tres etapas principales: la definición de materiales, la definición de la geometría del sistema, y finalmente, la configuración y ejecución del cálculo de dosis, que se describe a continuación.

Definición de los materiales

El primer paso consiste en definir los materiales presentes en el entorno de simulación, especificando su composición isotópica y densidad. En OpenMC, cada material se define indicando las fracciones molares o másicas de los isótopos que lo componen, así como su densidad total (en g/cm^3).

La simulación considera la estimación de dosis absorbida en un cuerpo humano, el cual se representa mediante un fantasma cilíndrico sólido de tejido equivalente. Para ello, es necesario definir las propiedades del material que compone dicho cuerpo, ya que la interacción de los neutrones con la materia depende directamente de la composición elemental y la densidad del medio.

Definición de la geometría

La geometría se refiere a la representación espacial de los materiales y regiones dentro del modelo de simulación de transporte de partículas, esta define cómo está estructurado físicamente el sistema que se está modelando. En OpenMC se utiliza una representación basada en geometría sólida constructiva (GSC) esto significa que la geometría se construye combinando formas simples (como planos, cilindros, esferas, etc.) mediante operaciones booleanas (unión, intersección, diferencia), sin embargo, también es posible incluir modelos CAD complejos.

Cálculo de dosis

Una vez definida la geometría del modelo y las condiciones de la fuente, el siguiente paso en la simulación consiste en determinar la dosis efectiva anual absorbida por un cuerpo humano modelado como un cilindro sólido de tejido equivalente. Esta dosis se calcula en función de la distancia entre la fuente de neutrones y el cuerpo, con el objetivo de evaluar los niveles de exposición radiológica bajo distintas condiciones de ubicación.

En primer lugar, se determina el volumen del cilindro que representa al cuerpo humano. Esta estimación es necesaria debido a que los resultados de la simulación, expresados inicialmente en unidades de pSv·cm³/neutrón, deben convertirse posteriormente en dosis por segundo y, finalmente, en dosis anual por unidad de volumen.

Posteriormente, se incorporan al modelo los coeficientes de dosis efectivos proporcionados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), los cuales están tabulados en función de la energía de los neutrones y la geometría de irradiación (en esta simulación, se adopta la geometría anteroposterior, que asume que la radiación incide sobre el cuerpo desde el frente). Estos coeficientes permiten convertir

el flujo de partículas en una estimación de dosis absorbida en unidades de Sieverts, ponderando el impacto biológico según la energía incidente.

Para aplicar estos coeficientes en la simulación, se utiliza un filtro de función de energía que asocia cada intervalo de energía con su correspondiente factor de conversión. Este filtro se configura para interpolar de forma cúbica entre los puntos tabulados, tal como lo recomienda la propia ICRP para garantizar una mayor fidelidad en la estimación.

Adicionalmente, se emplean filtros específicos que restringen el cálculo de la dosis a partículas del tipo neutrón y a la región del modelo correspondiente al cuerpo humano (la célula cilíndrica). A continuación, se define un *tally* (una estructura de acumulación de datos dentro de OpenMC) que cuantifica el flujo de neutrones en dicha célula, aplicando los filtros definidos previamente y computando la dosis mediante los coeficientes energéticos establecidos.

Una vez configurado el modelo completo, se ejecuta la simulación para el caso particular de una fuente fija, con un flujo isotrópico de neutrones. Tras completarse la simulación, se accede al archivo de salida (statepoint) para recuperar el valor medio del recuento de dosis.

Este valor se multiplica por la tasa real de emisión de neutrones de la fuente (resultado de la simulación del plasma) para obtener la dosis total por segundo. A continuación, se normaliza dividiendo por el volumen del cilindro, y se aplican los factores de conversión necesarios: de pico a miliSieverts y de segundos a años, obteniendo así la dosis efectiva anual en miliSieverts por año (mSv/año) para una persona ubicada a la distancia correspondiente.

Este procedimiento se repite para cada distancia evaluada, almacenando los resultados para su posterior análisis comparativo con los límites anuales de exposición establecidos para trabajadores ocupacionalmente expuestos.

Apéndice 5. Análisis de modos de falla y efectos

Tabla 12. Escala de severidad de modos de falla

Escala de severidad		
Efecto	Severidad del efecto	Puntaje
Crítico - Sin advertencia	Produce fallas catastróficas, daños importantes o pérdida del sistema sin previo aviso	10
Crítico - Con advertencia	Provoca fallas catastróficas, daños importantes o pérdida del sistema con aviso	9
Importante	Provoca fallas significativas del sistema, pérdida de funciones o insatisfacción del cliente	8
Alta	Provoca una degradación notable del rendimiento o problemas de seguridad	7
Moderada	Provoca una reducción moderada de la funcionalidad o problemas menores para el cliente	6
Baja	Provoca una ligera reducción del rendimiento, pero el producto sigue funcionando	5
Muy baja	Provoca problemas menores, como pequeñas ineficiencias, sin impacto en el cliente	4
Leve	Provoca defectos de diseño insignificantes sin impacto real en el rendimiento	3
Muy leve	No produce problemas de diseño notables, pero podría implicar pequeños ajustes	2
Ninguna	No provoca ningún efecto en el rendimiento o la seguridad	1

Tabla 13. Escala de Ocurrencia de los modos de falla

Escala de Ocurrencia		
Probabilidad de falla	Frecuencia de la falla	Puntaje
Frecuente	El problema ocurre más de una vez por operación	10
Muy alta	El problema ocurre en la mayoría de las operaciones	9
Alta	El problema ocurre en aproximadamente 1 de cada 10 operaciones	8
Significativa	El problema ocurre en 1 de cada 20 operaciones	7
Moderada	El problema ocurre en aproximadamente 1 de cada 100 operaciones	6
Baja	El problema ocurre en aproximadamente 1 de cada 400 operaciones	5
Poco común	El problema ocurre en aproximadamente 1 de cada 1000 operaciones	4
Muy baja	El problema ocurre en 1 de cada 5000 operaciones	3
Rara	El problema ocurre en 1 de cada 10 000 operaciones	2
Extremadamente rara	El problema ocurre solo en casos excepcionales	1

Tabla 14. Escala de detección de los modos de falla

Escala de Detección		
Probabilidad de detección	Probabilidad de detectar una falla	Puntaje
Casi imposible	Ningún control de diseño actual puede detectar la falla	10
Extremadamente remoto	Probabilidad de detección muy remota	9
Remoto	Probabilidad de detección remota	8
Muy bajo	Probabilidad de detección baja	7
Bajo	Probabilidad de detección pequeña	6
Moderado	Probabilidad de detección moderada	5
Moderadamente alto	Probabilidad de detección moderadamente alta	4
Alto	Probabilidad de detección alta	3
Muy alto	Probabilidad de detección muy alta	2
Casi seguro	Probabilidad de detección casi segura	1

Apéndice 6. Respuestas de la encuesta higiénica

Objetivo: Evaluar el grado de preparación del laboratorio y del personal para la incorporación de un generador de radiaciones ionizantes, así como identificar las necesidades de seguridad radiológica y capacitación.

Datos Generales

1. *Nombre del colaborador:* Francisco Javier Núñez Murillo
2. *Cargo/Posición:* Coordinador del proyecto
3. *Tiempo en el puesto:*
 - Menos de 6 meses
 - De 6 meses a 1 año
 - Más de 1 año
4. *¿Está el laboratorio diseñado y preparado para incorporar un generador de radiaciones ionizantes?*
 - Sí
 - No
 - En proceso
5. *¿El laboratorio dispone de un espacio específico y aislado para el generador de radiaciones ionizantes?*
 - Sí
 - No
6. *¿Están claras las normativas y reglamentaciones locales o nacionales sobre el uso de generadores de radiaciones ionizantes en el laboratorio?*
 - Sí
 - No
7. *¿Cuántas personas colaboran en el proyecto FUSOR-CR?*
Actualmente participan 6 personas en el proyecto.

Capacitación y Conocimiento del Personal

8. *¿El personal del laboratorio ha recibido capacitación en protección radiológica?*
- Sí
- No
9. *¿El personal ha sido entrenado específicamente sobre el manejo de generadores de radiaciones ionizantes?*
- Sí
- No
- Aún no
10. *¿Existen procedimientos establecidos de seguridad radiológica que el personal debe seguir antes, durante y después de la operación del generador de radiaciones?*
- Sí
- No
11. *¿El personal está familiarizado con el uso de equipos de protección personal (EPP) adecuado como delantales de plomo, guantes, gafas y dosímetros?*
- Sí
- No

Infraestructura y Equipos de Seguridad

12. *¿El generador de radiaciones ionizantes estará ubicado en una zona debidamente señalizada y restringida solo a personal autorizado?*

Sí

No

13. *¿El laboratorio dispone de barreras físicas (muros, pantallas, biombos, etc.) para evitar la exposición directa a la radiación?*

Sí

No

14. *¿Existen dispositivos de monitoreo de radiación ambiental (dosímetros de área, detectores de radiación) en el laboratorio?*

Sí

No

15. *¿El generador de radiaciones ionizantes contará con sistemas de protección de seguridad, como interbloques y apagado automático en caso de emergencia?*

Sí

No

Aún no lo sé

16. *¿Está previsto realizar mediciones periódicas de radiación en las áreas cercanas al generador de radiaciones ionizantes?*

Sí, de forma regular

Sí, de forma esporádica

No

Procedimientos y Protocolos

17. *¿Existen protocolos específicos para el manejo de emergencias en caso de exposición accidental a radiación?*

Sí

No

18. *¿Se ha realizado una simulación o simulacros para situaciones de emergencia?*

Sí

No

19. *¿El generador de radiaciones estará sometido a un plan de mantenimiento preventivo y revisiones periódicas?*

Sí

No

20. *¿Se realizará un control periódico sobre la calidad y eficacia del equipo de protección personal (EPP)?*

Sí

No

21. *¿Se conocen los parámetros de operación del equipo (presión, voltaje, etc)?*

Sí, ¿cuáles son?

Presión: entre 10^{-6} a 10^{-3} Torr

Voltaje 65 kV máx.

Corriente: 0,5 mA máx.

No

22. *¿Cuántas horas al mes se espera que se utilice el FUSOR-CR para experimentos de fusión?*

La verdad es que nunca se ha contemplado una cantidad específica de horas, ya que creo que depende de la utilidad que se le vaya a dar al FUSOR-CR en los experimentos. Sin embargo, no creo que se utilice más de una vez a la semana. En caso de que se esté realizando un experimento o investigación, podría ser necesario usarlo, pero en otras circunstancias puede que ni siquiera se utilice durante todo el mes. Si hablamos de un uso mínimo, podría ser de una vez al mes, por ejemplo, unas 2 horas de forma intermitente. El máximo que se podría estimar sería una vez a la semana, con una duración de alrededor de 1 o 2 horas, pero ya muy excepcionalmente.

Recomendaciones

23. *¿Qué áreas del laboratorio o del procedimiento requieren más atención antes de poner en funcionamiento el generador de radiaciones ionizantes?*

- Formación y capacitación del personal
- Infraestructura y barreras de seguridad
- Equipos de monitoreo y protección radiológica
- Procedimientos de emergencia y manejo de riesgos
- Otro: _____

24. *¿Alguna sugerencia adicional para mejorar la seguridad radiológica en el laboratorio?*

Creo pertinente contar con revisiones periódicas realizadas por un ente competente que proporcione retroalimentación sobre las habilidades a desarrollar, como la capacitación y formación del personal. Además, se deben llevar a cabo inspecciones regulares de la calidad y fecha de caducidad de los equipos de monitoreo y protección radiológica, así como de los procedimientos de emergencia.

Apéndice 7. Acciones recomendadas a partir del análisis de modos de falla y efectos

Tabla 15. Acciones recomendadas

Modo de falla	Acciones recomendadas
Desajuste entre voltaje, corriente y presión	<p>Entrenar al personal para que adquiriera la habilidad de equilibrar correctamente voltaje, corriente y presión de forma continua. Implementar un sistema de monitoreo constante que mida las tres variables y alerte sobre cualquier desajuste. Utilizar sistemas de control automático para regular las variables de acuerdo con las necesidades del proceso. Realizar ajustes pequeños e incrementales en las tres variables en lugar de cambios bruscos.</p>
Inestabilidad del plasma	<p>Implementar un control automático suave que ajuste las variables lentamente, manteniendo un equilibrio constante en la fusión. Monitorear en tiempo real la estabilidad del plasma mediante sensores que detecten cualquier fluctuación. Ajustar las condiciones de fusión con pequeños incrementos en voltaje, corriente y presión para evitar perturbaciones en el plasma. Capacitar al operador en cómo reconocer señales de inestabilidad y cómo corregirlas rápidamente.</p>
Inestabilidad en la presión de la cámara	<p>Verificar y calibrar el sistema de control de presión antes de la operación. Realizar mantenimiento preventivo en las válvulas y conexiones del sistema de vacío para asegurar que funcionen correctamente. Monitorear la presión en tiempo real durante todo el proceso de operación y asegurarse de que se mantenga dentro de los límites ideales. Instalar sensores de presión y configurar alarmas para alertar sobre fluctuaciones fuera de rango.</p>
Sobrecarga de corriente	<p>Establecer límites de corriente automáticos que reduzcan el voltaje si la corriente se incrementa demasiado. Monitorear la corriente constantemente con sensores para detectar aumentos repentinos. Ajustar el voltaje y la presión de manera gradual para evitar picos de corriente. Implementar sistemas de protección que desconecten el sistema si la corriente excede el límite máximo preestablecido.</p>
Fallos en válvulas de control	<p>Realizar pruebas periódicas de funcionamiento de las válvulas. Implementar sistemas redundantes de válvulas de control para reducir el riesgo de fallo. Reemplazar las válvulas manuales por electroválvulas.</p>

Modo de falla	Acciones recomendadas
	Capacitar al personal en el mantenimiento y ajuste correcto de las válvulas.
Fugas de aire	Reemplazar o mejorar los sellos y juntas de la cámara con materiales de mayor durabilidad y resistencia. Asegurar un adecuado mantenimiento de los componentes críticos (válvulas, conexiones, etc.). Capacitar al personal en la correcta instalación y manejo de las juntas y válvulas.
Mal funcionamiento de alguna bomba	Implementar un programa de mantenimiento preventivo regular para revisar la bomba y sus componentes (motor, rotors, filtros). Instalar un sistema de monitoreo en tiempo real de la bomba, que pueda detectar cualquier variación en el rendimiento antes de que se convierta en un problema mayor.
Obstrucción de en una bomba	Instalar filtros para evitar la entrada de partículas o residuos al sistema de vacío. Asegurar una limpieza regular de la bomba y los conductos. Capacitar al personal para identificar y manejar adecuadamente los materiales que podrían obstruir la bomba.
Sobrecarga de la bomba de vacío	Implementar un sistema de monitoreo continuo para detectar sobrecargas en tiempo real y lograr tomar medidas correctivas a tiempo. Capacitar al personal para identificar signos de sobrecarga en la bomba y tomar medidas preventivas.
Arcos eléctricos entre el electrodo y la cámara de vacío	Asegurar que los electrodos estén fabricados con materiales resistentes a altas temperaturas y con capacidad para soportar las condiciones de operación. Ajustar el voltaje y la corriente gradualmente para evitar la formación de arcos eléctricos no deseados entre el electrodo y la cámara. Revisar las conexiones de los electrodos para asegurarse de que estén bien alineadas y sin posibilidad de cortocircuitos o arcos. Implementar protección adicional en los electrodos, como sistemas de aislamiento o blindaje, para evitar daños debido a arcos eléctricos.
Ionización prematura	Ajustar el voltaje de manera controlada y gradual para evitar que se alcance el punto de ionización prematura. Verificar las condiciones de presión de la cámara y mantenerlas lo suficientemente bajas para evitar la formación de plasma antes de tiempo. Usar un sistema de control automático de presión y temperatura para mantener condiciones estables y evitar la ionización inesperada.
Sobrecalentamiento de los	Asegurar que el sistema de enfriamiento esté funcionando correctamente. Monitorear las temperaturas de los componentes críticos en

Modo de falla	Acciones recomendadas
componentes eléctricos	<p>tiempo real para detectar cualquier aumento de temperatura fuera de rango.</p> <p>Ajustar los parámetros de operación (voltaje, corriente) si es necesario para mantener las temperaturas dentro de los límites seguros.</p> <p>Realizar mantenimiento preventivo regular en la fuente de alimentación y otros componentes eléctricos para evitar sobrecalentamientos.</p> <p>Implementar sensores para detectar el sobrecalentamiento de los componentes eléctricos</p>
Daño a la fuente de alimentación por aumento rápido de la corriente	<p>Establecer límites automáticos de corriente que permitan reducir el voltaje si la corriente aumenta demasiado rápido.</p> <p>Monitorear la corriente de forma continua durante todo el proceso de inyección de gas.</p> <p>Implementar un sistema de protección en la fuente de alimentación que se active en caso de aumento excesivo de corriente.</p>
Inyección de gas no homogénea	<p>Calibrar y mantener los reguladores de presión y flujo de gas para garantizar un suministro constante y controlado.</p> <p>Monitorear y mantener la presión constante durante todo el proceso de inyección de gas, utilizando sensores precisos.</p> <p>Implementar un sistema de regulación de presión que minimice las fluctuaciones en la inyección de gas.</p>
Inyección excesiva de gas	<p>Instalar reguladores de flujo de gas precisos para asegurar que la inyección sea lenta y controlada.</p> <p>Monitorear en tiempo real la presión y el flujo del gas con sensores de alta precisión.</p> <p>Capacitar al personal en la regulación precisa del flujo de gas y en los procedimientos adecuados.</p> <p>Implementar alarmas de presión para alertar al operador si la presión excede los niveles seguros.</p>
Apagado no secuencial del sistema de vacío	<p>Capacitación de los operadores acerca del proceso correcto de apagado de las bombas.</p> <p>Sistemas de control que prohíban la secuencia incorrecta de apagado.</p>
No detener la inyección de gas	<p>Verificar manualmente la válvula de gas después de detener la inyección.</p> <p>Implementar un sistema de control automatizado que cierre la válvula de gas al iniciar el apagado.</p> <p>Entrenar al personal para que realice una revisión final del sistema de gas antes de apagar el equipo.</p>
No reducción de voltaje de la fuente de alta tensión	<p>Incorporar un control automatizado para reducir gradualmente el voltaje según la secuencia del apagado.</p> <p>Monitorear continuamente el voltaje durante todo el procedimiento de apagado.</p>

Modo de falla	Acciones recomendadas
	Entrenar al personal sobre la importancia de reducir el voltaje de forma progresiva y verificar que se haya realizado correctamente.

Apéndice 8. Resultados del diagnóstico de necesidades de capacitación

Tabla 16. Puntajes obtenidos en el diagnóstico de necesidades de capacitación.

Preguntas para evaluación	Nivel de conocimiento (1 - 5)
Base de planificación para situaciones de exposición de emergencia	1,7
Puedo describir algunos accidentes importantes y explicar las lecciones aprendidas.	2,0
Puedo describir los diferentes tipos de accidente radiológico.	1,3
Puedo explicar los principios generales de protección contra situaciones de exposición de emergencia.	1,7
Puedo resumir los requisitos básicos para situaciones de exposición de emergencia.	1,7
Cálculos y mediciones radiométricas y dosimétricas	1,5
Comprendo cómo varía la tasa de dosis de radiación con la distancia a fuentes de diferentes geometrías.	1,3
Puedo aplicar la ley del inverso del cuadrado para emisiones de radiación desde una fuente puntual.	2,7
Puedo describir los problemas potenciales de exposición asociados con la radiación dispersa y el fenómeno de <i>skyshine</i> .	1,0
Sé aplicar los conceptos de atenuación y <i>build-up</i> en escenarios prácticos de protección radiológica.	1,3
Tengo conocimientos sobre el cálculo de dosis de neutrones en distintos escenarios.	1,0
Cantidades y unidades	1,9

Preguntas para evaluación	Nivel de conocimiento (1 - 5)
Comprendo las cantidades dosimétricas exposición, <i>kerma</i> y dosis absorbida, así como sus unidades asociadas.	2,3
Puedo describir y diferenciar las cantidades dosis equivalente, dosis efectiva, dosis comprometida y dosis efectiva comprometida.	1,7
Puedo explicar los conceptos de campo de radiación y fluencia.	2,3
Sé aplicar las cantidades operacionales de equivalente de dosis ambiental, direccional y personal.	1,3
Efectos de la radiación a nivel molecular y celular	3,3
Comprendo el ciclo celular y el proceso de división celular.	4,3
Comprendo las fases evolutivas del daño inducido por la radiación en un organismo.	3,0
Conozco los mecanismos por los cuales la radiación ionizante daña el ADN y los principales tipos de daño.	3,3
Puedo describir la estructura del ADN y los cromosomas.	4,3
Puedo describir los procesos de reparación del ADN.	1,7
Puedo explicar el concepto y la estructura de las células.	4,7
Puedo explicar los factores que influyen en la radiosensibilidad celular y de órganos/tejidos.	1,7
Efectos deterministas	1,3
Comprendo las dos principales categorías de efectos de la radiación ionizante en la fisiología gastrointestinal.	1,3

Preguntas para evaluación	Nivel de conocimiento (1 - 5)
Comprendo los factores que influyen en la sensibilidad a la radiación.	1,3
Comprendo qué caracteriza al Síndrome Cutáneo por Radiación (CRS).	1,0
Puedo definir las reacciones tisulares y distinguir entre reacciones tempranas y tardías en tejidos y órganos.	1,3
Puedo describir las causas del Síndrome Agudo por Radiación (ARS) y cómo se caracteriza.	1,3
Puedo explicar el concepto de exposición localizada a radiación y sus posibles consecuencias.	1,7
Puedo listar los principales Síndromes Agudos por Radiación.	1,0
Puedo resumir las disfunciones cardio-neurovasculares en la irradiación letal.	1,0
Tengo conocimientos sobre la hematopoyesis y la influencia de la radiación ionizante en el sistema hematopoyético.	2,0
Efectos en el embrión y el feto	2,2
Comprendo los posibles efectos de la exposición prenatal a la radiación ionizante.	2,3
Puedo resumir la embriología básica y la variación en la sensibilidad del embrión y el feto a la radiación en diferentes etapas del desarrollo.	2,0
Efectos hereditarios estocásticos	1,6
Puedo explicar la diferencia entre efectos somáticos y hereditarios de la exposición a la radiación ionizante y	1,3

Preguntas para evaluación	Nivel de conocimiento (1 - 5)
describir las fuentes de datos para los efectos hereditarios	
Puedo resumir las causas de los efectos hereditarios inducidos por la radiación ionizante.	2,0
Tengo conocimientos sobre los coeficientes de riesgo de efectos hereditarios y las fuentes de datos apropiadas.	1,3
Efectos somáticos estocásticos	1,7
Comprendo las etapas tempranas y los mecanismos de la oncogénesis, así como las principales fuentes de datos sobre los efectos de la exposición a la radiación en humanos	2,0
Puedo explicar el concepto de factor de riesgo en radiación ionizante.	1,7
Puedo explicar qué es un efecto estocástico de la radiación ionizante y resumir el riesgo relativo de carcinogénesis.	1,3
El concepto de detrimento radiológico	1,2
Comprendo los componentes del detrimento para la salud asociados con los efectos estocásticos de la radiación ionizante.	1,3
Conozco los límites actuales de dosis para exposición ocupacional y pública, así como el fundamento de los valores establecidos.	1,0
Puedo explicar los conceptos de factor de ponderación tisular, dosis efectiva y dosis colectiva.	1,3
Estrategias de protección en situaciones de exposición de emergencia	1,5

Preguntas para evaluación	Nivel de conocimiento (1 - 5)
Puedo aplicar la metodología para determinar las categorías de amenaza de las prácticas.	1,7
Puedo describir la Escala Internacional de Eventos Nucleares (INES).	1,3
Puedo describir la estructura general recomendada para una organización de respuesta ante emergencias nucleares y radiológicas.	1,3
Puedo explicar los conceptos de áreas y zonas de planificación ante emergencias.	1,7
Estudios epidemiológicos y consideraciones	1,0
Comprendo los parámetros epidemiológicos utilizados en los estudios de radiación.	1,0
Puedo explicar cómo se usa la epidemiología en la protección radiológica.	1,0
Evaluación de la exposición ocupacional debido a fuentes externas de radiación	2,0
Puedo describir los diferentes tipos de dosímetros personales y bajo qué circunstancias cada uno es adecuado.	1,3
Puedo describir los principios básicos del monitoreo en el lugar de trabajo y determinar los métodos de monitoreo adecuados	1,7
Puedo describir los procedimientos de calibración, pruebas y requisitos de los instrumentos de protección radiológica.	2,0
Puedo especificar las técnicas de medición que se pueden utilizar en dosimetría en caso de accidentes.	2,0

Preguntas para evaluación	Nivel de conocimiento (1 - 5)
Puedo explicar los conceptos de precisión aceptable e incertidumbre y aplicarlos en la determinación de incertidumbres y	3,0
Puedo identificar situaciones en las que los resultados del dosímetro pueden no proporcionar una estimación adecuada de la dosis.	1,3
Puedo interpretar los resultados de un dosímetro.	2,3
Evaluación de la exposición ocupacional debido a la ingesta de radionucleidos	1,1
Puedo describir los principios y criterios utilizados para determinar la necesidad de monitoreo para la evaluación de expo	1,0
Puedo describir los principios y limitaciones del monitoreo indirecto y seleccionar las técnicas de medición y métodos de	1,3
Puedo evaluar la información proporcionada por un dosímetro o una medición de ingesta, identificando exposiciones inusualmente altas y determinando las acciones necesarias	1,3
Puedo explicar los principios y técnicas utilizadas para la medición directa de material radiactivo depositado en el cuerpo	1,0
Puedo resumir los principios involucrados en el desarrollo y uso de modelos biosintéticos, así como la necesidad de modelos	1,0
Fuentes de radiación	2,9
Comprendo los criterios básicos para la construcción de fuentes alfa, beta y gamma.	1,3

Preguntas para evaluación	Nivel de conocimiento (1 - 5)
Conozco aplicaciones de fuentes radiactivas en la industria, la medicina y la investigación.	4,0
Identifico el uso de sustancias radiactivas no selladas en medicina y sus métodos de producción.	3,0
Puedo describir los diferentes tipos de reactores nucleares y sus características principales.	2,7
Puedo listar fuentes naturales de radiación (radionucleidos terrestres, radiación cósmica) y los mecanismos de exposición al radón-222.	3,3
Fundamentos básicos de física y matemáticas aplicadas a la protección radiológica	3,7
Comprendo el concepto de fisión y fusión nuclear.	4,3
Comprendo el concepto de isótopos de un elemento específico.	5,0
Conozco la estructura del átomo y los constituyentes del núcleo.	5,0
Conozco la unidad de radiactividad, el concepto de vida media y la ley del decaimiento radiactivo.	4,0
Conozco los mecanismos de producción de radiación de frenado (<i>bremsstrahlung</i>) y radiación característica de rayos X.	2,3
Distingo las diferencias entre radiación gamma y rayos X.	4,0
Entiendo los conceptos de equilibrio secular y equilibrio transitorio en series de decaimiento.	2,3
Identifico los modos de decaimiento radiactivo y los tipos de radiación emitida (alfa, beta, positrón, gamma).	3,3

Preguntas para evaluación	Nivel de conocimiento (1 - 5)
Puedo describir el proceso de ionización y los mecanismos por los cuales un átomo se ioniza.	4,7
Puedo identificar cómo los átomos se agrupan en elementos según su número atómico y su disposición en la tabla periódica	4,7
Puedo resumir las propiedades de los neutrones y su importancia en la protección radiológica.	3,3
Sé cómo aplicar métodos estadísticos adecuados en situaciones de protección radiológica.	1,7
Habilidades Analíticas	4,3
Evalúo la efectividad de mis decisiones basadas en análisis previos.	4,3
He recibido suficiente formación en pensamiento crítico o resolución de problemas.	4,3
Me siento cómodo/a interpretando datos numéricos o gráficos.	4,3
Puedo analizar datos o información para tomar decisiones acertadas.	4,3
Sé cómo actuar cuando tengo información incompleta para resolver un problema.	4,7
Utilizo métodos efectivos para resolver problemas complejos en mi cotidianidad.	4,0
Habilidades de Comunicación	4,7
Expreso mis ideas de manera clara y concisa en reuniones o presentaciones.	4,7
He recibido suficiente formación en comunicación efectiva	4,7

Preguntas para evaluación	Nivel de conocimiento (1 - 5)
Manejo eficazmente los conflictos o malentendidos en el trabajo.	4,3
Me siento cómodo/a explicando conceptos técnicos o complejos a otras personas	4,7
Puedo adaptar mi forma de comunicarme según el público al que me dirijo.	5,0
Habilidades de Interfaz Persona-Máquina	3,4
Considero que las herramientas digitales que utilizo podrían mejorar en términos de usabilidad y comodidad.	2,3
Encuentro intuitivos y fáciles de usar los sistemas con los que trabajo.	4,3
Interactúo con software, sistemas de control o interfaces digitales en mi día a día.	4,3
Me adapto fácilmente a nuevas tecnologías o herramientas digitales.	4,7
Me resulta difícil interactuar con sistemas automatizados o interfaces gráficas.	1,3
Interacción de la radiación con la materia	2,7
Comprendo cómo interactúan los fotones con la materia, incluyendo el Efecto Fotoeléctrico, el Efecto Compton y la Producción de Pares.	3,3
Comprendo el proceso de activación de neutrones y su relevancia en protección radiológica.	2,0
Conozco los mecanismos de interacción de neutrones, su dependencia energética y los diferentes tipos de blindaje de neutrones.	2,0

Preguntas para evaluación	Nivel de conocimiento (1 - 5)
Conozco los tipos de interacción de partículas pesadas (alfa, protones, núcleos) con la materia y los conceptos de poder de frenado y blindaje.	3,7
Identifico los tipos de interacción de partículas beta con la materia y los procesos asociados como <i>bremstrahlung</i> y radiación de Cherenkov.	2,7
Puedo describir la atenuación de la radiación en materiales de blindaje y el concepto de espesor a media vida, coeficiente de atenuación lineal y coeficiente	2,3
Introducción a los Estándares Básicos de Seguridad de la IAEA (IAEA BSS)	1,1
Puedo describir el objetivo y el alcance de los IAEA BSS.	1,3
Puedo describir los requisitos de gestión para la protección y seguridad en radiación.	1,0
Puedo explicar la división de responsabilidades en la protección radiológica entre el gobierno, el organismo regulador y otras	1,0
Puedo explicar los tipos de situaciones de exposición y las categorías de exposición.	1,0
Marco de protección radiológica	1,4
Comprendo los diferentes tipos de normas de seguridad de la IAEA y su jerarquía.	1,3
Puedo describir el papel del UNSCEAR, ICRP y la IAEA en el marco de la protección radiológica.	1,7
Puedo explicar la diferencia entre los instrumentos legales vinculantes y no vinculantes de la IAEA.	1,3

Preguntas para evaluación	Nivel de conocimiento (1 - 5)
Marco gubernamental, legal y regulador para la seguridad	1,6
Conozco los diferentes tipos de autorizaciones de una instalación o actividad.	1,3
Puedo explicar el propósito de la revisión y evaluación de una instalación o actividad.	1,7
Puedo explicar la finalidad de la supervisión de una instalación o actividad.	2,0
Puedo explicar las principales responsabilidades y funciones de la autoridad reguladora.	1,3
Puedo explicar las principales responsabilidades y funciones del gobierno en la protección radiológica.	1,7
Puedo resumir los elementos de una infraestructura reguladora de seguridad radiológica.	1,3
Principios de detección y medición de radiación	1,6
Conozco los principios de operación de las cámaras de ionización, tubos Geiger-Müller y detectores de centelleo.	2,0
Puedo describir los diferentes tipos de dosímetros personales (de película, termoluminiscentes, de luminiscencia ópticamente estimulada, electrónicos).	1,7
Puedo describir los principios generales de detección de radiación y entiendo los conceptos de eficiencia energética, resolución y límite de detección.	1,3
Sé seleccionar el detector adecuado para un campo de radiación específico.	1,3
Recomendaciones de la ICRP	1,6

Preguntas para evaluación	Nivel de conocimiento (1 - 5)
Comprendo el sistema de protección radiológica y los tipos y categorías de exposición.	1,7
Puedo explicar los principios básicos de la protección radiológica.	1,7
Puedo resumir las recomendaciones de la Publicación 103 de la ICRP.	1,3
Seguridad en irradiadores industriales y aceleradores	1,3
Puedo describir el sistema de categorización de los irradiadores industriales.	1,0
Puedo evaluar la adecuación de los sistemas de enclavamiento y advertencia instalados en irradiadores industriales y aceleradores.	1,3
Puedo identificar accidentes o incidentes previsibles en irradiadores industriales y aceleradores, y especificar los planes de emergencia adecuado	1,7
Puedo resumir los requisitos de diseño para irradiadores industriales y aceleradores.	1,0
Seguridad en plantas de producción de radioisótopos	1,1
Puedo describir los métodos de control de peligros radiológicos en plantas de producción de radioisótopos.	1,0
Puedo describir los peligros radiológicos asociados con la producción de radioisótopos.	1,0
Puedo describir los requisitos de un programa de protección radiológica para instalaciones de producción de radioisótopos.	1,0
Puedo resumir los diferentes procesos utilizados para la producción de radioisótopos.	1,3

Anexo 1. Prevista de placa de poliimida

En la siguiente imagen del muestra un recipiente donde se puede observar la tapa de color amarillo semitransparente, la cual corresponde al material elegido para el blindaje.



Figura 19. Cubierta de poliimida. Fuente: SABIC (s.f.), recuperado de ULTEM™ HU1004 resin: Product feature, https://www.sabic.com/zh/Images/ULTEM-HU1004-Resin-Product-Feature-EN_tcm11-5080.pdf