



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

Proyecto final integrador

Ingeniería nuclear con orientación en aplicaciones

Estudio para la automatización y robotización de las etapas en la producción de ^{99}Mo

Karen Antonella Medrano

Director

Lic. Daniel Amaya

Co-directores

Ing. Martín Brizuela

Ing. José Relloso

Miembros del jurado

Vittorio Luca

Juan Alarcón

Año 2022

*A mi Mamá,
que está siempre en mi corazón.
A mi Papá y mis hermanos
por su apoyo incondicional.*

Resumen

En el marco del Proyecto Final Integrador de la carrera de Ingeniería Nuclear con orientación en aplicaciones, se encara como tema el estudio de la posibilidad de implementar una automatización y robotización en el proceso de producción del radioisótopo Molibdeno-99 (^{99}Mo) .

En primer lugar se estudia en detalle cada etapa comprendida en el proceso de producción del ^{99}Mo y las tareas que se realizan en cada una de ellas con sus respectivos requerimientos. A partir de este análisis se plantea una de las tareas para implementar una posible automatización con la finalidad de obtener beneficios al nivel de producción y de seguridad del trabajador.

En el desarrollo de este proyecto se desglosa en detalle la investigación realizada y la propuesta de automatización. Respecto a la parte de automatización, se describe el estudio de robótica necesario para poder implementar el uso de un robot industrial en un entorno con exposición a una fuente gamma.

Índice general

Resumen	1
Índice de figuras	4
Índice de tablas	7
1. Introducción	8
1.1. Antecedentes	8
1.2. Objetivos	9
1.3. La empresa	9
2. ^{99}Mo en la industria	10
2.1. Radioisótopo ^{99}Mo	10
2.2. Aplicaciones del ^{99}Mo	10
2.3. Métodos de obtención de ^{99}Mo	11
2.3.1. Obtención por reactor	12
2.3.2. Obtención por acelerador de partículas	12
3. Reactor experimental para producción de ^{99}Mo	13
3.1. Generalidades de un Reactor de Investigación	13
3.2. Reactor RA-3	14
4. Análisis de las etapas del proceso de producción de ^{99}Mo para la automatización	15
4.1. Fabricación del blanco	17
4.2. Irradiación del blanco	18
4.3. Procesamiento del blanco	24
4.4. Gestión de Residuos Radiactivos	28
4.5. Elección de la tarea a automatizar	28
5. Despacho de blancos irradiados desde reactor	29
5.1. Análisis de la Tarea	29
5.2. Dosis en tareas manuales	35
5.2.1. Micro-Shield 9	36
5.3. Automatización	37
5.3.1. Introducción a la robótica	37
5.3.2. Requerimientos del brazo	38
5.3.3. Entorno Coppelia-Sim	39
5.4. Dosis con automatización	43
5.5. Daño por radiación y dosis en robot	43
5.6. Propuesta robot industrial	48

6. Conclusiones	50
A. Tablas de requerimientos de las tareas en cada etapa del proceso de producción de ^{99}Mo	52
A.1. Recepción de blancos	52
A.2. Irradiación de blancos	53
A.3. Procesamiento de blanco	56
A.3.1. Planta de Fisión	56
A.3.2. Planta de Producción de Radioisótopos	58
A.4. Gestión de Residuos Radiactivos	60
B. Gráficos de puntos modelados en Micro-Shield	65
B.1. Dosis en operador implementando la automatización	65
B.2. Dosis en el robot	66
Bibliografía	68
Agradecimientos	70

Índice de figuras

2.1.	Diagrama de la cadena de decaimiento del ^{99}Mo .	10
2.2.	Diagrama de mercados existentes y emergentes de ^{99}Mo desde 2010 proyectados al 2030. [1].	11
4.1.	Diagrama de flujo con las etapas generales involucradas en el proceso de producción de ^{99}Mo .	16
4.2.	Gráficos en detalle del blanco de U-Al que se utilizan en Argentina para la producción de ^{99}Mo . [11]	17
4.3.	Imagen de un blanco de U-Al. [11]	17
4.4.	Diagrama de flujo con las tareas principales involucradas en la recepción del blanco en el RA-3 para irradiar.	19
4.5.	Diagrama del núcleo del RA-3 y posición central de irradiación para producción de ^{99}Mo , G-4.	20
4.6.	Imagen del núcleo del reactor RA-3 en operación.	21
4.7.	Diagrama de flujo con las tareas principales involucradas en la irradiación del blanco en el RA-3.	23
4.8.	Diagrama de flujo con las tareas principales involucradas en el procesamiento del blanco que se lleva a cabo en la Planta de Fisión.	25
4.9.	Diagrama de flujo con las tareas principales involucradas en la segunda etapa de procesamiento donde se obtiene el ^{99}Mo fraccionado en la Planta de Producción de Radioisótopos.	27
5.1.	Imagen de la composición del Padirac. Blindaje exterior, porta-contenedor y contenedor	29
5.2.	Imagen con el corte del Padirac y su estructura interna.	30
5.3.	Imágenes de las Tareas 1 y 2 involucradas en la carga y despacho de los blancos de ^{99}Mo irradiados.	32
5.4.	Imágenes de las Tareas 3 y 4 involucradas en la carga y despacho de los blancos de ^{99}Mo irradiados.	32
5.5.	Imágenes de las Tareas 5 y 6 involucradas en la carga y despacho de los blancos de ^{99}Mo irradiados.	33
5.6.	Imágenes de las Tareas 8 y 9 involucradas en la carga y despacho de los blancos de ^{99}Mo irradiados.	33
5.7.	Imágenes de las Tareas 10 y 12 involucradas en la carga y despacho de los blancos de ^{99}Mo irradiados.	34
5.8.	Imagen de la Tarea 13: Atornillar la tapa del Padirac.	34
5.9.	Modelado del Padirac en Micro Shield 9 y los puntos de interés para calculo de dosis.	36
5.10.	Esquema de comparación entre un brazo robótico de 6 Grados de Libertad y un brazo humano [19]	38
5.11.	Imagen de la plataforma de simulación del programa Coppelia-Sim	40

5.12. Tarea 13: Atornillado de la tapa del Padirac.	41
5.13. Tarea 7: Sellado del plug donde se inserta el pushing rod.	42
5.14. Tarea 14 : Test de contaminación superficial.	42
5.15. Robot comercial Kuka 1000 L750 Titan y los Joint de interés.	44
5.16. Robot KUKA iiwa LBR utilizado en el estudio de daño por radiación. Extraído de [22].	45
5.17. Entorno de prueba en la celda con una fuente de alta actividad de ^{60}Co del robot KUKA iiwa LBR, Extraído del artículo científico [22]	46
5.18. Simulación de la posición de mayor exigencia al brazo robótico en la tarea de atornillar la tapa de blindaje del Padirac.	47
5.19. Imagen representativa del brazo robótico industrial que se propone para la automatización. Modelo KUKA 1000 L750 Titan.	48
5.20. Gráfico del campo de trabajo del brazo robótico. Detalla el campo de acción de todas sus articulaciones.	49
A.1. Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de recepción de los blancos.	52
A.2. Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de irradiación de los blancos. Parte 1.	53
A.3. Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de irradiación de los blancos. Parte 2.	54
A.4. Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de irradiación de los blancos. Parte 3.	55
A.5. Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de procesamiento de los blancos que se realiza en la Planta de Fisión. Parte 1.	56
A.6. Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de procesamiento de los blancos que se realiza en la Planta de Fisión. Parte 2.	57
A.7. Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de procesamiento de los blancos que se realiza en la Planta de Producción de Radioisótopos. Parte 1.	58
A.8. Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de procesamiento de los blancos que se realiza en la Planta de Producción de Radioisótopos. Parte 2.	59
A.9. Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de gestión de residuos generados a partir de la producción de ^{99}Mo . Corriente 1: Residuos gaseosos.	60
A.10. Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de gestión de residuos generados a partir de la producción de ^{99}Mo . Corriente 2a: Residuos sólidos (Filtros).	61
A.11. Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de gestión de residuos generados a partir de la producción de ^{99}Mo . Corriente 2b: Otros residuos sólidos.	62

A.12. Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de gestión de residuos generados a partir de la producción de ^{99}Mo . Corriente 3a: Residuos líquidos (corriente alcalina AG1). 63

A.13. Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de gestión de residuos generados a partir de la producción de ^{99}Mo . Corriente 3b: Otros residuos líquidos. 64

B.1. Modelado de la fuente y el blindaje en *Micro-Shield* con los puntos asociados a la posición del operador en las tareas estudiadas implementando la automatización. 65

B.2. Modelado de la fuente y el blindaje en *Micro-Shield* con el punto asociado a la posición del Joint 1 durante las tareas de interés. 66

B.3. Modelado de la fuente y el blindaje en *Micro-Shield* con los puntos asociados a las posiciones del Joint 3 y del Joint 5 durante las tareas de interés. 66

Índice de tablas

4.1. Especificación de las dimensiones de un blanco de $U - Al$ del tipo miniplaca para producción de ^{99}Mo	18
4.2. Características de irradiación en el núcleo del RA-3.	20
5.1. Lista de tareas realizadas con el Padirac y las placa irradiadas.	31
5.2. Espectro de energía gamma de los blancos irradiados.	35
5.3. Descripción de los puntos de interés para el cálculo de dosis en operador en las distintas sub-tareas involucradas en el despacho de blancos de ^{99}Mo irradiados.	37
5.4. Tabla con las tareas que involucran exposición del operador. En escala creciente de dosis equivalente de verde a rojo, se muestran las dosis involucradas en cada tarea.	37
5.5. Tabla con las dosis recibidas por el operados con y sin automatización en las tareas más comprometidas.	43
5.6. Tabla de dosis en los puntos críticos del robot por tarea analizada.	47
5.7. Datos técnicos del brazo robótico KUKA modelo 1000 L750 Titan.	49
B.1. Información de los puntos de interés para el calculo de dosis en operador en las distintas sub-tareas involucradas en el despacho de blancos de ^{99}Mo irradiados implementando la automatización.	65
B.2. Puntos de interés para el calculo de dosis en los joints de interés del Robot en las distintas sub-tareas involucradas en el despacho de blancos de ^{99}Mo irradiados implementando la automatización.	67

Introducción

1.1. Antecedentes

La radiación y los radioisótopos se vienen utilizando ampliamente en diversos sectores, incluida entre otros la industria, la medicina, la investigación y la seguridad. El número de organizaciones que utilizan radiación y radioisótopos en el mundo ha aumentado continuamente cada año debido a entornos internos y externos, como la introducción de técnicas avanzadas de diagnóstico y tratamiento tras la promoción de la conciencia sobre la salud y la modernización de equipos, la automatización de procesos causada por el desarrollo industrial y los nuevos materiales/compuestos que permiten ampliar el espectro de utilización en todos los campos.

A nivel nacional e internacional, el tamaño del mercado del sector de la utilización de la radiación ha crecido continuamente, y se espera que esta industria continúe creciendo [1]. En particular en la Argentina, la producción rutinaria de radioisótopos por medio del RA-3, las plantas de procesamiento conexas y la gestión de residuos correspondiente, la construcción de nuevas instalaciones como el reactor RA-10, los centros de medicina nuclear, proyectos de producción de otros radioisótopos, muestran una línea de trabajo histórica y planificación al respecto.

Dentro de todas estas actividades, en el desarrollo de las tareas propiamente dichas se aprecia una característica común que se puede resumir en la realización de tareas manuales intensivas en presencia de campos de radiación. Dado el amplio *know-how* preexistente por las tareas que se realizan cotidianamente, los avances de las tecnologías y el gran progreso en el conocimiento del comportamiento de sistemas y materiales frente a la radiación, es que se comenzaron a estudiar las alternativas de automatización/robotización de tareas que se realizan en las etapas del proceso productivo de ^{99}Mo , desde la irradiación hasta la gestión de los residuos radioactivos.

Para ello, por intermedio de entrevistas, se realizó un relevamiento minucioso de las actividades que se realizan en cada instalación de la CNEA y se complementan con discusiones con grupos que hacen diseños de sistemas similares en INVAP.

INVAP cuenta entre otros, con equipos de diseño de ingeniería de sistemas en instalaciones entre las que se puede mencionar [2]:

- Reactores de investigación
- Fabricación de Elementos Combustibles para Reactores de Investigación
- Plantas de producción de radioisótopos
- Facilidades y Sistema de gestión de residuos

- Plantas de almacenamiento de combustibles nucleares

1.2. Objetivos

La producción de radioisótopos en reactores, tanto de molibdeno como de otros radioisótopos, implica una serie de etapas desde que se introducen y extraen los blancos de la posición de irradiación cercana al núcleo, pasando por celdas de transferencia donde se realizan diversas operaciones (desarme de dispositivos, preparación, medición, carga y control de contenedores) hasta las celdas de producción donde se realizan las etapas separativas (disolución, separación, purificación, fraccionamiento, controles de calidad y despacho). Actualmente, la mayoría de las etapas de la cadena de suministro son manuales, lo cual presenta una serie de desventajas, como ser: largos tiempos, posibilidades de error del operador, dosis de radiación al personal, necesidad de staff numeroso.

Este trabajo busca investigar la posibilidad de automatizar una parte del proceso de producción de ^{99}Mo , producido en reactores experimentales del tipo piletta abierta. Automatizar una parte del proceso brindaría la posibilidad de incrementar la producción del radioisótopo y de esta manera ocupar un lugar de mayor importancia en el mercado mundial de ^{99}Mo , además de disminuir la dosis de radiación que reciben los operadores en ciertas tareas.

1.3. La empresa

El Proyecto Final Integrador (PFI) se realizó en la empresa **INVAP S.E**, la cual desarrolla y gestiona proyectos tecnológicos de alta complejidad. Es reconocida mundialmente por su inserción en el área nuclear y se la considera una de las empresas líder en la construcción de reactores nucleares de investigación.

Respecto a su inserción en el área nuclear, INVAP abarca proyectos desde el diseño de reactores de investigación como el RA-10 en Argentina, RMB en Brasil, LPRR en Arabia Saudita entre otros, diseño de plantas de producción de radioisótopos como en el caso de la planta RPF (Radioisotope Production Facility) en Egipto, participación en reparaciones en centrales de potencia como Atucha-I y Embalse y diseño y construcción de celdas calientes para CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica) [2]. Además del área nuclear también tiene grandes desarrollos en el área espacial, en defensa y seguridad el ambiente y en sistemas de medicina nuclear.

En particular el desarrollo del trabajo se llevo a cabo en la sub-gerencia de Tecnología Nuclear, perteneciente a la gerencia de Negocios Nucleares dentro de la empresa INVAP.

^{99}Mo en la industria

2.1. Radioisótopo ^{99}Mo

El radioisótopo ^{99}Mo no se presenta de manera natural, sino que se obtiene a partir del elemento estable de Mo. Existen diversos métodos para obtener el radioisótopo ^{99}Mo de gran interés comercial en la actualidad. Este gran interés se debe a las diversas aplicaciones en el área de medicina nuclear del radioisótopo ^{99m}Tc , que se obtiene a partir del decaimiento radiactivo del ^{99}Mo .

El ^{99}Mo presenta un período de semi-desintegración de 66 hs, decae por emisión beta al radioisótopo ^{99m}Tc el cual posee un período de desintegración de 6 hs, emitiendo un gamma característico de 140 [keV]. Este último es de gran utilidad para detección de imágenes en medicina nuclear, y en este uso radica la importancia de la obtención de este radionucleído.

Actualmente se utiliza como tecnología generadores cromatográficos de $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$, donde se carga en una columna cromatográfica adecuada la solución que contiene ^{99}Mo . A partir de eluciones de dicha columna se obtiene de la solución ^{99m}Tc que se genera por el decaimiento de su radionucleído madre.

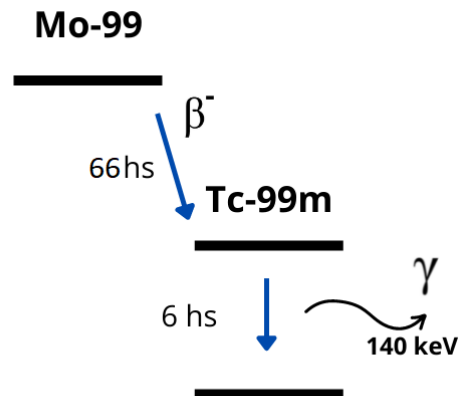


Figura 2.1: Diagrama de la cadena de decaimiento del ^{99}Mo .

2.2. Aplicaciones del ^{99}Mo

Como se expresó en la sección anterior, el foco de interés en la producción de ^{99}Mo radica en la obtención por decaimiento beta del ^{99m}Tc . Este radionucleído tiene la característica de

decaer a su estado estable emitiendo un rayo gamma de 140 [keV] con alta intensidad. Este rayo gamma es el de interés para aplicar en el área de medicina nuclear.

Generalmente se utiliza este radionucleído para marcación de moléculas y de esta manera poder obtener una imagen médica de la zona de interés. Esta imagen se obtiene mediante un estudio SPECT (Single Photon Emission - Computed Tomography). El principio del funcionamiento de un equipo SPECT es mediante la detección del fotón emitido por el paciente al cual se le incorporó la molécula marcada con ^{99m}Tc . Una vez detectado el fotón característico, el equipo se encarga de reconstruir una imagen topográfica de la fuente, que en este caso es el tejido donde se depositó la molécula radiomarcada.

En la Figura 2.2 se expresa el aumento de los mercados relativos a la producción de ^{99}Mo para obtención de ^{99m}Tc . En azul se detallan los mercados ya existentes y en celeste los mercados emergentes. Como se puede ver, se espera que durante esta década se incremente el mercado de ^{99}Mo , este análisis fue extraído de [1].

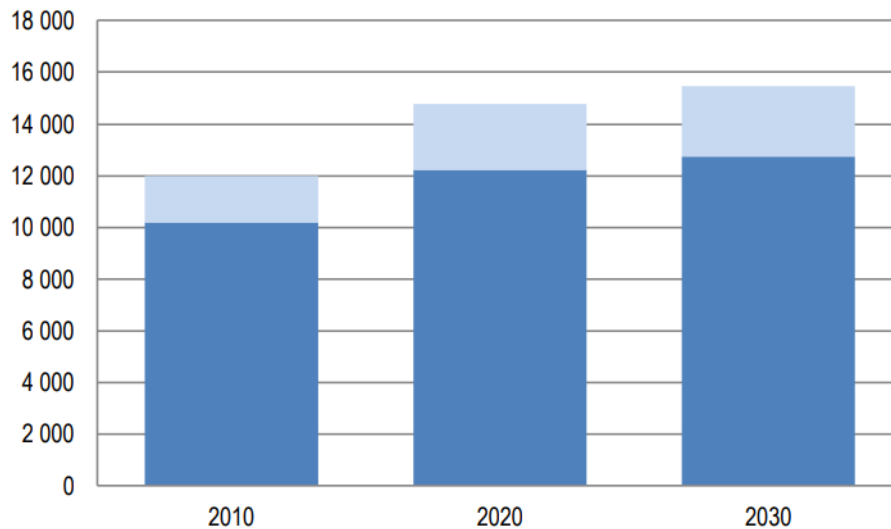


Figura 2.2: Diagrama de mercados existentes y emergentes de ^{99}Mo desde 2010 proyectados al 2030. [1].

2.3. Métodos de obtención de ^{99}Mo

Los medios para obtener ^{99}Mo son mediante la irradiación con el flujo neutrónico de un reactor o mediante un acelerador de partículas.

Respecto a la obtención por reactor se puede dar como resultado de la fisión de un blanco de ^{235}U o por activación neutrónica de un blanco de ^{98}Mo . Por otro lado, para obtener ^{99}Mo a partir del uso de un acelerador de partículas, en específico de un ciclotrón, se utiliza un blanco de ^{100}Mo para ser irradiado por protones [11].

2.3.1. Obtención por reactor

Para producir ^{99}Mo en un reactor, existen dos métodos que se explican a continuación:

- Por fisión de ^{235}U : Para la producción de ^{99}Mo por fisión según la reacción $^{235}\text{U}(\text{n},\text{pf})^{99}\text{Mo}$. Se utilizan dos tipos de blanco de alto o bajo enriquecimiento de ^{235}U (HEU o LEU) respectivamente.

Para el proceso por HEU, el blanco contiene 93 % de ^{235}U con una densidad de U de 1.6 $[\text{g}/\text{cm}^3]$. Se irradian los blancos entre 5 a 7 días generando un nivel de producción de ^{99}Mo entre 71 % y 85 %. Luego del traspaso a blancos LEU, se tuvo que incrementar la densidad de ^{235}U para poder compensar el decrecimiento de su porcentaje en LEU ($\sim 20\%$). En este proyecto se analiza el proceso de producción de ^{99}Mo por irradiación en reactor de blancos LEU fabricados por dispersión de U-Al.

- Por activación neutrónica de ^{98}Mo : Es un proceso sencillo basado en irradiación de blancos de ^{98}Mo enriquecidos. Se produce ^{99}Mo por la reacción de captura neutrónica $^{98}\text{Mo}(\text{n},\text{gamma})^{99}\text{Mo}$. El problema de esta vía de producción es que se obtiene un producto de muy baja actividad específica.

2.3.2. Obtención por acelerador de partículas

El ^{99}Mo puede ser producido también utilizando aceleradores de electrones (lineales o rototrones), mediante la reacción nuclear $^{100}\text{Mo}(\text{gamma},\text{n})^{99}\text{Mo}$. Los electrones acelerados (típicamente hasta 40 MeV) producen gamma por radiación de frenamiento (bremstrahlung), los gamma de suficiente energía pueden producir la reacción nuclear mencionada. Se utiliza un blanco sólido de Mo enriquecido en ^{100}Mo , refrigerado por Helio. Existe una planta actualmente en construcción en Estados Unidos con esta tecnología, la cual podría producir miles de Ci por irradiación.

Otra opción consiste en producir directamente ^{99m}Tc utilizando aceleradores de protones (como ciclotrones) mediante la reacción $^{100}\text{Mo}(\text{p},2\text{n})^{99m}\text{Tc}$, con sección eficaz máxima en unos 15 MeV. Esta producción localizada en ciclotrones ya existentes, puede producir algunos Ci de ^{99m}Tc por irradiación, suficientes para las necesidades de un servicio típico SPECT. Se emplea en ciertos lugares de Canadá y Europa.

Reactor experimental para producción de ^{99}Mo

3.1. Generalidades de un Reactor de Investigación

Los reactores de investigación son facilidades nucleares donde se busca generar un flujo de neutrones a partir de una reacción nuclear en cadena controlada. En estos se realizan investigaciones aplicadas a campos como física de partículas, radioquímica, análisis de activación, medicina nuclear y estudio de materiales. Además algunos se enfocan en la producción de radioisótopos, materiales modificados como el Silicio por dopaje (NTD) y ensayos de combustibles nucleares.

El diseño de los distintos tipos de reactores de investigación esta sujeto a las actividades experimentales o de producción que se realizan en el mismo. Se los puede caracterizar por el espectro de neutrones que genera, si es de baja energía ($E \sim 0.625\text{eV}$) se refiere a un reactor con un espectro térmico de neutrones y si es de alta energía ($E \sim 0.9\text{MeV}$) se refiere a un espectro de neutrones rápidos, y por el flujo de neutrónico que presentan, bajo ($\phi < 10^{12}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) medio ($\phi \sim 10^{12} - 10^{14}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) o alto ($\phi > 10^{14}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) [3].

En este proyecto es de importancia los reactores de investigación orientados a la producción de radioisótopos.

Para la producción de radioisótopos se necesitan diversos equipos especializados para el manejo de material radiactivo. Entre ellos se encuentran las celdas calientes, telemanipuladores, sistemas de ventilación, blindajes, sistemas de comunicación y monitores de tasa de dosis [4].

Además se debe tener en cuenta qué radioisótopo se busca producir ya que según el objetivo se especifica el flujo necesario, la posición de irradiación que puede ser IN-CORE o OUT-CORE, el tiempo de irradiación, la necesidad de que los blancos irradiados sean refrigerados, el tiempo de refrigeración, el peso en reactividad que representen si la posición es IN-CORE y la actividad específica que se desee obtener del radioisótopo.

En particular se desarrolló la investigación del proceso en el reactor RA-3, el productor de ^{99}Mo en el país. Como se explicó en la sección anterior, la producción de ^{99}Mo a partir de un reactor se basa en la irradiación blancos de U-235 para obtener ^{99}Mo como producto de fisión o irradiar blancos de ^{98}Mo enriquecidos. En particular se estudia la línea de obtención de ^{99}Mo como producto de fisión a partir de blancos de $U - Al$.

3.2. Reactor RA-3

El Reactor RA-3 se encuentra instalado en el Centro Atómico Ezeiza (CAE), Partido de Ezeiza, Provincia de Buenos Aires, a 33 km de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Es un reactor del tipo tanque abierto, con elementos combustibles con uranio enriquecido en ^{235}U al 20%. Utiliza como moderador y refrigerante agua liviana, y su núcleo se encuentra reflejado por grafito. La potencia de trabajo licenciada es de 10 MW [7].

La aplicación principal del RA-3 es la producción en escala comercial de radioisótopos, actividad para la cual se trabaja operando la máquina 4 días a la semana en forma ininterrumpida. Además, el reactor cuenta con cajas de irradiación, columna térmica, y tubos de haces neutrónicos, que permiten la experimentación en un amplio rango de temas vinculados con la investigación básica y con aplicaciones tecnológicas [8].

El reactor debe ser operado dentro de los límites y condiciones de operación establecidos en la documentación mandatoria, de acuerdo a la normativa vigente [9]. Por lo tanto, cuenta con sistemas de seguridad redundantes y diversos, que actúan sobre sistemas de protección con un adecuado grado de confiabilidad.

Respecto a la producción de ^{99}Mo en el RA-3 se utilizan blancos de U-Al, es decir que el método de obtención es mediante producto de fisión.

Análisis de las etapas del proceso de producción de ^{99}Mo para la automatización

En esta primer parte del trabajo se busca describir brevemente el proceso de producción de radioisótopos [5] y las distintas áreas que intervienen. Las etapas que conforman el proceso de producción son la irradiación del blanco, transporte a la planta de fisión, procesamiento y acondicionamiento del radioisótopo, gestión de residuos, embalaje y transporte del producto final. En la Figura 4.1 se detallan las etapas involucradas en el proceso mediante un diagrama de flujo general.

Iniciando con la irradiación del blanco se debe tener en claro que se realiza en un reactor de investigación, utilizando el flujo de neutrones térmicos (neutrones de Energía menor a 0.5 eV) normalmente en una posición central del núcleo. Los blancos son refrigerados por agua liviana, al igual que los elemento combustibles que conforman el núcleo, no se los puede mover mientras el reactor está operando, dado al alto peso en reactividad que presentan (por su ubicación en el centro del núcleo).

Finalizada la irradiación los blancos decaen en la pileta del reactor por unas horas, es decir su posición de irradiación, para luego pasar a una celda caliente. Se debe considerar en esta etapa que las dosis recibidas por el operador no deben superar el límite de 20 [mSv] al año. Para el transporte de los blancos irradiados para ser procesados se colocan en cartuchos y luego en un blindaje. En esta operación se trabaja con un material activado y se debe hacer foco en la seguridad y protección radiológica de los trabajadores.

Para el procesamiento de los blancos en los respectivos laboratorios, se debe tener presente que los mismos sean adecuados para trabajar con material radiactivo. Que posean un sistema de ventilación con filtros adecuados para controlar la emisión de gases del proceso, áreas libres de contaminación, equipos adecuados y medidores de dosis tanto en áreas como en los trabajadores (no deben superar los 20 mSv anuales) [6].

Diagrama de Flujo - Mo-99

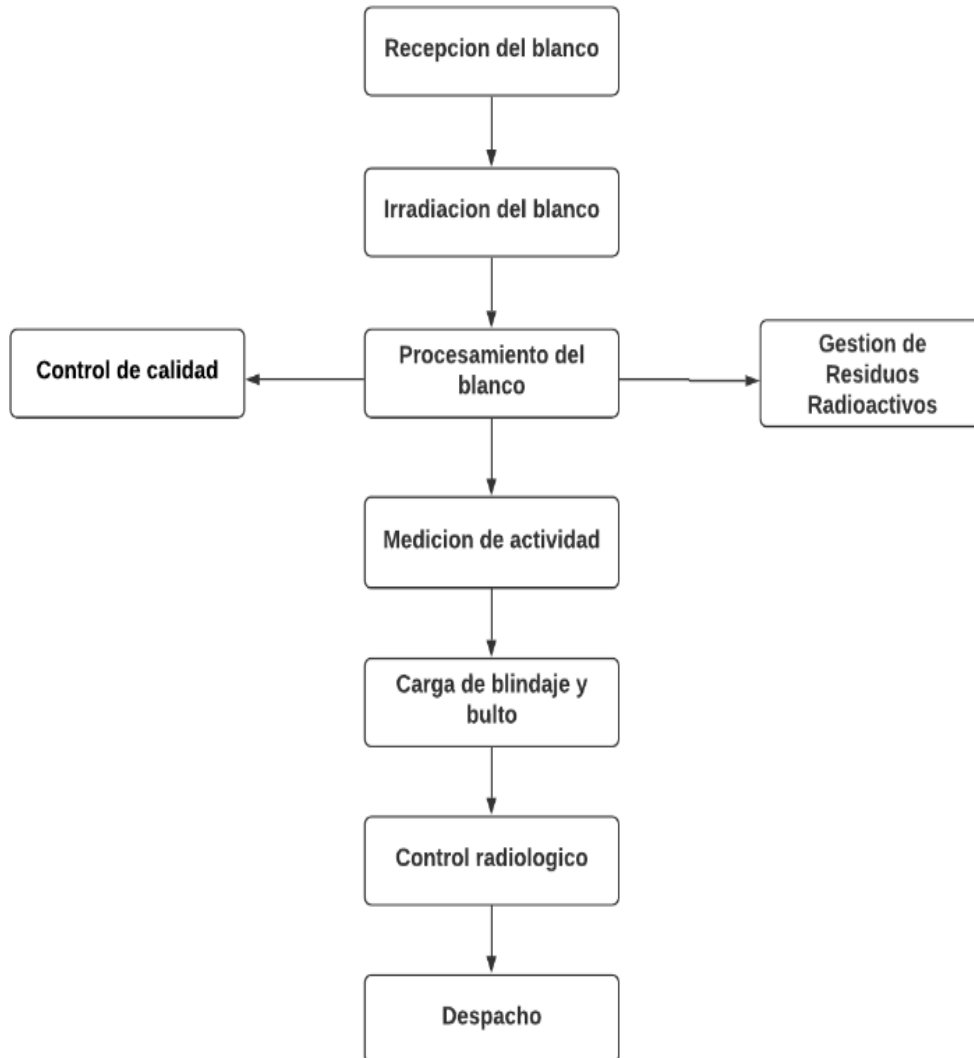
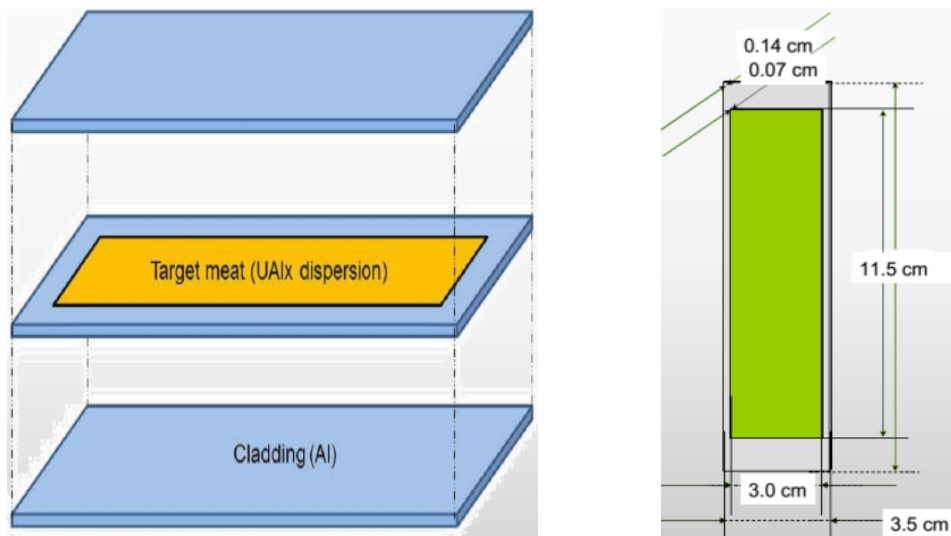


Figura 4.1: Diagrama de flujo con las etapas generales involucradas en el proceso de producción de ⁹⁹Mo.

En cada tarea en el procesamiento de los blancos se deben considerar los residuos radiactivos generados y su correcta gestión según la actividad y el estado que presenten. Finalmente para el embalaje y transporte final, se debe considerar la actividad del producto final para la correcta elección del bulto y luego verificar que no presente contaminación externa, para ser liberado.

4.1. Fabricación del blanco

Los blancos que se utilizan en el proceso son blancos fabricados en el ECRI por el método de dispersión de $U - Al$. Son miniplacas con Uranio de bajo enriquecimiento fabricadas por dispersión. Como son blancos de bajo enriquecimiento (LEU) y se busca competir con el método de producción con blancos HEU, la densidad del ^{235}U puede llegar a $19[\text{g}/\text{cm}^3]$ [11] [12].



(a) Diagrama de fabricación del blanco con los cladding de Aluminio. (b) Diagrama con las dimensiones reales de un blanco de U-Al.

Figura 4.2: Gráficos en detalle del blanco de U-Al que se utilizan en Argentina para la producción de ^{99}Mo . [11]

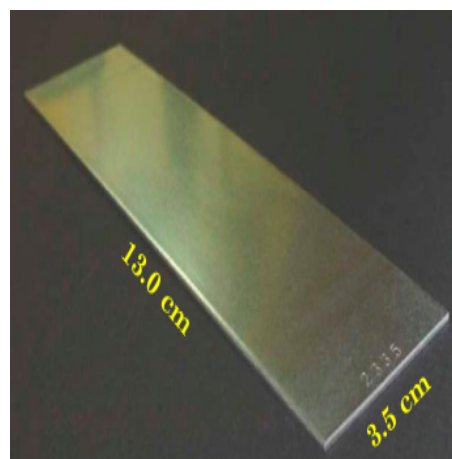


Figura 4.3: Imagen de un blanco de U-Al. [11]

En la Figura 4.2a se puede observar un esquema de las partes del blanco que conforman la miniplaca. Por otro lado, las dimensiones de la miniplaca se detallan en la Tabla 4.1 y se pueden apreciar en la Figura 4.2b y en la Figura 4.3 se muestra una imagen tomada a una miniplaca real. Los blancos para irradiar deben cumplir los siguientes criterios:

- No deben ser explosivos, pirofóricos o volátiles.
- No deben contener Mercurio.
- Deben ser estables bajo irradiación y no descomponerse.
- Ser de alta pureza para evitar la presencia de otros radionucleídos.
- Geometría adecuada para manipulación, refrigeración y evitar la autoabsorción de neutrones.
- No debe liberar gases.

Parámetro	Valor
Ancho de la placa	3.5[cm]
Alto de la placa	13.0[cm]
Espesor de la placa	0.14[cm]
Ancho del meat $U - Al$	3.0[cm]
Alto del meat $U - Al$	11.5[cm]
Espesor del meat $U - Al$	0.07 [cm]
Masa de ^{235}U	1.4[g]

Tabla 4.1: Especificación de las dimensiones de un blanco de $U - Al$ del tipo miniplaca para producción de ^{99}Mo .

En el análisis de las tareas de cada etapa no se considera la etapa de fabricación de los blancos. Esto se debe a que en esta etapa no existe riesgo de exposición por manipulación de los blancos. De igual manera se considera importante dar una introducción al tipo de placa que se utiliza en el proceso estudiado.

4.2. Irradiación del blanco

En primer lugar se desglosa paso a paso la recepción de los blancos en las instalaciones del reactor. En la Figura 4.4 se muestra un diagrama de flujo con las tareas de esta etapa y en la Figura A.1 que se encuentra en el Anexo A se detallan los requisitos de cada tarea que fueron considerados en el estudio.

Las tareas contenidas en la recepción del blanco no conllevan mayor detalle ya que no presentan riesgo por emisión de dosis hasta que sean irradiadas.

Recepcion del blanco RA-3

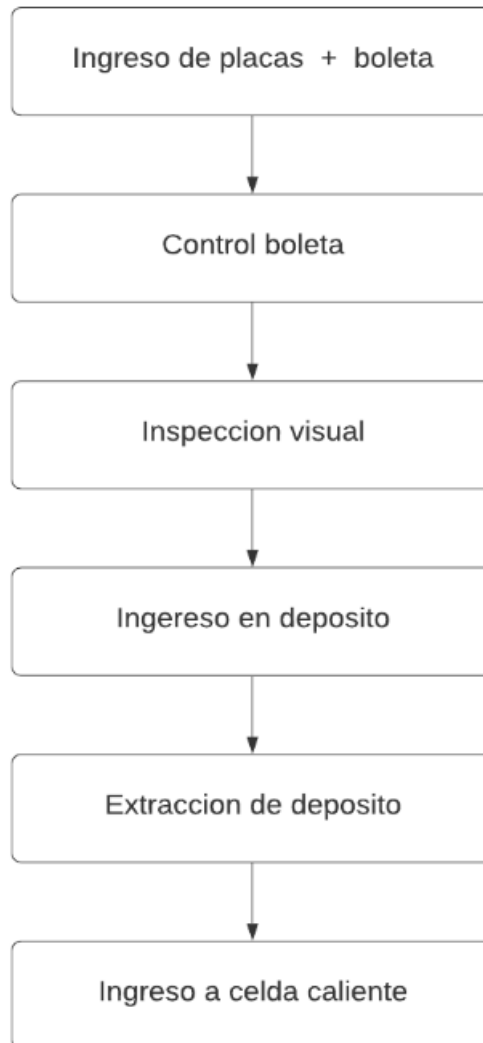


Figura 4.4: Diagrama de flujo con las tareas principales involucradas en la recepción del blanco en el RA-3 para irradiar.

Respecto a la irradiación, se lleva a cabo en un reactor de investigación [3] del cual se debe conocer la posición de irradiación requerida, normalmente G4 en el centro del núcleo del RA-3 [8] donde recibe el mayor flujo neutrónico. Para el enfriamiento de los blancos, se los deja en la posición de irradiación con el reactor apagado. Una vez enfriado, pasa a la celda caliente.

Parámetros	Valor
Cantidad de blancos	12 por portablancos
Posición de irradiación en RA-3	G4
Estado del reactor	Estacionario
Flujo térmico	$(2.1 - 2.4) \times 10^{14} \frac{n}{cm^2}$
Tiempo de irradiación	108-120 hs

Tabla 4.2: Características de irradiación en el núcleo del RA-3.

En la Figura 4.5 se detallan las posiciones del núcleo del RA-3 de los elementos combustibles (EECC), los bloques de grafito como reflector, posiciones de irradiación (#), ubicación de las barras de control y demás instrumentación. Se señala la posición G-4 en el centro del núcleo, donde se ubican los blancos para la producción de ⁹⁹Mo. Por otro lado, en la Figura 4.6 se muestra una imagen real tomada del núcleo donde se aprecian claramente las barras de control y entre ellas un gancho de la caja de irradiación que contiene los blancos.

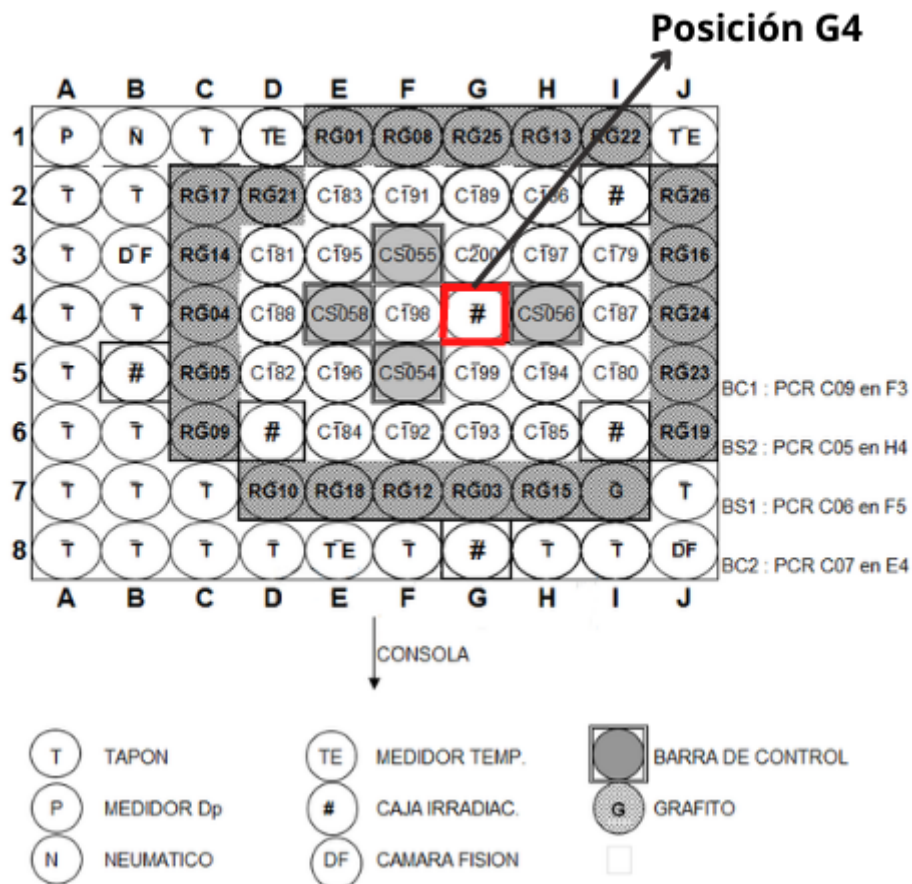


Figura 4.5: Diagrama del núcleo del RA-3 y posición central de irradiación para producción de ⁹⁹Mo, G-4.

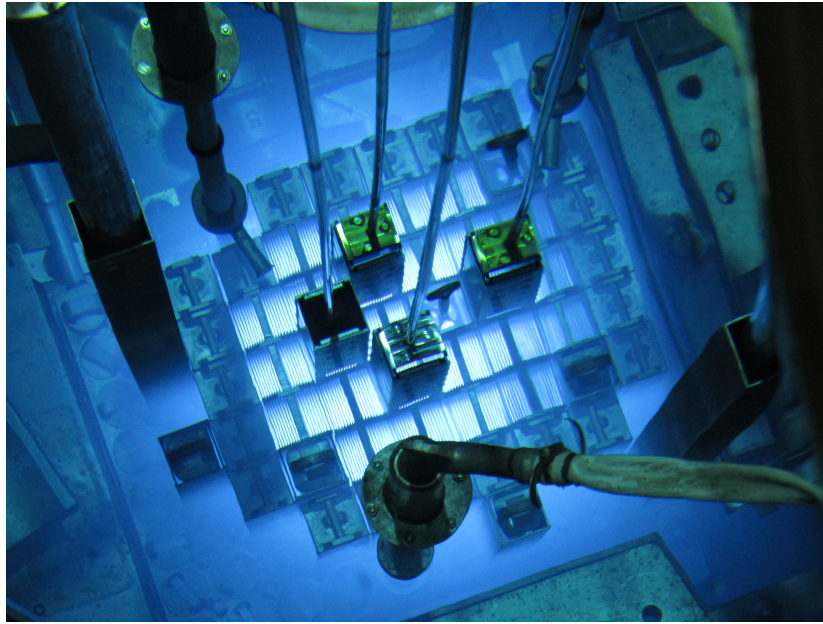


Figura 4.6: Imagen del núcleo del reactor RA-3 en operación.

Respecto a las tareas involucradas en la etapa de irradiación, se detallan en el diagrama de flujo de la Figura 4.7 y las variables a considerar se muestran en las Figuras A.2, A.3 y A.4 ubicadas en el Anexo A.

Las tareas son:

- **Ingreso de blanco a celda** Se realiza en celda caliente mediante telemanipuladores. Debe contarse con la presencia de un oficial de radioprotección para medir dosis en celda.
- **Desarmado del portablancos** Con los telemanipuladores de celda se ubica el portablancos en un soporte y se desatornilla unas tuercas para desarmar la parte superior del portablancos.
- **Entrega de blancos irradiados** Se realiza en simultáneo a la carga de blancos frescos. Se detalla en las siguientes tareas.
- **Carga de blancos frescos** Con el portablancos ubicado en el soporte, se utilizan los telemanipuladores y se cargan las 12 placas. Se atornilla el gancho de la parte superior de la estructura del portablancos.
- **Baja el portablancos** Mediante una conexión entre celda caliente y la pileta del reactor, se baja el portablancos hacia el núcleo.
- **Irradiación** La irradiación de los blancos se realiza en la posición G-4 del núcleo, como se puede apreciar en la Figura 4.5. La irradiación dura entre 108-120 hs.
- **Enfriamiento** Se deja el portablancos en la posición de irradiación durante 9 hs luego del apagado del reactor para remover el calor de los blancos antes de ser incorporados a celda caliente.
- **Sube el portablancos** Una vez enfriados los blancos, se sube el portablancos por el

canal de conexión entre la pileta del reactor y la celda caliente.

- **Ingreso a celda caliente del portablancos**
- **Desarmado de portablancos** Con el blindaje propio de la celda caliente y los telemanipuladores, se realiza el desarme del portamuestras. Este se encuentra posicionado en un soporte de manera diagonal para facilitar la manipulación.
- **Carga de cartuchos** Se sacan los blancos de a uno y se los coloca en cartuchos. Cada cartucho tiene la capacidad de contener cuatro placas. Se revisa de manera visual que los cartuchos estén sellados correctamente.
- **Ingreso de blindaje receptor** Ingresa a planta baja el blindaje con un operador y oficial de radioprotección de la planta de fisión. Se acopla el blindaje al sistema de conexión entre planta baja y la celda caliente.
- **Envío de cartucho de prueba** Se poseen cartuchos de prueba que se envían antes de cada cartucho cargado para verificar el correcto desplazamiento desde celda caliente hasta el blindaje en planta baja. Este blindaje cuenta con alarmas para la recepción correcta del cartucho.
- **Recepción de cartucho de prueba** Se verifica que se activen las alarmas que indican la correcta recepción del cartucho.
- **Envío de cartucho cargado** Una vez retirado el cartucho de prueba, se procede a enviar el cartucho cargado.
- **Recepción de cartucho cargado** Se recibe el cartucho cargado.
- **Extracción de blindaje** Se desacopla el blindaje y un oficial de radioprotección mide la tasa de dosis en aire.
- **Despacho de blindaje con placas de ⁹⁹Mo** Una vez desacoplado el blindaje se procede al traslado a planta de fisión.

Finalizada la irradiación de los blancos, se deben dejar los blancos en pileta con el reactor apagado para que decaigan durante 9 hs. en la posición de irradiación. Es importante aclarar que los blancos se irradian en el centro del núcleo donde es mas alto el flujo térmico, esto tiene asociado un alto peso en reactividad, por lo cual no puede extraerse del núcleo ni moverse hasta que decaiga su actividad y el reactor se encuentre apagado.

Esta es una de las consideraciones mas importantes en el proceso de producción de radioisótopos en un reactor de pileta abierta con posición de irradiación IN-CORE. Uno de los avances respecto a este reactor es el núcleo reactor multipropósito RA-10 que contiene posiciones de irradiación OUT-CORE lo que facilita la manipulación de blancos irradiados mientras el reactor se encuentra en plena operación [10].

Para el traspaso de los blancos hacia la planta donde inicia su procesamiento, se llevan a cabo controles de tasa de dosis durante el traslado, se cuenta con alarmas en áreas de interés y con un blindaje adecuado para el transporte.

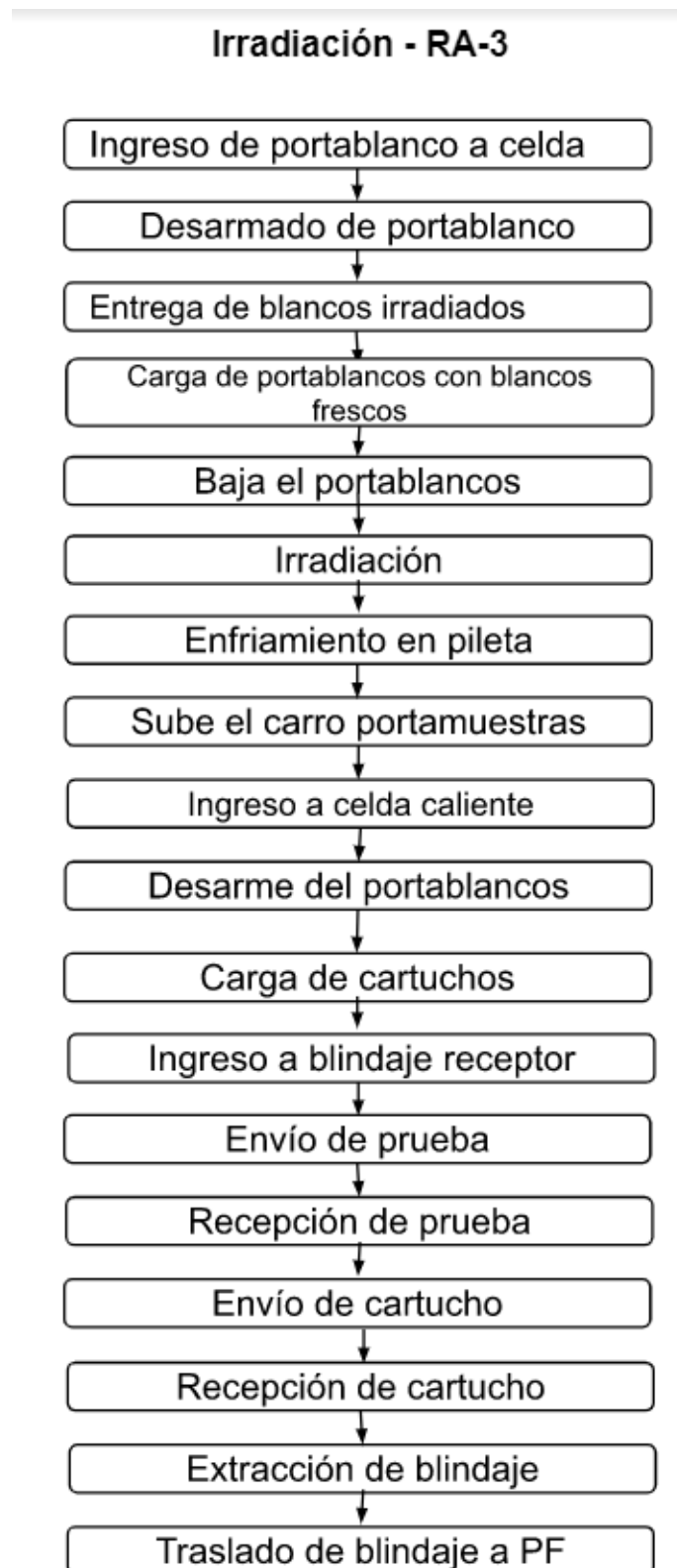


Figura 4.7: Diagrama de flujo con las tareas principales involucradas en la irradiación del blanco en el RA-3.

4.3. Procesamiento del blanco

Los detalles del proceso se obtuvieron mediante la entrevista con profesionales de CNEA y de INVAP que se dedican a la operación en las plantas y al diseño de plantas de producción de radioisótopos.

Planta de ⁹⁹Mo por fisión

La Planta de Fisión es una instalación que se encuentra ubicada en el Centro Atómico Ezeiza e interconectada con el Reactor RA-3 para el traspaso de los blancos [12]. En esta instalación se lleva a cabo la separación radioquímica del ⁹⁹Mo del blanco. A través de una serie de eluciones por columnas y resinas dentro de una celda caliente se logra separar ⁹⁹Mo del blanco, como producto intermedio.

En el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 4.8, se detallan las sub-tareas que se realizan en la planta. Una vez que los blancos ingresan a Planta de Fisión, inicia el procesamiento del blanco. En esta etapa se lleva un control del PH de operación, de las resinas de intercambio iónico, la temperatura y el flujo de las columnas. Se presta atención a los gases que se producen a lo largo del proceso y se controla la actividad de los residuos de cada etapa de la separación radioquímica del blanco. Los requisitos de cada sub-tarea se detallan en la tabla de la Figura A.5 y A.6 que se encuentran en el Anexo A.

Una vez ingresados los blancos a una celda caliente de la planta, se lleva a cabo la disolución del blanco en una solución alcalina. En esta actividad se considera la corriente de residuos **2.b**, donde se liberan residuos sólidos como mangueras y papeles utilizados.

Luego se procede al lavado y precipitado de del ⁹⁹Mo, generando residuos solidos como filtros que contienen actínidos como producto del precipitado (corriente **2.a**). A continuación, circula el filtrado que contiene ⁹⁹Mo por una columna que retiene el ¹³¹I (subproducto del proceso) y se sigue filtrando por una resina de intercambio aniónico, ésta retiene el ⁹⁹Mo. A partir de sucesivos lavados y eluciones se retiene el ⁹⁹Mo.

Se realiza el acomplejamiento de ⁹⁹Mo(IV) con tiocinato y un sucesivo ajuste de PH. Se procede a realizar la carga de la solución en una columna de Al₂O₃. Finalmente luego de un lavado y elusión, se obtiene el de ⁹⁹Mo intermedio que se traspasa a la Planta de Producción de Radioisótopos.

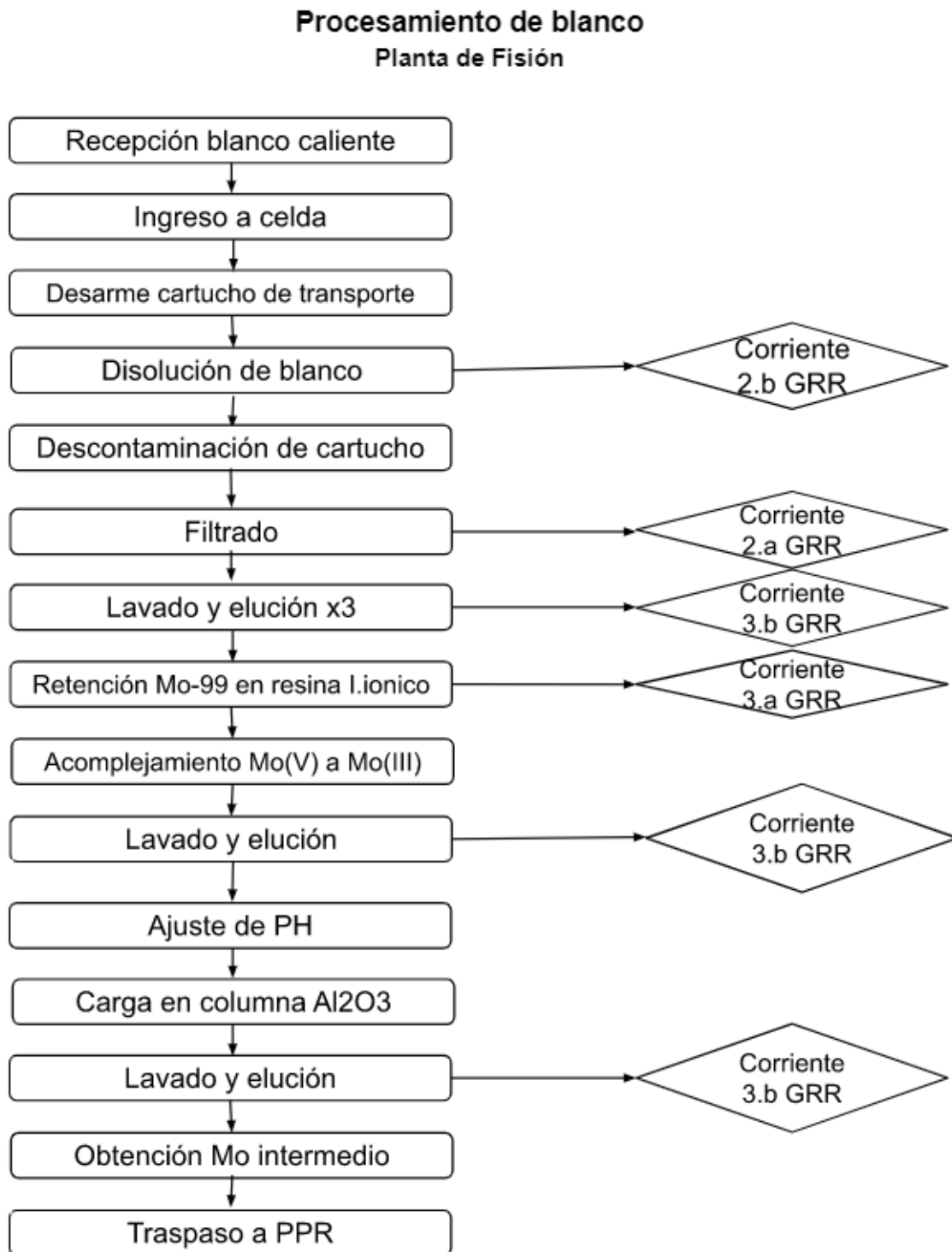


Figura 4.8: Diagrama de flujo con las tareas principales involucradas en el procesamiento del blanco que se lleva a cabo en la Planta de Fisión.

Planta de Producción de Radioisótopos

Al igual que las demás instalaciones, la Planta de Producción de Radioisótopos (PPR) se encuentra en el Centro Atómico Ezeiza. En la misma se lleva a cabo la purificación final del ⁹⁹Mo proveniente de Planta de Fisión, el acondicionamiento del lote y el fraccionamiento. Además se llevan a cabo los debidos controles de calidad. La instalación cuenta con celdas estancas y blindadas para operar el material radiactivo [13]. Las instalaciones cuentan con celdas del tipo isla con 100 [mm] de blindaje de plomo, telemanipuladores y visores de vidrio plomados. Entre las tareas que se realizan en esta etapa se encuentran las detalladas en el diagrama de flujo de la Figura 4.9 y los requisitos operacionales de las mismas se describen en las Figuras A.7 y A.8 que se encuentran en el Anexo A.

En la Planta de producción de radioisótopos se lleva a cabo la purificación final del ⁹⁹Mo. En primer lugar se toma una muestra de control, luego se realiza un proceso de evaporación con el fin de controlar la radiación de fondo.

Se procede a realizar la disolución del precipitado y una filtración en vacío. A continuación se realiza el acondicionamiento final de lote, regulando el PH. Finalmente se realiza el fraccionamiento de la solución y el debido control de calidad final.

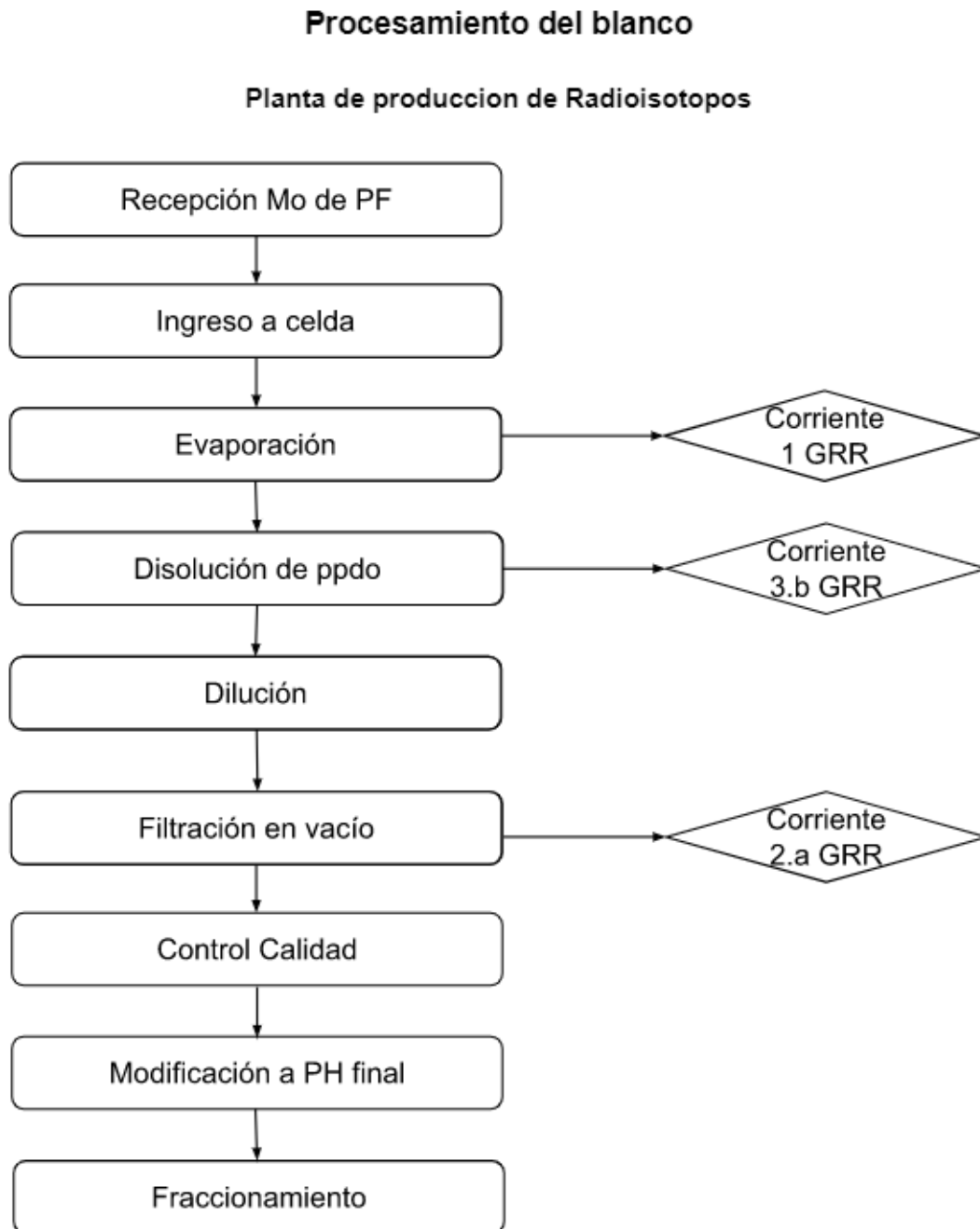


Figura 4.9: Diagrama de flujo con las tareas principales involucradas en la segunda etapa de procesamiento donde se obtiene el ⁹⁹Mo fraccionado en la Planta de Producción de Radioisótopos.

4.4. Gestión de Residuos Radiactivos

La Gerencia de Gestión de Residuos es la encargada del correcto manejo de los residuos generados en el área nuclear en CNEA. A lo largo de la cadena del proceso se generan residuos radiactivos los cuales son gestionados por la gerencia de Residuos Radiactivos. En cada etapa del proceso se deben separar adecuadamente los residuos radiactivos, según sea de alta, media o baja actividad y según su estado, líquido, sólido o gaseoso. Como se detalla en el Anexo A, durante el proceso se consideran tres corrientes de residuos que luego se subdividen según el tipo de material y actividad que contengan [11].

En primer lugar la corriente **1** (ver figura A.9) se refiere a los residuos gaseosos que se liberan en los procesos de disolución, esta corriente se almacena temporalmente en un tanque hasta que decaigan los elementos más radiactivos y luego se liberan al ambiente por una chimenea.

Por otro lado la corriente dos se refiere a los residuos sólidos, que se subdivide en corriente **2.a** y **2.b** (ver figuras A.10 y A.11). La corriente 2.a es la que contiene los filtros utilizados en el proceso, que retienen actínidos de mayor actividad y el ²³⁵U que no se consumió. La corriente 2.b contiene los demás residuos sólidos como papeles y mangueras del proceso.

Finalmente la corriente tres es la corriente de residuos líquidos y se subdivide en las corrientes **3.a** (ver figura A.12) que particularmente contiene el residuo líquido proveniente de la elusión de la columna AG1 la cual presenta como radionucleído activo el ¹³⁷Cs. Esta corriente se almacena en tanques que luego se colocan en tambores de mayor tamaño para ser cementados y luego almacenados. La corriente **3.b** (ver figura A.13) es la corriente de los demás residuos líquidos del proceso, esta corriente se almacena en tanques hasta que decaigan todos los elementos activos. Los detalles obtenidos de la gestión de residuos se obtuvieron mediante la entrevista a profesionales del área en CNEA.

4.5. Elección de la tarea a automatizar

A partir del estudio detallado de las tareas desarrolladas en cada etapa del proceso de producción de ⁹⁹Mo, se elige como tarea con posibilidad de implementar una automatización al despacho de placas irradiadas desde el reactor a la planta de procesamiento. Para esta elección se tuvo en cuenta que es una tarea que conlleva una interacción directa del operador con la fuente para la extracción de blindaje y traslado, lo cual tiene una dosis asociada.

En el RA-3 se utiliza un blindaje que se conecta mediante un tubo a la celda caliente. El blindaje se conecta en la planta baja del reactor y se traslada hacia la planta de producción por fisión mediante unos rieles para su desplazamiento con mayor distancia entre el operador y la fuente blindada. Este es un primer avance respecto a la optimización de esta tarea con el fin de minimizar la dosis que recibe el operador durante esta acción. Sin embargo el tipo de blindaje que se propone a continuación para esta tarea, es un nuevo tipo de blindaje que se acopla al diseño actual de reactores con los que trabaja INVAP.

Despacho de blancos irradiados desde reactor

5.1. Análisis de la Tarea

Como se explicó previamente, la tarea a automatizar es el despacho de las placas irradiadas desde el reactor a la planta de procesamiento. Se consideró el desarrollo de esta automatización para un caso genérico del proceso de producción en un reactor con traslado a una planta de procesamiento.

A partir del proveedor *Lacalhe* [14], se propone un nuevo tipo de blindaje de se utiliza en el área nuclear, distinto al que se utiliza actualmente en CNEA. En las Figuras 5.1 se detalla el contenido del blindaje Padirac que se utiliza para el análisis. El blindaje contiene un porta contenedor y un contenedor [15]. Es un blindaje que se utiliza actualmente para el traslado seguro de materiales o residuos emisores alfa, beta o gamma, como se aprecia en la Figura 5.2 el Padirac cuenta con 20 cm de blindaje de plomo, específicamente para el transporte de material que emite radiación gamma.

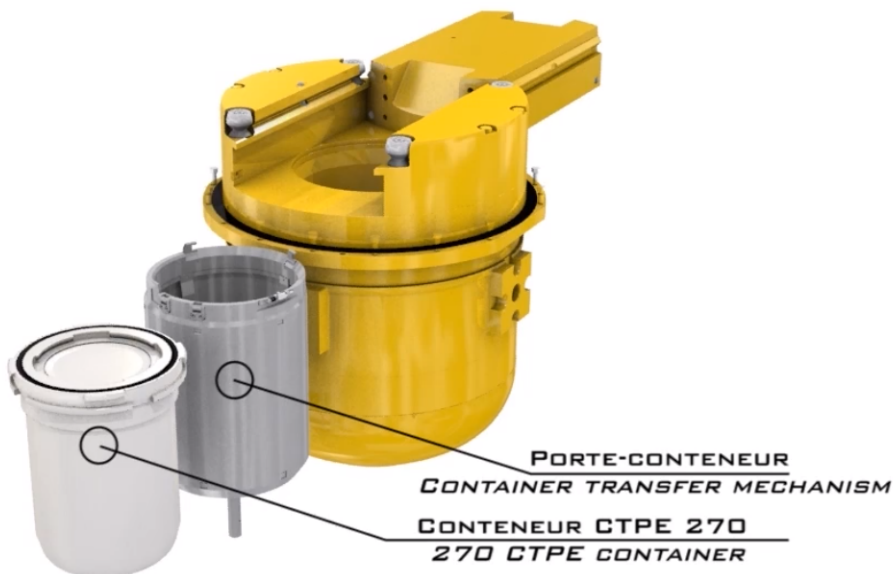
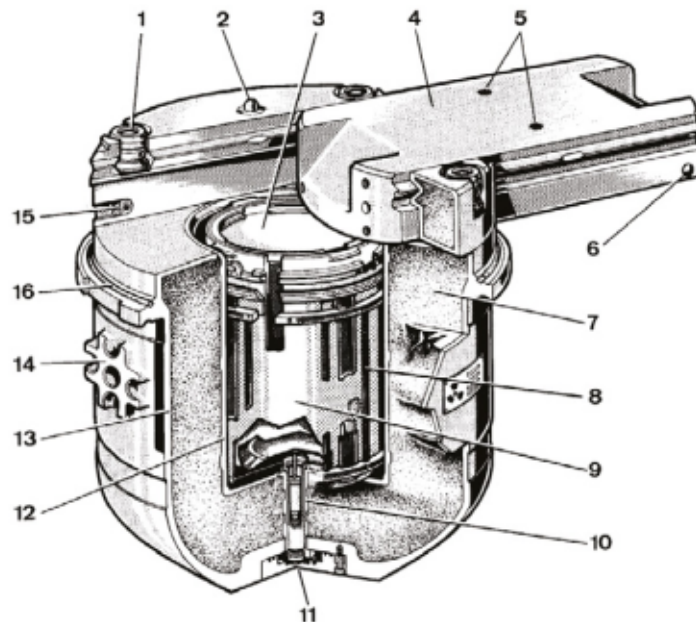


Figura 5.1: Imagen de la composición del Padirac. Blindaje exterior, porta-contenedor y contenedor



- | | |
|--|---------------------|
| 1. Diabolo | 9. Container vessel |
| 2. Security interlock | 10. Cap |
| 3. DPTe® 270 container | 11. Plug |
| 4. Shielded door with
"clamping system" | 12. Inner container |
| 5. Tapped holes | 13. External shell |
| 6. Ball lock | 14. Elevation |
| 7. Soft lead | 15. End stop |
| 8. Telescopic support | 16. O' ring |

Figura 5.2: Imagen con el corte del Padirac y su estructura interna.

Una vez definido el blindaje a utilizar, se estudiaron las sub-tareas involucradas en el despacho de los blancos irradiados, el tiempo que conllevan, la cantidad de operadores y la distancia entre el operador y la fuente. En la Tabla 5.1 se detallan las tareas y el modo de operación, y en las Figuras 5.3a, 5.3b, 5.4a, 5.4b, 5.5a, 5.5b, 5.6a, 5.6b, 5.7a, 5.7b y 5.8 se muestran imágenes de algunas de las tareas descritas previamente.

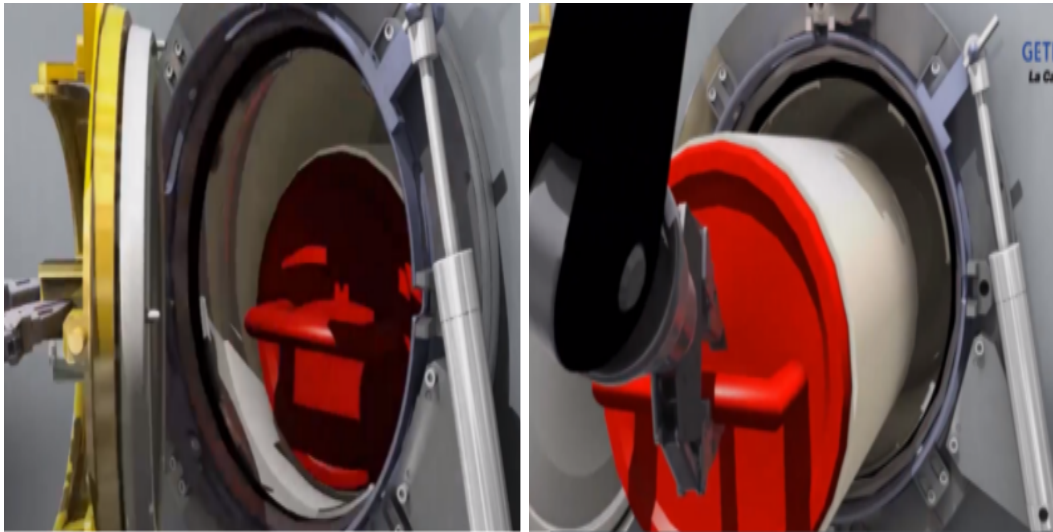
Una vez que se inserta el Padirac en la conexión con la celda caliente donde se manejan los blancos irradiados y se cargan los blancos irradiados en el contenedor 270 CTPE que se muestra en la Figura 5.1. Se procede a abrir la puerta de celda caliente (Ver Figura 5.3a) e ingresar el contenedor CTPE 270 cargado en el Padirac (Ver Figura 5.3b). Luego se cierra la puerta a celda caliente (Ver Figura 5.4a), se inserta el contenedor hasta el fondo del Padirac mediante el uso del pushing rod (Ver Figura 5.4b). Una vez ubicado correctamente el contenedor en el interior del blindaje, se cierra la puerta blindada (ubicada entre la conexión con celda caliente

y el blindaje Padirac) como muestra la Figura 5.5a y se extrae el Padirac con el pushing rod (Ver Figura 5.5b). Con el blindaje totalmente extraído, el operador procede a desacoplar el Padirac (Ver Figura 5.6a) en esta tarea la distancia entre el blindaje que contiene las placas irradiadas y el operador es mínima. En la tarea siguiente el operador posiciona el blindaje de forma vertical en un contenedor para transporte que hace parte del Padirac (Ver Figura 5.6b). Luego se desatornilla el lifting fork de los lados del blindaje (Ver Figura 5.7a), se coloca la tapa superior del contenedor Padirac (Ver Figura 5.7b) y se atornilla la misma con 20 tornillos (Ver Figura 5.8). Finalmente se realizan las mediciones de tasa de dosis adecuadas y el test de contaminación superficial en el Padirac para poder ser despachado.

Para las tareas que conllevan un mayor acercamiento del operador al blindaje se toma como distancia entre el blindaje y el operador aproximadamente 0.2 [m]. Estas tareas se analizaron según el manejo del Padirac [14], esto en CNEA no se realiza de la misma forma, ya que ni el blindaje ni la manera de carga de blancos son iguales.

Nº Tarea	Tarea	Tiempo [min]	Nº operadores	Distancia [m]	Modo de tarea
1	Apertura puerta de celda caliente	5	1	Distancia de celda caliente	Remota
2	Ingreso del contenedor con las placas irradiadas	5	1	Distancia de celda	Remota
3	Cierre de puerta a celda caliente (DPTE)	2	1	Distancia de celda	Remota
4	Inserción del contenedor en el blindaje (pushing rod)	2	1	0.7	Manual
5	Cierre de la puerta "shutter" blindada	4	1	0.7	Manual
6	Extracción completa del pushing rod	5	1	2.3	Manual
7	Sellado del "plug" donde inserta el pushing rod	6	1	0.2	Manual
8	Desacoplar el Padirac	3	2	0.2	Manual
9	Posicionar verticalmente el Padirac	2	2	0.2	Manual
10	Desatornillar el lifting fork	2	1	0.2	Manual
11	Colocar seguro de enclavamiento de la tapa deslizante del Padirac	2	1	0.2	Manual
12	Colocar tapa del Padirac	5	1	-	Remota
13	Atornillar la tapa (20)	20	1	0.3	Manual
14	Realizar test de contaminación superficial	7	1	0.3	Manual
15	Medir tasa de dosis externa en contacto	5	1	0.3	Manual
16	Medir tasa de dosis externa a 1 m	4	1	1.3	Manual
17	Rotular para transporte	3	1	0.3	Manual

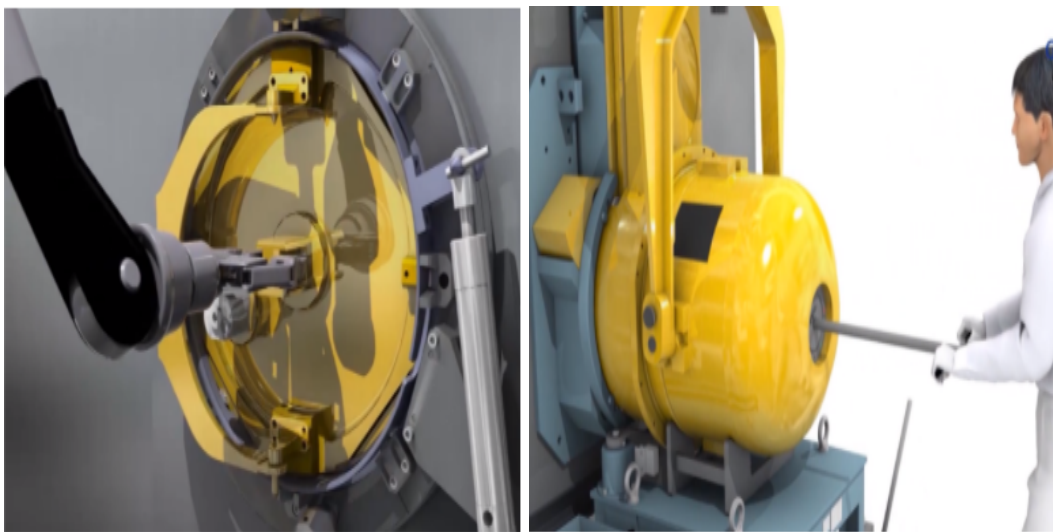
Tabla 5.1: Lista de tareas realizadas con el Padirac y las placa irradiadas.



(a) Imagen de la Tarea 1: Apertura de la celda caliente.

(b) Imagen de la Tarea 2: Ingreso del contenedor con los blancos irradiados.

Figura 5.3: Imágenes de las Tareas 1 y 2 involucradas en la carga y despacho de los blancos de ^{99}Mo irradiados.



(a) Imagen de la Tarea 3: Cierre de la puerta de la celda caliente.

(b) Imagen de la Tarea 4: Inserción del contenedor en el blindaje.

Figura 5.4: Imágenes de las Tareas 3 y 4 involucradas en la carga y despacho de los blancos de ^{99}Mo irradiados.



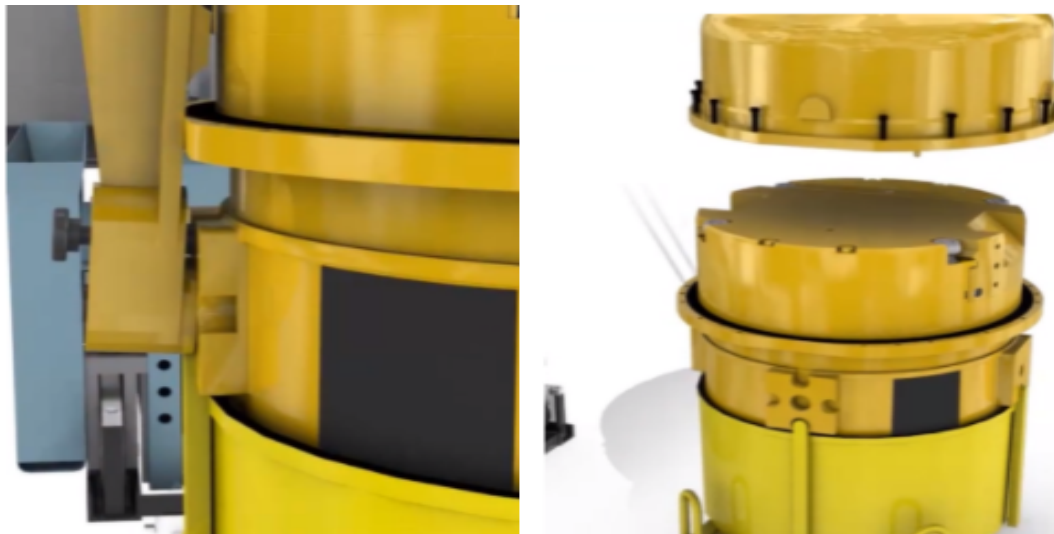
(a) Imagen de la Tarea 5: Cierre de la puerta blindada. (b) Imagen de la Tarea 6: Extracción del pushing rod.

Figura 5.5: Imágenes de las Tareas 5 y 6 involucradas en la carga y despacho de los blancos de ^{99}Mo irradiados.



(a) Imagen de la Tarea 8: Desacople del Padirac. (b) Imagen de la Tarea 9: Posicionamiento vertical del Padirac.

Figura 5.6: Imágenes de las Tareas 8 y 9 involucradas en la carga y despacho de los blancos de ^{99}Mo irradiados.



(a) Imagen de la Tarea 10: Desatornillar el lifting fork (b) Imagen de la Tarea 12: Colocar la tapa del Padirac.

Figura 5.7: Imágenes de las Tareas 10 y 12 involucradas en la carga y despacho de los blancos de ^{99}Mo irradiados.



Figura 5.8: Imagen de la Tarea 13: Atornillar la tapa del Padirac.

5.2. Dosis en tareas manuales

Se realizó el modelado de la fuente de los blancos irradiados y de todo el blindaje que lo contiene, siguiendo la estructura que muestra el corte del Padirac en la Figura 5.2. El blindaje cuenta con un espesor de 20 [cm] de plomo, y la estructura es de acero. La tapa superior posee un sistema de cierre por deslizamiento y con un seguro de cierre para evitar aperturas accidentales. En el interior tiene un porta contenedor que se desliza a lo largo del Padirac para sacar el contenedor CTPE 270 que se muestra en la Figura 5.1.

Para modelar la fuente se considera:

- Irradiación de blancos de meat de matriz U-Al, con 20 % de enriquecimiento en ^{235}U
- Potencia del blanco durante irradiación : 25 kW
- Tiempo de irradiación : 10 días
- Actividad de ^{99}Mo a fin de irradiación: 1164 [Ci]
- Tiempo de decaimiento en piletta: 9 hs.

La Tabla 5.2 muestra el espectro gamma del blanco irradiado a las 9 hs de decaimiento. Este espectro se carga en el software *Micro-Shield* para obtener valores de dosis.

Energía promedio [MeV]	Fotones/sec a 9hs.
0.01	1.80E+14
0.025	5.70E+13
0.0375	6.96E+13
0.0575	3.82E+13
0.085	3.56E+13
0.125	6.40E+13
0.225	9.79E+13
0.375	3.02E+13
0.575	1.67E+14
0.85	9.86E+13
1.25	3.99E+13
1.75	2.29E+13
2.25	3.62E+12
2.75	8.93E+11
3.5	1.00E+11
5	5.44E+9
7	4.35E-3
9.5	4.99E-4

Tabla 5.2: Espectro de energía gamma de los blancos irradiados.

5.2.1. Micro-Shield 9

Una vez realizado el análisis de la estructura del Padirac se procedió a modelar, en el software para cálculo de dosis *Micro-Shield 9* [16], una fuente de blancos irradiados con los blindajes correspondientes considerando los materiales que forman el contenedor, porta contenedor y el Padirac.

En la Figura 5.9 se detalla el modelo utilizado y los puntos de interés analizados según las distancias entre operador-fuente que se necesitan para las tareas de la Tabla 5.1. Se tiene en cuenta el espesor de los blindajes y las distancias de la Tabla 5.1 que hacen referencia a la distancia del operador-blindaje externo.

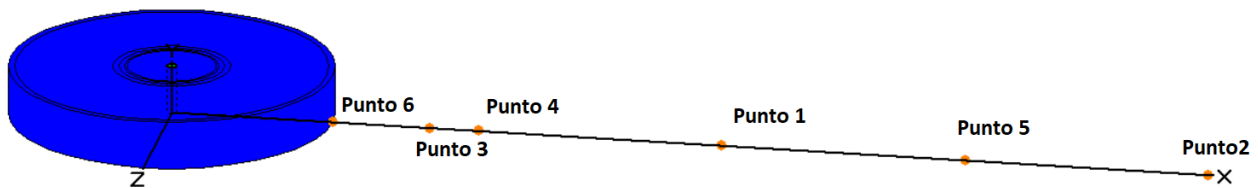


Figura 5.9: Modelado del Padirac en Micro Shield 9 y los puntos de interés para calculo de dosis.

Los blindajes utilizados son los siguientes:

- 8 cm de aire entre la fuente y el contenedor
- 0.6 cm de acero del porta contenedor
- 1 cm de aire entre el contenedor y el blindaje de Pb
- 1.3 cm de acero
- 20 cm de Pb
- 1.3 cm de acero

Luego de definir el modelado del Padirac, se cargaron los datos de la fuente de blancos irradiados y se corrió el software *Micro Shield 9*. Se obtuvieron reportes de dosis para cada punto de interés detallados en la Tabla 5.3.

En la Tabla 5.4 se detallan las tareas que involucran la interacción directa del operador con el blindaje y la fuente, las distancias operador-fuente, tiempo estimado de la tarea y dosis equivalente asociada a cada tarea.

Punto de interés	Distancia desde la fuente en X [cm]
1	113.2
2	213.2
3	53.2
4	63.2
5	163.2
6	33.2

Tabla 5.3: Descripción de los puntos de interés para el cálculo de dosis en operador en las distintas sub-tareas involucradas en el despacho de blancos de ^{99}Mo irradiados.

En la columna de dosis equivalente de las tareas se aplica una escala de color que va desde el rojo (tarea con mayor dosis) a verde (tarea con menor dosis) para mostrar que tareas involucran una mayor dosis equivalente en el operador y que se pueden minimizar mediante una automatización.

N° de Tarea	Tiempo [min]	Distancia a la fuente [cm]	Tasa Dosis equivalente [mSv/hr]	Dosis equivalente [mSv]
4	2	113.2	$1.96E^{-1}$	$6.54E^{-3}$
6	5	213.2	$5.56E^{-2}$	$4.64E^{-3}$
7	6	53.2	$8.42E^{-1}$	$8.42E^{-2}$
8	3	53.2	$8.42E^{-1}$	$4.21E^{-2}$
9	2	53.2	$8.42E^{-1}$	$2.81E^{-2}$
10	2	53.2	$8.42E^{-1}$	$2.81E^{-2}$
11	2	53.2	$8.42E^{-1}$	$2.81E^{-2}$
13	20	63.2	$6.09E^{-1}$	$2.03E^{-1}$
14	7	63.2	$6.09E^{-1}$	$7.10E^{-2}$
15	5	63.2	$6.09E^{-1}$	$5.07E^{-2}$
16	4	163.2	$9.49E^{-2}$	$6.33E^{-3}$
17	3	63.2	$6.09E^{-1}$	$3.04E^{-2}$

Tabla 5.4: Tabla con las tareas que involucran exposición del operador. En escala creciente de dosis equivalente de verde a rojo, se muestran las dosis involucradas en cada tarea.

Se calculó que un operador recibe 0.58 [mSv] por realizar una vez la operación de preparación del Padirac para transporte. Las tareas que tienen asociado un mayor valor de dosis son las tareas **13, 7, 14** en orden decreciente.

Considerando que en los nuevos reactores para producción de ^{99}Mo se busca incrementar la producción del radioisótopo, esta tarea se debería realizar con mayor frecuencia y como consecuencia el operador superaría la dosis anual más rápido. Por este motivo es que se busca una solución al automatizar una de las tareas que mayor dosis tiene asociada.

5.3. Automatización

5.3.1. Introducción a la robótica

Para el desarrollo del trabajo se realizó el estudio básico de robótica para comprender el funcionamiento del robot que se propone. En primer lugar se define como robot del tipo industrial

según la Asociación de Industrias de Robótica (RIA, Robotic Industry Association):

Manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas”

Esta definición, ha sido adoptada y modificada por la Organización Internacional de Estándares (ISO) que define al robot industrial como [17]:

Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas”

Además se define como Grado de Libertad a cada coordenada independiente que se necesitan para describir el estado mecánico del robot, como posición y orientación. En una cadena cinemática cada par eslabón-articulación, presenta un grado de libertad. Por otro lado se describe como articulación a la parte del robot que une dos eslabones, permitiendo el movimiento de uno respecto al otro. Estas pueden ser articulaciones prismáticas que permiten el desplazamiento respecto un eje, o de rotación que permite rotar respecto a un eje [18].

Para resolver un movimiento con el brazo robótico, se debe conocer el modo de cinética con el cual opera. Los modos de cinética pueden ser directo o inversa, la cinética directa se basa en determinar la posición y rotación de cada articulación o joint para lograr llegar a un objetivo, por otro lado, la cinética inversa se enfoca en determinar la rotación o traslación necesaria de cada joint para lograr llegar al objetivo.

5.3.2. Requerimientos del brazo

Para plantear una solución mediante la automatización en la tarea del proceso, se propone el uso de un robot tipo industrial. Se incluye en la definición de robot industrial que se explica en la sección anterior, la necesidad de que el robot tenga varios grados de libertad, en este caso un brazo robótico de 6 G.d.L que busca establecer movimientos semejantes a los de una brazo humano. Ver Figura 5.10.

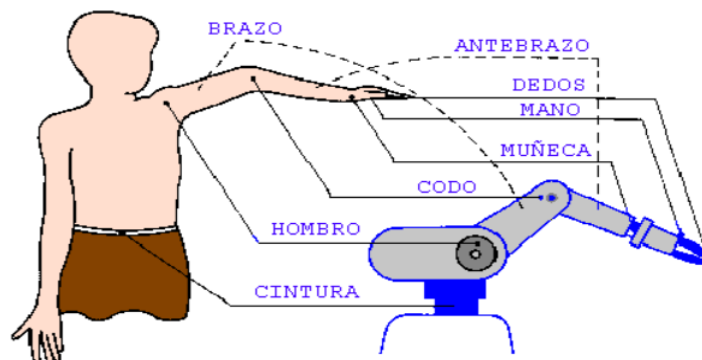


Figura 5.10: Esquema de comparación entre un brazo robótico de 6 Grados de Libertad y un brazo humano [19]

5.3.3. Entorno Coppelia-Sim

Coppelia-Sim es un simulador de robótica con un entorno de desarrollo integrado basado en una arquitectura de control distribuido. Presenta una gran versatilidad respecto al lenguaje para escribir los *scripts* de los controladores, se puede utilizar C/C++, Python, Java, Lua o Matlab.

Permitió desarrollar simulaciones de automatización, prototipos y demás actividades relacionadas a la robótica. Se utilizó este simulador como apoyo para realizar las simulaciones del brazo robótico propuesto. La versión con la cual se trabajó es *Coppelia-Sim EDU Versión 4.1.0*. En la Figura 5.11 se muestra la pantalla interactiva del programa.

El entorno de simulación cuenta con distintos elementos para armar la escena o entorno del trabajo, en este caso se utilizaron formas primitivas (*shapes*), trayectorias (*path*), dummies (*elementos indicadores*) y un modelo de brazo robótico.

- **Shapes:** Son elementos de formas primitivas como cubos, cilindros o esferas. Los mismos se pueden rotar o trasladar respecto al mundo (*escena o entorno base del simulador*), determinar las dimensiones necesarias, determinar de que manera interactúa en el entorno (si sufre efectos por rozamiento, colisión o por gravedad en el desarrollo de las tareas simuladas).
- **Path:** Este elemento determina una trayectoria abierta o cerrada a partir de un punto inicial que se ubica en el el robot, es una sucesión de puntos con orientación respecto al mundo. Puede conformarse por varios puntos entre el punto inicial y el objetivo o *Target*.
- **Dummy:** Es un punto con orientación que se utiliza como referencia para las posiciones respecto al mundo.
- **Joint:** Un joint se refiere a la articulación de un manipulador. En este caso se trabaja con seis joints en el brazo robótico.

Para la simulación de un proyecto dinámico, se organizaron los distintos elementos que conforman la escena según cierta jerarquía. El entorno permite asociar la dinámica de un elemento respecto a otro, es decir determinar las posiciones de un elemento según un sistema de referencia basado en otro elemento. De esta manera se determina un elemento *padre* respecto al cual se determinan las posiciones de otros elementos. La ventaja que presenta *Coppelia-Sim* es determinar la posición de cada elemento respecto a su padre y conocer la posición equivalente respecto al mundo.

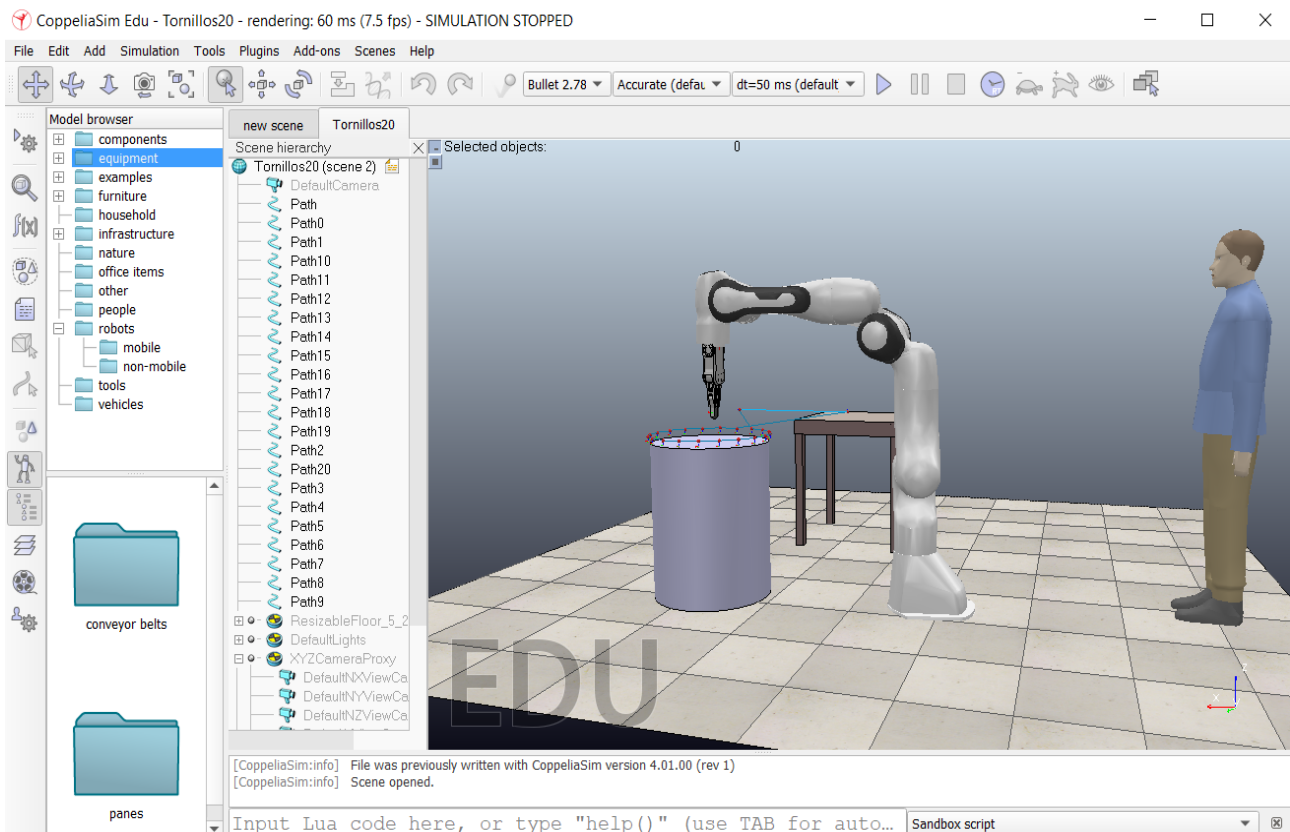


Figura 5.11: Imagen de la plataforma de simulación del programa Coppelia-Sim

Entorno simulado

En el entorno simulado se utiliza un cilindro para modelar el Padirac, con 0.9 [m] de altura y 0.7 [m] de diámetro. El brazo robótico es de aproximadamente 1.9 [m] de altura con un alcance de 1.8 [m]. El operador se puede ubicar en las tareas con el Padirac vertical, a 2.5 [m] de la fuente y en la tarea 7 a casi 3 [m] de distancia. Estas distancias entre el operador y la fuente es un rango de distancia conservador tomado para el análisis.

Para la creación de la escena de trabajo se utilizó una forma primitiva para modelar el blindaje y la posición de cada tornillo o punto de interés se la modelo mediante dummies. La posición de los dummies se las determino respecto al centro del cilindro (elemento padre).

Por otro lado se escogió un brazo robotico de 6 G.d.L al cual se le asoció un gripper (pinza) en el extremo como herramienta donde se ubicaron dos dummies asociados al gripper para simular las trayectorias. Se configuró las características del robot para que cada joint resuelva sus movimientos según *cinemática inversa* para lograr que el gripper asociado al ultimo joint llegue a la posición adecuada.

Para determinar las trayectorias que debe seguir el brazo robótico, se utilizaron *paths* del

tipo segmento o abierto, donde se determina que el dummy *Tip* asociado al gripper siga por la trayectoria a otro dummy *Target*. El *Target* se va a posicionar o guiar en el movimiento mediante los puntos definidos a lo largo del path, orientados respecto al mundo por los distintos dummies que simulan la posición de los tornillos, por ejemplo.

En la Tabla 5.4 se muestran las tareas con las tasas de dosis asociadas. Esta parte del trabajo se enfocó en analizar las tareas 13, 7 y 14 que son aquellas en color rojo (mayor tasa de dosis). En las Figuras 5.12, 5.13 y 5.14 se muestran las tareas simuladas respectivamente según tasa de dosis decreciente.

Como se explicó previamente, la Tarea 13 es la que genera mayor dosis al operador debido al tiempo asociado a esa tarea. El atornillar y sellar el Padirac lleva aproximadamente 20 [min]. La solución que se plantea en este caso es utilizar al Brazo robótico para que lleve a cabo la tarea, desde colocar la tapa del blindaje y atornillarlo, disminuyendo de esta manera la distancia entre la fuente y el operador. El operador se encargaría de controlar que las herramientas estén en su debido lugar antes de la operación de esta tarea.

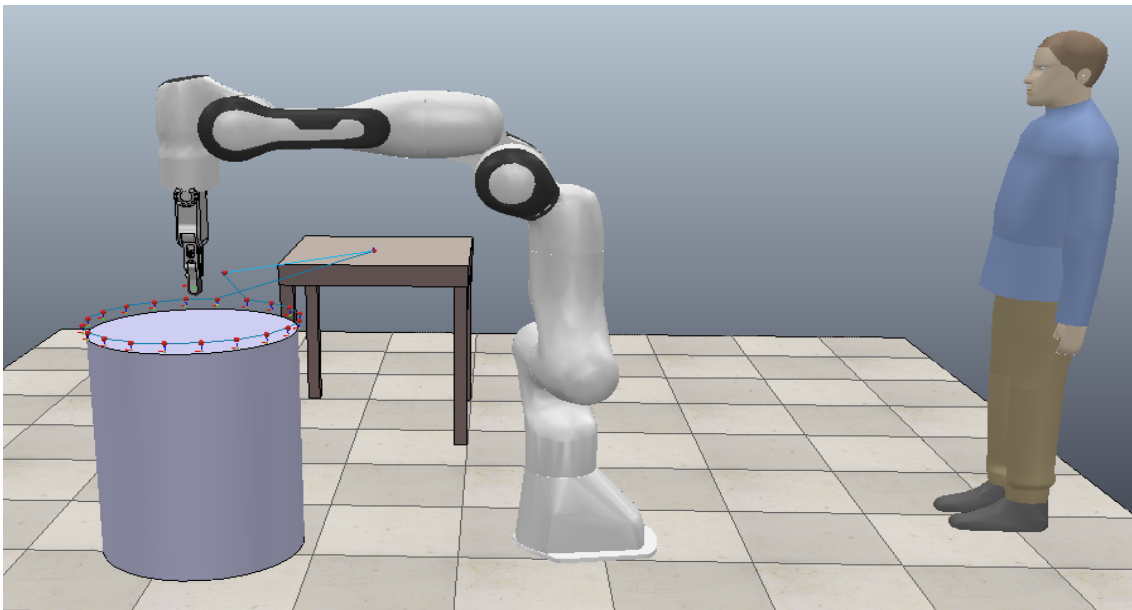


Figura 5.12: Tarea 13: Atornillado de la tapa del Padirac.

Se plantea que en las inmediaciones del robot, se encuentre una mesa de operación donde se encuentren las herramientas necesarias para cada actividad. Además se debe tener en cuenta que el brazo robótico a utilizar debe contar con sensores para mayor precisión de trabajo y evitar inconvenientes.

Respecto a la tarea 7 que es el sellado del plug donde se inserta el pushing rod, el operador lleva a cabo de manera manual la extracción del pushing rod. Pero el brazo robótico se encarga de sellar y atornillar el orificio donde se inserta el pushing rod.

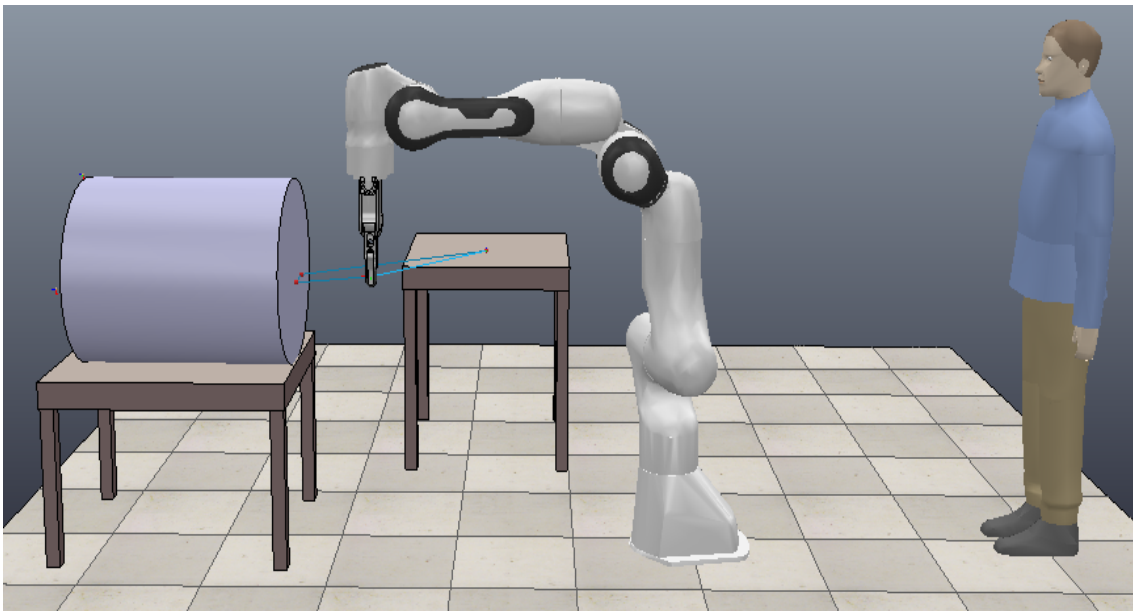


Figura 5.13: Tarea 7: Sellado del plug donde se inserta el pushing rod.

Finalmente con la Tarea 14, que es realizar el test de contaminación superficial. Se considera que previamente el operador acondicionó la mesa de operación con el papel y el detector necesario para realizar el test. El brazo se encarga de recoger el papel, pasarlo por la superficie del Padirac y luego colocarlo en una caja que contiene un detector para realizar la medición adecuada.

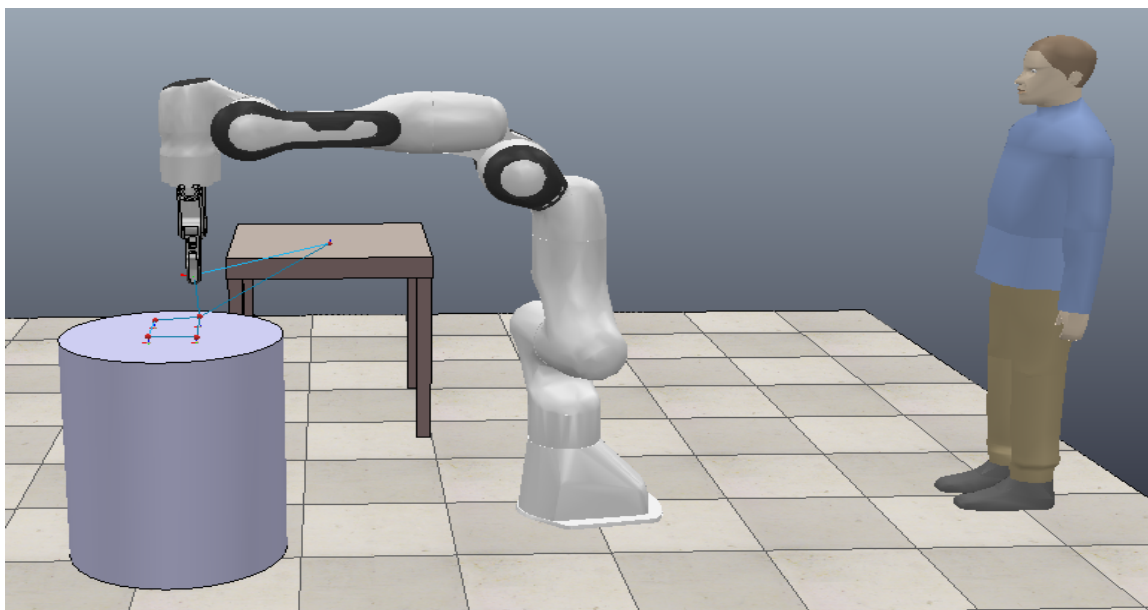


Figura 5.14: Tarea 14 : Test de contaminación superficial.

Se propone como posible solución al robot KUKA modelo 1000 L750 Titan [21]. El mismo además de cumplir con las tareas mas relevantes, también puede llegar a cubrir otras tareas como las tareas 8, 15, 17 que conllevan una tasa de dosis media y la tarea de levantar y colocar la tapa del Padirac. Este modelo tiene un alcance de casi 3 [m] y además puede levantar peso hasta 750 kg.

5.4. Dosis con automatización

Se calcularon las dosis que recibe el operador durante las tareas automatizadas, considerando que se emplea el brazo robótico para las tareas de dosis alta e intermedia (Tareas 13,7,14 de alta dosis y Tareas 8,15 y 17 de dosis intermedia). Para el cálculo de dosis del operador se realizó el modelado de la fuente y las distancias en *Micro-Shield* y se puede observar en la Figura B.1 y los puntos se detallan en la Tabla B.1 que se encuentran en el Anexo B.

En la Tabla 5.5 se detallan las dosis que recibe el operador durante la tarea con y sin automatización.

Tareas	Dosis Sin automatización [mSv]	Con automatización [mSv]
7	8.42E-2	4.63E-3
8	4.21E-2	2.31E-3
13	2.03E-1	1.54E-2
14	7.10E-2	5.4E-3
15	5.07E-2	3.85E-3
17	3.04E-2	2.31E-3
Dosis Total [mSv]	0.482	0.034

Tabla 5.5: Tabla con las dosis recibidas por el operados con y sin automatización en las tareas más comprometidas.

Como se puede apreciar, la dosis que recibe el operador en las tareas de interés disminuye un orden de magnitud implementando la automatización mediante un brazo robótico industrial. Lo que da pie a continuar con la propuesta de un brazo robótico comercial para implementar en esta etapa del proceso de preparación y despacho de las placas de ^{99}Mo irradiadas.

5.5. Daño por radiación y dosis en robot

Es de importancia el estudio del daño por radiación en los materiales que componen el robot propuesto para saber si la vida útil del mismo en un entorno con radiación es viable para la inversión que conlleva. Los materiales que se consideran son los metales, aleaciones, componentes de material orgánico y electrónica. De estos materiales el mas sensible a la radiación es la electrónica asociada los componentes del robot y a los sensores internos que posee.

En esta sección se pretende detallar el estudio el daño por radiación al que estaría sometido el brazo robótico comercial KUKA 1000 L750 Titan. Se estudian 3 puntos críticos del robot y se realizan los cálculos de dosis recibida en esos puntos. Se considera un margen de 20 Gy como el límite de dosis que se considera para la electrónica del robot que es la parte mas sensible al daño por radiación.

Para lograr el objetivo se comparan las dosis en los puntos críticos del robot con un estudio que se realizó en otro modelo de robot de la misma línea comercial [22]. Cabe destacar la importancia de aplicar soluciones robóticas en los procesos de manipulación de material radiactivo, ya que de esta manera se busca minimizar las dosis que normalmente recibe el operario, mejorar la seguridad y acelerar la producción. En este caso, al emplear un brazo robótico para realizar tareas en un entorno con radiación, el desafío es determinar que las dosis recibidas por exposición no sean lo suficientemente altas como para dañar la electrónica del robot. A continuación se explica el análisis realizado en base a una metodología previamente aplicada en un robot similar en un entorno de alta dosis de radiación.

Se determinan los puntos del robot que serán los referentes para realizar los cálculos de dosis. En este caso se eligen tres puntos o joints(articulaciones), el joint 1 que se encuentra en la base del robot, joint 3 posicionado en la mitad del robot y el joint 5 que se encuentra en al extremo del brazo robótico. Se eligen estas articulaciones porque son las que realizan maniobras en las cercanías de la fuente. En el caso de joint 3 porque es aquella articulación que se desplaza delimitando el alcance de todo el brazo y el joint 5 porque es la articulación que se desplaza en las cercanías de la fuente en el momento de realizar las tareas como el atornillado del blindaje del Padirac. En la Figura 5.15 se muestra el brazo robótico a analizar y los respectivos puntos de interés. Además se presenta la ficha técnica en la Tabla 5.7 del robot que se propone para la automatización en las tareas de preparación y despacho del blindaje de los blancos irradiados de ^{99}Mo [21].

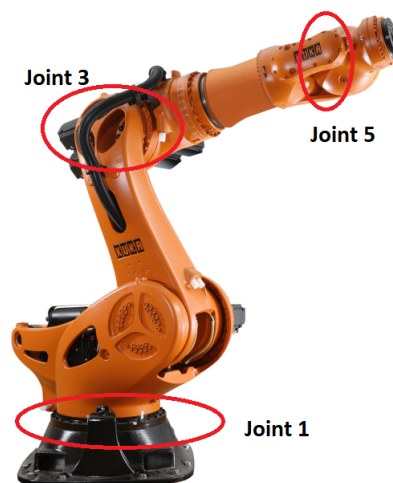


Figura 5.15: Robot comercial Kuka 1000 L750 Titan y los Joint de interés.

A partir del análisis del artículo científico *Radiation Tolerance Testing Methodology of Robotic Manipulator Prior to Nuclear Waste Handling* [22] donde se encara el estudio del caso de un brazo robótico Kuka (KUKA iiwa LBR) expuesto a una celda de irradiación con una fuente de ^{60}Co sin blindaje, con una tasa de dosis de 10 [Gy/h] para analizar la tolerancia de la electrónica asociada a estos robots. Normalmente la tasa a la que se encuentra expuesto el robot al manipular residuos ILW es de 1 [Gy/h], pero se toma el valor de 10 [Gy/h] por ser conservadores [22].

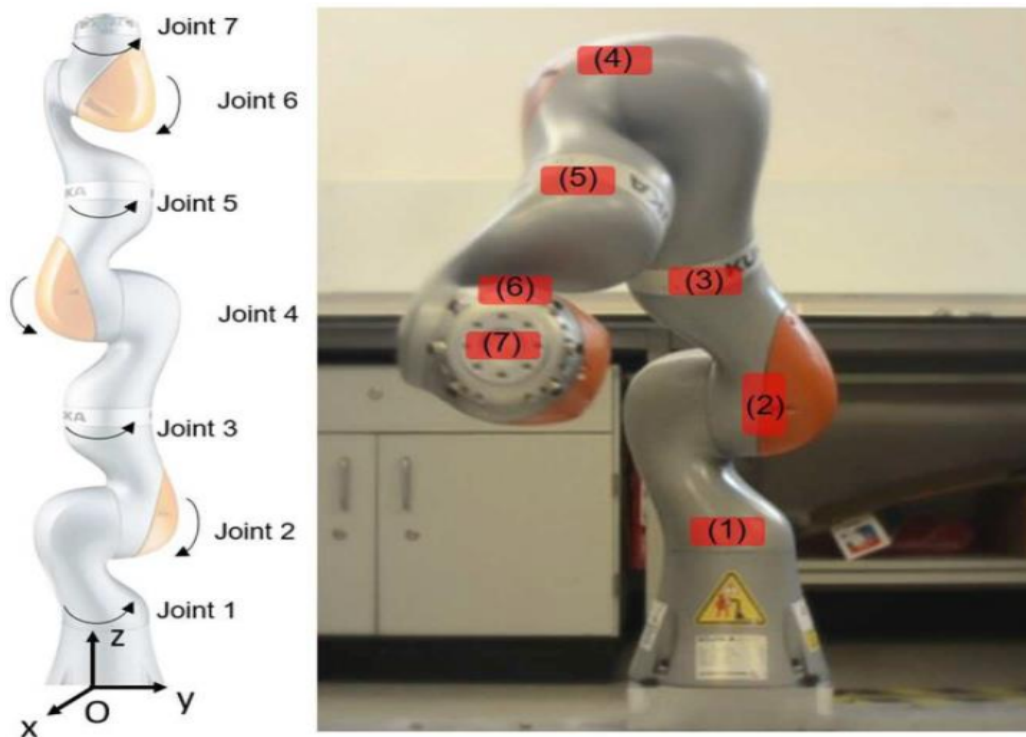


Figura 5.16: Robot KUKA iiwa LBR utilizado en el estudio de daño por radiación. Extraído de [22].

Este robot, tiene como objetivo manipular residuos radiactivos ILW (desechos radiactivos de actividad intermedia) y se busca evaluar su rendimiento en un entorno radiactivo y la degradación que pueda llegar a presentar. Se identificaron las articulaciones de interés que se detallan en la Figura 5.16 y se lo ubicó en una celda con la fuente de ^{60}Co con una actividad de 20 [TBq] para que realice las maniobras de interés. La ubicación del brazo respecto a la fuente es de aproximadamente 1.6 [m] alineados como se puede apreciar en la Figura 5.17.



Figura 5.17: Entorno de prueba en la celda con una fuente de alta actividad de ^{60}Co del robot KUKA iiwa LBR, Extraído del artículo científico [22]

Respecto al robot que se propone para la automatización en el marco del Proyecto Final (ver Figura 5.15), se ubica a aproximadamente a 1.5 [m] de la fuente blindada de los blancos irradiados de 43 [TBq], y las actividades que debe realizar duran entre 6 a 20 minutos con un rango de operación de un arco de curva sobre el blindaje de aproximadamente 1 [m].

Se simularon los puntos de interés en las posiciones de mayor exigencia de las tareas a analizar como se muestra en las Figuras B.3 y B.2 que se encuentran en el Anexo B. Se consideraron ciertos puntos de análisis que pasan sobre la fuente para la posición de mayor exigencia, para ello se utilizó el modelo de blindaje tipo tapa. En la Tabla B.2 se detallan las posiciones de los puntos de interés que se representan en los modelos. (Ver Anexo B). Se logró determinar los valores de dosis que se detallan en la Tabla 5.6. En la Figura 5.18 se muestra la posición de mayor exigencia al robot en las tareas analizadas. Respecto a esta tarea de atornillar la tapa del blindaje es que se calcularon las dosis de estos puntos.

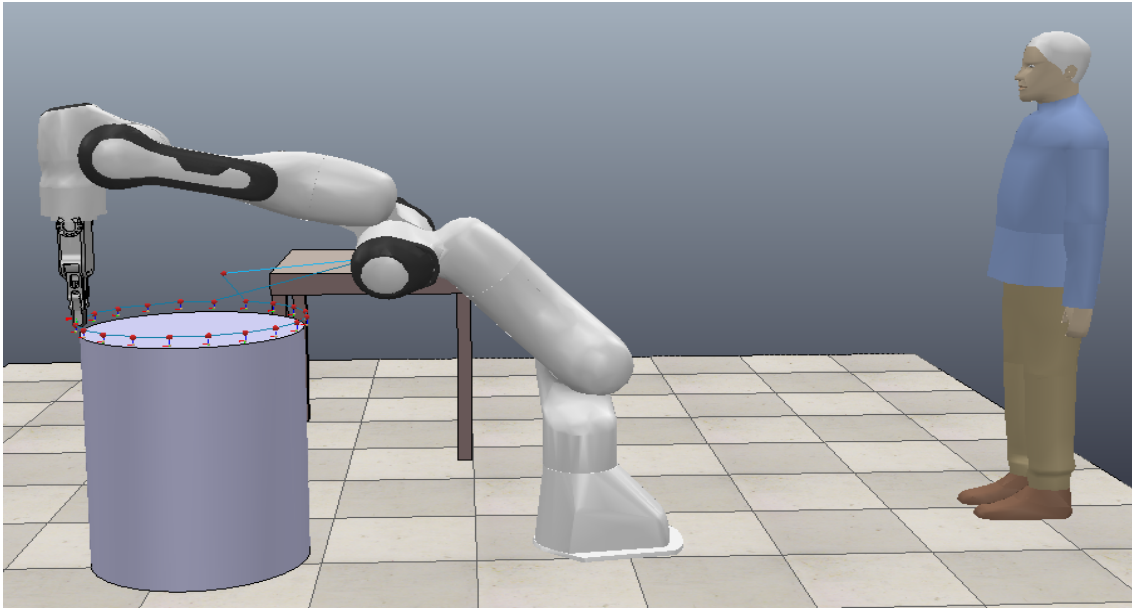


Figura 5.18: Simulación de la posición de mayor exigencia al brazo robótico en la tarea de atornillar la tapa de blindaje del Padirac.

Tarea	Dosis en Joint 1 [mGy]	Dosis en Joint 3 [mGy]	Dosis en Joint 5 [mGy]
7	$2.03E^{-2}$	$1.13E^{-2}$	$7.21E^{-3}$
8	$1.02E^{-2}$	$5.63E^{-3}$	$3.61E^{-3}$
13	$6.77E^{-2}$	$3.75E^{-2}$	$2.4E^{-2}$
14	$2.73E^{-2}$	$1.31E^{-2}$	$8.42E^{-3}$
15	$1.69E^{-2}$	$9.38E^{-2}$	$6.01E^{-3}$
17	$1.02E^{-2}$	$5.63E^{-2}$	$3.61E^{-3}$
Dosis Total	$1.49 E^{-1}$	$8.26E^{-2}$	$5.29 E^{-2}$

Tabla 5.6: Tabla de dosis en los puntos críticos del robot por tarea analizada.

El robot KUKA iiwa LBR del estudio analizado, fue expuesto a la radiación gamma y mostró una tolerancia significativa a la radiación, con un fallo en el codificador óptico luego de una exposición acumulada de 164.5 [Gy] durante 16.8 [h] [22].

Considerando la alta tasa a la que fue expuesto el robot durante las pruebas y comparando la tasa real de exposición de la tarea, se determina que el brazo Kuka iiwa LBR es apto para realizar tareas en un ambiente con radiactividad en un período de tiempo considerable antes de presentar falla.

Por otro lado, respecto al brazo robótico KUKA 1000 L750 Titan que se propuso para realizar tareas involucrada en la preparación del blindaje y despacho de placas de ^{99}Mo irradiadas en un reactor, se determinó mediante simulaciones que la exposición acumulada durante 44 [min] de operación es de 0.149 [mGy]. Se considera el valor de dosis del Joint 1 ya que durante todas las tareas se encuentra a la misma distancia de la fuente y tiene asociada la mayor dosis.

En el hipotético caso de despachar dos blindaje por día durante todo un año, la dosis integrada del Joint 1 sería de 0.109 [Gy] anual. Se puede considerar como una alternativa viable el uso del robot propuesto Kuka 1000 L750 Titan para realizar tareas con exposición a radiación gamma, sin preocuparse por una falla temprana asociada al daño por radiación.

5.6. Propuesta robot industrial

Los equipos de esta línea de KUKA cuentan además con un software en específico que permite controlar el robot. La posibilidad de llevar a cabo otras tareas además de las tres más relevantes, permiten aumentar el aprovechamiento del equipo.



Figura 5.19: Imagen representativa del brazo robótico industrial que se propone para la automatización. Modelo KUKA 1000 L750 Titan.

Gráfica del campo de trabajo

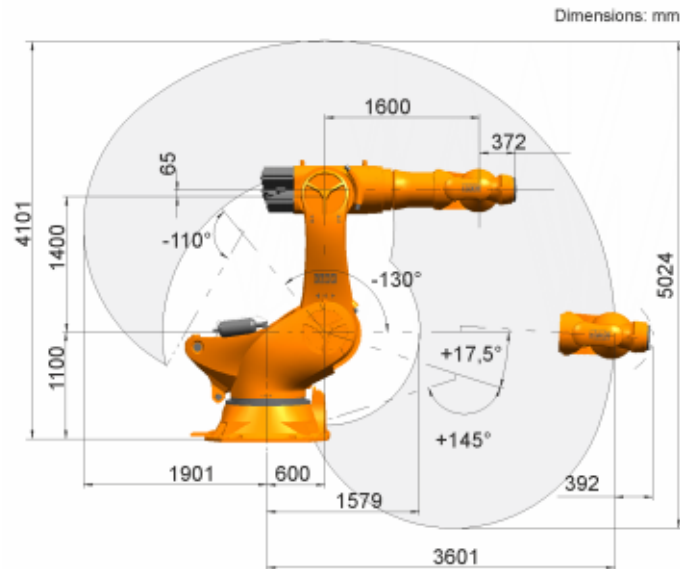


Figura 5.20: Gráfico del campo de trabajo del brazo robótico. Detalla el campo de acción de todas sus articulaciones.

En la Figura 5.20 se puede observar el campo de operación del brazo, teniendo en cuenta sus seis ejes. Además se adjunta en la Tabla 5.7 los principales datos técnicos del robot industrial propuesto como solución. La adquisición de este tipo de robot industrial, viene con una unidad de control, unidad manual de programación y un software específico.

Ficha Técnica KUKA 1000 L750 Titan	
Alcance máximo	3601 mm
Carga máxima	750 kg
Carga nominal	750 kg
Repetibilidad de posición (ISO 9283)	$\pm 0,1$ mm
Número ejes	6
Posición de montaje	Suelo
Superficie de colocación	2000 mm x 2000 mm
Peso aprox.	4740 kg
Temperatura de ambiente en servicio	10°C a 55°C

Tabla 5.7: Datos técnicos del brazo robótico KUKA modelo 1000 L750 Titan.

Se analizó el costo del brazo robótico propuesto con el equipo de control a partir de una entrevista con el representante de la empresa KUKA durante la FIMAQH - 2022 [23], en un valor aproximado de 80.000 USD.

Conclusiones

Como conclusión del Proyecto Final Integrador de la carrera, se logró comprender en detalle el proceso de producción de ^{99}Mo y los aspectos relevantes en el mismo. Se pudo conocer la importancia en el mercado mundial de este radioisótopo y la necesidad de buscar continuamente mejoras en el proceso.

A partir de esta necesidad de optimización en el proceso, se presentó la posibilidad de proponer un robot industrial que sea capaz de realizar ciertas tareas del proceso e incorporar en el área nuclear el uso de este tipo de tecnologías remotas, que antes no eran consideradas.

En el marco de este trabajo se estudiaron las tareas en detalle del proceso y se escogió una tarea que presenta la posibilidad de ser automatizada. Esta elección se fundamentó con las dosis en operador que tiene asociada la realización de dicha tarea. Uno de los objetivos de este proyecto es poder minimizar la dosis anual que recibe el operador durante el proceso y optimizar la tarea para aumentar la producción sin llegar a los límites de dosis anuales rápidamente.

Como se detalla en el desarrollo del proyecto se determinó que la tarea automatizar es el despacho del blindaje con los blancos irradiados para pasar a la etapa de procesamiento. En primer lugar el blindaje estudiado es un blindaje que se utiliza actualmente en el área nuclear para el transporte o traslado de material radiactivo.

Una vez adquiridos los detalles del diseño del blindaje y del paso a paso de las sub-tareas involucradas en el despacho de los blancos de ^{99}Mo , se procedió a calcular las dosis que recibe el operador. Para ellos se utilizó el programa *Micro-Shield* para modelar el blindaje con los distintos materiales que lo componen y los puntos de interés respecto al blindaje. De esta manera se obtuvieron los valores de dosis a los cuales se encuentra expuesto el operador.

Se propone un robot industrial para la realización de las tareas que conllevan mayor dosis asociada y se simulan estas tareas con el uso del programa *Coppelia-Sim*. A partir de estas simulaciones se aproximó las nuevas distancias de operación respecto al blindaje, y se procedió a calcular nuevamente las dosis en operador y en el robot con la automatización propuesta.

Por un lado se estudia y compara los valores de dosis en el operador sin implementar la automatización y con la automatización. Se puede ver que en una operación de carga de blindaje, la dosis en el operador baja un orden de magnitud. Por otro lado, se realizó el estudio de dosis en el robot y el daño por radiación que puede presentar, para determinar si la vida útil del robot es compatible con la inversión que se debería realizar. Se determinó que la dosis por exposición que recibe el robot en los puntos o joints de interés son muy bajas respecto a los valores manejados en otras investigaciones donde se estudio la viabilidad de estos robots [22]. Se consideró como

límite anual para la electrónica asociada al robot a 20 [Gy]. Según los cálculos obtenidos en el robot en la posición mas critica considerando la carga de dos blindajes por día durante un año es de 0.109 [Gy].

Por lo tanto, la propuesta del robot industrial KUKA 1000 L750 Titan para la automatización del despacho de los blancos irradiados desde el reactor, es viable. La dosis en operador disminuye un orden de magnitud por operación, lo que hace más atractiva la propuesta, cuanto más transporte de blanco se tenga. Respecto a la vida útil del robot que se encuentra expuesto a un ambiente radiactivo que recibe una dosis por exposición de 0.149 [mGy] en los 44 [min] de operación de mayor exigencia, recibe anualmente una dosis de 0.109 [Gy] valor de dos ordenes de magnitud menor al limite considerado por la electrónica asociada. Dado el hipotético caso de máximo trabajo en el que se cargan y despachan dos blindajes por día durante un año, la vida útil del brazo robótico se acopla a la vida operativa de un reactor dedicado a producción de radioisótopos.

Tablas de requerimientos de las tareas en cada etapa del proceso de producción de ^{99}Mo

A.1. Recepción de blancos

	Recepcion de blancos				
	Ingreso de placas	Inspeccion	Ingreso a deposito	Salida de deposito	Ingreso de blancos a celda caliente
control previo?	No	inspeccion visual	tarea anterior	no	si
tarea en aire (s/n)	si	si	si	si	si
tarea con distancia (s/n)	no	no	no	no	no
distancia (m)	-	-	-	-	-
en agua (s/n)	no	no	no	no	no
altura de agua (m)	-	-	-	-	-
dentro de celda (s/n)	no	no	no	no	si
espesor de blindaje (cm)	-	no	no	no	blindaje celda
uso de herramientas	no	no	no	no	si. Soportes
cantidad de operadores	1	1	1	1	2 operadores + Of RP
tiempo	10 minutos (desde entrada edificio hasta deposito)	minutos	minutos	minutos	minutos
cantidad x semana	1 vez x semana	1	1	1	1
reactor prendido/apagado	-	-	-	-	-
dosis (s/n)	no	no	no	no	no
tasa de dosis (mSv/h)	-	-	-	-	-
contaminacion (s/n)	no	no	no	no	no
contaminacion (Bq/cm ²)	-	-	-	-	-
ventilacion (s/n)	-	-	-	-	-
posibilidad automatizacion?	no	no	no	no	no
registro (papel/digital/otros)	Papel	-	-	-	-
control final ?	no	no	no	no	no

Figura A.1: Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de recepción de los blancos.

A.2. Irradiación de blancos

	Irradiacion				
	Ingreso portablancos a CC	Desarmado de portablancos	Entrega placas anterior	Carga de blancos frescos	Baja el portablancos al nucleo
control previo?	no	no	no	no	no
tarea en aire (s/n)	no	no	no	no	no
tarea con distancia (s/n)	si	si	si	si	si
distancia (m)	Distancia de celda	Distancia de celda	Distancia de celda	Distancia de celda	Distancia de celda
en agua (s/n)	no	no	no	no	no
altura de agua (m)	-	-	-	-	-
dentro de celda (s/n)	si	si	si	si	si
espesor de blindaje (cm)	blindaje celda	blindaje celda	blindaje celda	blindaje celda	blindaje celda
uso de herramientas	si	si	si	si	si
cantidad de operadores	2 operadores + Of RP	2 operadores + Of RP	2 operadores + Of RP	2 operadores + Of RP	2 operadores + Of RP
tiempo	minutos	10 minutos	1 hs	20 minutos	-
cantidad x semana	1	1	1	1	1
reactor prendido/apagado	apagado	apagado	apagado	apagado	apagado
dosis (s/n)	-				
tasa de dosis (mSv/h)	no				
contaminacion (s/n)	-	-	-	-	-
contaminacion (Bq/cm ²)	-	-	-	-	-
ventilacion (s/n)	si	si	si	si	si
posibilidad automatizacion?	no	no	no	no	no
registro (papel/digital/otros)	-	-	-	-	-
control final ?	no	no	no	no	no

Figura A.2: Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de irradiación de los blancos. Parte 1.

APÉNDICE A. TABLAS DE REQUERIMIENTOS DE LAS TAREAS EN CADA ETAPA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ⁹⁹MO

	Irradiación					
	Irradiación	Enfriamiento	Sube el portamuestras	Ingreso a celda caliente	Desarmado de portablanco	Carga de cartuchos
control previo?	no	no	no	no	no	no
tarea en aire (s/n)	no	no	no	no	no	no
tarea con distancia (s/n)	si	si	si	si	si	si
distancia (m)	sala de control	sala control	Distancia de celda	Distancia de celda	Distancia de celda	Distancia de celda
en agua (s/n)	si	si	no	no	no	no
altura de agua (m)	10 m	10 m	-	-	-	-
dentro de celda (s/n)	no	no	si	si	si	si
espesor de blindaje (cm)			blindaje celda	blindaje celda		blindaje celda
uso de herramientas	no	no	si	si	si	si
cantidad de operadores	dos operadores, jefe turno, oficialRP	dos operadores, jefe turno, oficialRP	2 operadores + Of RP	2 operadores + Of RP	2 operadores + Of RP	2 operadores + Of RP
tiempo	68 hs	9 hs	30 minutos			
cantidad x semana	1	1	1	1	1	1
reactor prendido/apagado	prendido	apagado	apagado	apagado	apagado	apagado
dosis (s/n)						
tasa de dosis (mSv/h)						
contaminación (s/n)	-	-	-	-	-	-
contaminación (Bq/cm ²)	-	-	-	-	-	-
ventilación (s/n)	si	si	si	si	si	si
posibilidad automatización?	no	no	no	no	no	no
registro (papel/digital/otros)	-	-	-	-	-	-
control final ?	no	no	no	no	no	no

Figura A.3: Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de irradiación de los blancos. Parte 2.

APÉNDICE A. TABLAS DE REQUERIMIENTOS DE LAS TAREAS EN CADA ETAPA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ⁹⁹MO

	Irradiación						
	Ingreso blindaje a PB	Envío de prueba	Recepcion de prueba	Envío cartucho cargado	Recepcion en el blindaje	Extraccion del blidaje	Traslado del blindaje a PF
control previo?	no	no	no	si	si	si	no
tarea en aire (s/n)		no	no	no	no		
tarea con distancia (s/n)	no	si	si	si	si	no	-
distancia (m)	-	Distancia de celda	2 m desde el blindaje	Distancia de celda	2 m desde el blindaje		
en agua (s/n)	no	no	no	no	no	no	no
altura de agua (m)	-	-	-	-	-	-	-
dentro de celda (s/n)	no	si	no	si			
espesor de blindaje (cm)	blindaje celda	blindaje celda					
uso de herramientas	si	si	no	si	no	no	no
cantidad de operadores	3 operadores + 2 Of RP	3 operadores + 2 Of RP	3 operadores + 2 Of RP	3 operadores + 2 Of RP	3 operadores + 2 Of RP	3 operadores + 2 Of RP	1 operador + 1 OfRP
tiempo	40 minutos						
cantidad x semana	1	1	1	1	1	1	1
reactor prendido/apagado	apagado	apagado	apagado	apagado	apagado	apagado	apagado
dosis (s/n)							
tasa de dosis (mSv/h)							
contaminacion (s/n)	-	-	-	-	-	-	-
contaminacion (Bq/cm2)	-	-	-	-	-	-	-
ventilacion (s/n)	si	si	si	si			
posibilidad automatizacion?	no	no	no	no	no	si	si.
registro (papel/digital/otros)	-	-	-	-	-	-	si.Papel
control final ?	no	no	no	no	si	no	si

Figura A.4: Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de irradiación de los blancos. Parte 3.

A.3. Procesamiento de blanco

A.3.1. Planta de Fisión

	Planta de Fisión					
	Recepcion de blanco caliente	Ingreso a celda	Desarme de cartucho	Disolucion de blanco	Filtrado	Lavado y elucion
control previo?	si	si	n/a	n/a	n/a	n/a
tarea en aire (s/n)	-		si, manipulación de los bcos irradiados en celda	No	No (se ingresa aire)	Si
tarea con distancia (s/n)	-	-	-	-	-	-
distancia (m)	mínimo 1 m (entra un blindaje en un carro)	menor a 1 m del operador	n/a	n/a	n/a	n/a
dentro de celda (s/n)	no	no	si	si	si	si
espesor de blindaje (cm)	-	-	blindaje celda (confirmar con CNEA para celdas similares)	blindaje celda	blindaje celda	blindaje celda
uso de herramientas	si	si	si	no	no	no
Que herramientas?	pinzas	pinzas	telemanipuladores + herramientas tipo pinzas	-	-	-
cantidad de operadores	2 o 3	2 o 3	1	1	1	1
tiempo de tarea [min]	15 min aprox por cartucho, hasta llegar al acceso posterior de celda	por cartucho 20 min aprox (CNEA entra 3 cartuchos con 4 placas por vez)	10 min máx por cartucho	1 hora y media	3 horas	aprox 1 hora y media
dosis (s/n)	si	si	no	no	no	no
tasa de dosis (mSv/h)	Confirmar con CNEA	-	-	-	-	-
contaminacion (s/n)	si, pero depende de buena manipulacion	si, pero depende de buena manipulacion	no	no	no	no
contaminacion (Bq/cm2)	-	-	-	-	-	-
ventilacion (s/n)	si	si	si, de celda	si, de celda	si, de celda	si, celda
control final ?	-	si	no	no	no	no
Genera residuos?	Si, si hay sweep test, guantes, etc	no	no	no	si	si
Que tipo de residuos?	-	-	-	-	potencialmente activos, sólidos	Columnas, resinas
libera gases? (s/n)	no	no	no	si	si	si
control de PH?	no	no	no	no	no	no
que valor de PH?	-	-	-	-	-	no
Temperatura de trabajo?	Tamb	Tamb	T dentro de celda	máx 90°C ?	< 60°C (?)	< 60°C (?)
Presion de trabajo?	Patm	Patm	depression valor?	depression	depression	vacío para la carga y elucion (5 a 20 mm Hg)
posibilidad automatizacion?	si	si	si	no	no	si
registro (papel/digital/otros)	si, papel	si, papel	si, papel	si, papel	si, papel	si, papel

Figura A.5: Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de procesamiento de los blancos que se realiza en la Planta de Fisión. Parte 1.

APÉNDICE A. TABLAS DE REQUERIMIENTOS DE LAS TAREAS EN CADA ETAPA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ⁹⁹MO

	Planta de Fisión					
	Retencion de Mo-99 en resina	Acomplejamiento Mo	Lavado y elucion	Ajuste PH	Carga en columna de alumina	Traspaso a PPR
control previo?	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	si
tarea en aire (s/n)	-	-	-	-	-	si
tarea con distancia (s/n)	-	-	-	-	-	si
distancia (m)	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	mas de 1 m
dentro de celda (s/n)	si	si	si	si	si	no
espesor de blindaje (cm)	blindaje celda	blindaje celda	blindaje celda	blindaje celda	blindaje celda	Invap usamos un contenedor de 70 mm Pb+Sb
uso de herramientas	no	no	no	si	no	si
Que herramientas?	-	-	-	varilla para mojar el papel	-	herramientas para traspaso de can con
cantidad de operadores	1	1	1	1	1	3 mínimo
tiempo de tarea [min]	n/a	1/2 hora aprox	1 hora aprox	10 min máx	40- 1 hora aprox	20 min aprox
dosis (s/n)	no	no	no	no	no	si
tasa de dosis (mSv/h)	-	-	-	-	-	?
contaminacion (s/n)	no	no	no	no	-	no es comun pero puede ocurrir
contaminacion (Bq/cm2)	-	-	-	-	-	-
ventilacion (s/n)	si,celda	si,celda	si,celda	si,celda	si,celda	si, de sala
control final ?	no	no	no	no	si	si
Genera residuos?	si	no	si	si	si	depende si hubo algun derrame o similar
Que tipo de residuos?	columna, resina	-	residuo de carga de	papel de pH y algodones	residuo elucion alumina (residuos)	algodones, papeles
libera gases? (s/n)	si	si	no	no	no	no
control de PH?	no	no	no	si	no	no
que valor de PH?	no	no	no	acido (no	-	no
Temperatura de trabajo?	< 60°C (?)	< 60°C (?)	< 60°C (?)	< 60°C (?)	< 60°C (?)	ambiente
Presion de trabajo?	n/a	n/a	vacío para transferencias?	n/a	n/a	n/a
posibilidad automatizacion?	no	no	no		puede que si en recepcion en	si
registro (papel/digital/otros)	si, papel	si, papel	si, papel	si,papel	si, papel	si, papel

Figura A.6: Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de procesamiento de los blancos que se realiza en la Planta de Fisión. Parte 2.

A.3.2. Planta de Producción de Radioisótopos

	Procesamiento del blanco - Planta de producción de Radioisótopos			
	Recepcion de Mo intermedio	Ingreso a celda	Evaporacion	Disolucion de ppdo
control previo?	-	si	si. Control radiacion de fondo	-
tarea en aire (s/n)	-	si	-	-
tarea con distancia (s/n)	-	si	-	-
distancia (m)	-	mas de 1m	-	-
dentro de celda (s/n)	-	no	-	-
uso de herramientas	-	si	-	-
Que herramientas?	-	herramientas para paso de chancha a interior de celda.. Pinzas y similares	-	-
cantidad de operadores	-	2	-	-
tiempo de tarea [min]	-	menos de 30 min	-	-
dosis (s/n)	si	-	-	-
tasa de dosis (mSv/h)	-	-	-	-
contaminacion (s/n)	-	no, pero es posible si la tarea se realiza mal o se abre la chancha y el vial esta roto	-	-
ventilacion (s/n)	si, zona controlada y celda	si, zona controlada y celda	si, zona controlada y celda	-
control final ?	-	no	-	-
Genera residuos?	-	no, (salvo que se rompa el vial que en ese caso hay papeles, algodones)	-	-
Que tipo de residuos?	-	papeles, algodones si es necesario	-	-
libera gases? (s/n)	-	no	-	-
control de PH?	-	no	-	-
que valor de PH?	-	no	-	-
Temperatura de trabajo?	-	ambiente	-	-
Presion de trabajo?	-	-	-	-
posibilidad automatizacion?	-	si	-	-
registro (papel/digital/otros)	-	si, papel	si, papel	si, papel

Figura A.7: Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de procesamiento de los blancos que se realiza en la Planta de Producción de Radioisótopos. Parte 1.

	Procesamiento del blanco - Planta de producción de Radioisotopos				
	Dilucion	Filtracion en vacio	Control Calidad	Modificacion PH final	Fraccionamiento
control previo?	-	-	-	-	-
tarea en aire (s/n)	-	-	-	-	-
tarea con distancia (s/n)	-	-	-	-	-
distancia (m)	-	-	-	-	-
dentro de celda (s/n)	-	-	-	-	-
uso de herramientas	-	-	-	phimetro	-
Que herramientas?	-	-	-	-	-
cantidad de operadores	-	-	-	-	-
tiempo de tarea [min]	-	-	-	-	-
dosis (s/n)	-	-	-	-	-
tasa de dosis (mSv/h)	-	-	-	-	-
contaminacion (s/n)	-	-	-	-	-
ventilacion (s/n)	-	-	-	-	-
control final ?	Calculo de volumen final de lote	-	si	-	Calculo de vol a fraccionar
Genera residuos?	-	-	-	-	-
Que tipo de residuos?	-	-	-	-	-
libera gases? (s/n)	-	-	-	-	-
control de PH?	-	-	-	-	-
que valor de PH?	-	-	-	-	-
Temperatura de trabajo?	-	-	-	-	-
Presion de trabajo?	-	-	-	-	-
posibilidad automatizacion?	-	-	-	-	-
registro (papel/digital/otros)	si,papel	si,papel	si,papel	si, papel	si, papel

Figura A.8: Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de procesamiento de los blancos que se realiza en la Planta de Producción de Radioisótopos. Parte 2.

A.4. Gestión de Residuos Radiactivos

	Corriente1 - Residuos Gaseosos		
	Corriente arrastrada por N2	Almacenamiento en tanque	Liberacion por chimenea
control previo?	-	no	si
tarea en aire (s/n)	-	no	si
tarea con distancia (s/n)	si	si	-
distancia (m)	del blindaje	desde celda al tanque	-
dentro de celda (s/n)	si. En el proceso de diso	no	no
espesor de blindaje (cm)	-	-	-
uso de herramientas	-	si	-
Que herramientas?	-	tanques de 1000 L con	-
cantidad de operadores	1. del proceso de disolu	-	-
tiempo de tarea [min]	-	hasta decaimiento de X	-
dosis (s/n)	-	-	-
tasa de dosis (mSv/h)	-	-	-
contaminacion (s/n)	-	-	-
contaminacion (Bq/cm2)	-	-	-
ventilacion (s/n)	no	no	-
control final ?	no	-	si, antes de liberar al ambiente
Que tipo de residuos?	-	-	-
libera gases? (s/n)	no	no	si
se trabaja en vacio?	-	-	-
liberacion al ambiente?	no	no	si
posibilidad automatizacion?	-	-	-
registro (papel/digital/otros)	-	-	si papel, dosis final_

Figura A.9: Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de gestión de residuos generados a partir de la producción de ⁹⁹Mo. Corriente 1: Residuos gaseosos.

	Corriente 2 - Residuos solidos				
	2.a - Filtros				
	Acumula en celda	Sellado del contenedor	Sale de celda	Almacenamiento	Traspaso para Reprocesamiento
control previo?	-	no	si	si	si
tarea en aire (s/n)	no	no	-	-	-
tarea con distancia (s/n)	si	si. de la celda	-	-	-
distancia (m)	de celda	-	-	-	-
dentro de celda (s/n)	si	si	-	no	no
espesor de blindaje (cm)	blindaje de celda	el de celda	10 cm de Pb	10 cm Pb	10 cm de Pb
uso de herramientas	si	si	si	-	si
Que herramientas?	telemanipuladores	telemanipuladores	blindaje de trans	-	blindaje y telemanipul
cantidad de operadores	1	1	-	2	2-3
tiempo de tarea [min]	-	minutos.	20 min	-	-
dosis (s/n)	-	-	-	-	-
tasa de dosis (mSv/h)	-	-	-	~ 2 mSv/h	-
contaminacion (s/n)	-	si puede contamin	si puede contam	-	si puede contaminarse
contaminacion (Bq/cm2)	-	-	-	-	-
ventilacion (s/n)	si. de celda	celda	-	-	no
control final ?	no	no	-	-	-
Que tipo de residuos?	-	Solidos de baja act	Solidos de baja a	-	-
libera gases? (s/n)	-	no	-	no	no
se trabaja en vacio?	-	-	-	-	-
liberacion al ambiente?	-	no	no	-	-
posibilidad automatizacion?	-	-	-	-	-
registro (papel/digital/otros)	-	-	-	-	-

Figura A.10: Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de gestión de residuos generados a partir de la producción de ⁹⁹Mo. Corriente 2a: Residuos sólidos (Filtros).

	Corriente 2 - Residuos solidos			
	2.b - Otros residuos solidos(mangueras, papeles...)			
	Acumula en celda	Sale de celda	Compactacion	Cementacion
control previo?	-	si	-	-
tarea en aire (s/n)	no	-	-	-
tarea con distancia (s/n)	si	-	-	-
distancia (m)	de celda	-	-	-
dentro de celda (s/n)	si	-	-	-
espesor de blindaje (cm)	blindaje de celda	-	-	-
uso de herramientas	si	-	-	-
Que herramientas?	telemanipulador	-	-	-
cantidad de operadores	1	1	-	-
tiempo de tarea [min]	-	-	-	-
dosis (s/n)	-	si	-	-
tasa de dosis (mSv/h)	-	2mSv/h	-	-
contaminacion (s/n)	-	-	-	-
contaminacion (Bq/cm ²)	-	-	-	-
ventilacion (s/n)	si. de celda	-	-	-
control final ?	no	-	-	-
Que tipo de residuos?	-	Compactables	-	-
libera gases? (s/n)	-	no	-	-
se trabaja en vacio?	-	-	-	-
liberacion al ambiente?	-	-	-	-
posibilidad automatizacion?	-	-	-	-
registro (papel/digital/otros)	-	-	-	-

Figura A.11: Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de gestión de residuos generados a partir de la producción de ⁹⁹Mo. Corriente 2b: Otros residuos sólidos.

	Corriente 3 - Residuos líquidos				
	3.a - Primer Corriente de líquido alcalino AG1				
	Almacenamiento en tanques	Transferencia en vacío	Ingreso a tambor 400	Cementación	Almacenamiento final
control previo?	no	no	no	-	-
tarea en aire (s/n)	no	-	-	-	-
tarea con distancia (s/n)	si	-	-	-	-
distancia (m)	desde celda al tanq	-	-	-	-
dentro de celda (s/n)	no	-	-	-	-
espesor de blindaje (cm)	-	3 cm de Pb. Tanq	-	-	-
uso de herramientas	si	si	si	-	-
Que herramientas?	tanques de 100 L d	tanque encamisado	tanque 400L	-	-
cantidad de operadores	-	-	-	-	-
tiempo de tarea [min]	hasta decaimiento	-	-	-	--
dosis (s/n)	-	si	si	-	-
tasa de dosis (mSv/h)	-	~100mSv/h	~100mSv/h	-	-
contaminación (s/n)	-	-	-	-	-
contaminación (Bq/cm ²)	-	-	-	-	-
ventilación (s/n)	no	no	no	-	-
control final ?	-	-	-	-	-
Que tipo de residuos?	-	Líquido ILLW (ac)	Líquido ILLW (ac)	-	-
libera gases? (s/n)	no	no	no	-	-
se trabaja en vacío?	-	-	-	-	-
liberación al ambiente?	no	-	-	-	-
posibilidad automatización?	-	-	-	-	-
registro (papel/digital/otros)	-	-	-	-	-

Figura A.12: Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de gestión de residuos generados a partir de la producción de ⁹⁹Mo. Corriente 3a: Residuos líquidos (corriente alcalina AG1).

	Corriente 3 - Residuos líquidos		
	3.b - Otros residuos líquidos		
	Almacenamiento tanque	Ingresos a garrafas	Almacenamiento final
control previo?	no	-	-
tarea en aire (s/n)	no	-	-
tarea con distancia (s/n)	si	-	-
distancia (m)	desde celda al tanque	-	-
dentro de celda (s/n)	no	-	-
espesor de blindaje (cm)	-	-	-
uso de herramientas	-	-	-
Que herramientas?	-	-	-
cantidad de operadores	-	-	-
tiempo de tarea [min]	hasta decaimiento	-	-
dosis (s/n)	-	-	-
tasa de dosis (mSv/h)	-	-	-
contaminación (s/n)	-	-	-
contaminación (Bq/cm ²)	-	-	-
ventilación (s/n)	no	-	-
control final ?	-	-	-
Que tipo de residuos?	-	-	-
libera gases? (s/n)	no	-	-
se trabaja en vacío?	-	-	-
liberación al ambiente?	no	-	-
posibilidad automatización?	-	-	-
registro (papel/digital/otros)	-	-	-

Figura A.13: Imagen de la Tabla con los requerimientos detallados de cada tarea involucrada en la etapa de gestión de residuos generados a partir de la producción de ⁹⁹Mo. Corriente 3b: Otros residuos líquidos.

Gráficos de puntos modelados en Micro-Shield

B.1. Dosis en operador implementando la automatización

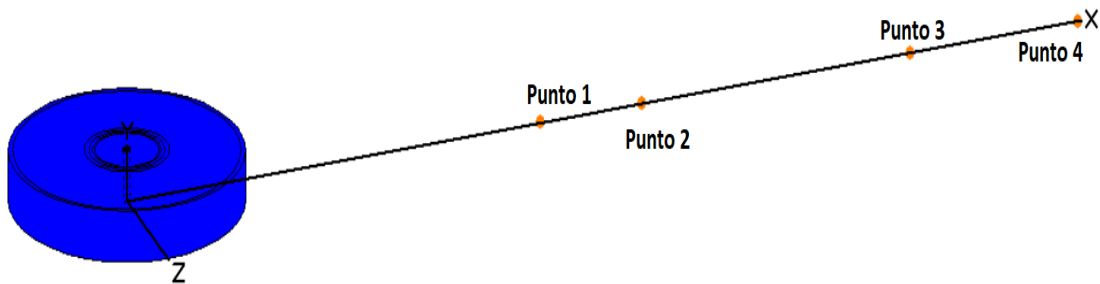


Figura B.1: Modelado de la fuente y el blindaje en *Micro-Shield* con los puntos asociados a la posición del operador en las tareas estudiadas implementando la automatización.

Punto de interés	Distancia desde la fuente en X [cm]
1	123.2
2	153.2
3	233.2
4	283.2

Tabla B.1: Información de los puntos de interés para el cálculo de dosis en operador en las distintas sub-tareas involucradas en el despacho de blancos de ^{99}Mo irradiados implementando la automatización.

B.2. Dosis en el robot

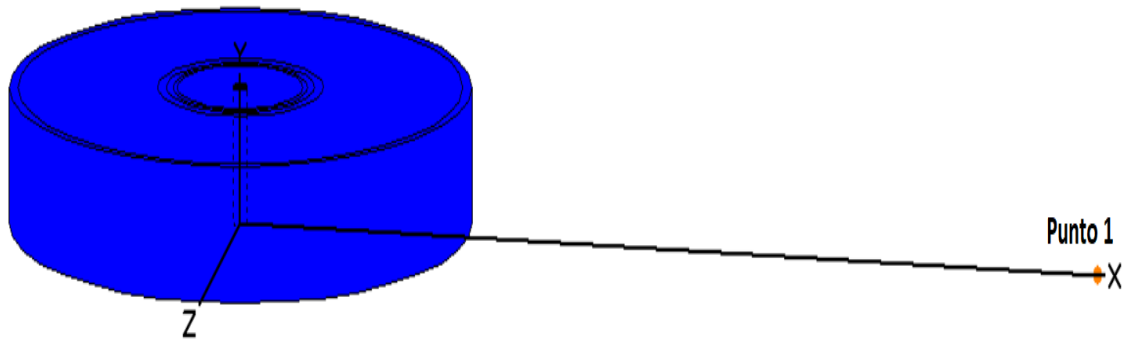


Figura B.2: Modelado de la fuente y el blindaje en *Micro-Shield* con el punto asociado a la posición del Joint 1 durante las tareas de interés.

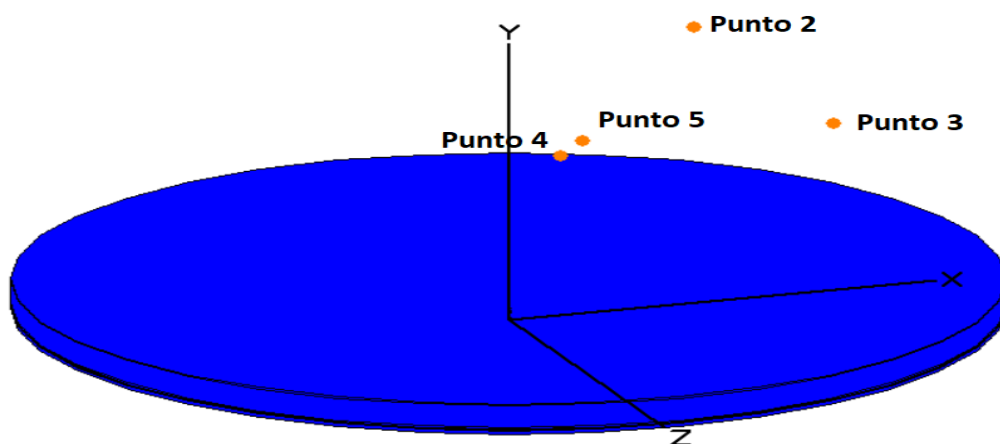


Figura B.3: Modelado de la fuente y el blindaje en *Micro-Shield* con los puntos asociados a las posiciones del Joint 3 y del Joint 5 durante las tareas de interés.

Punto de interés	Distancia desde la fuente en X [cm]	Distancia desde la fuente en Y [cm]	Distancia desde la fuente en Z [cm]
1	125	-	-
2	125	250	-
3	125	250	257
4	35	144	-
5	50	156	-

Tabla B.2: Puntos de interés para el calculo de dosis en los joints de interés del Robot en las distintas sub-tareas involucradas en el despacho de blancos de ^{99}Mo irradiados implementando la automatización.

Bibliografía

- [1] Nuclear Energy Agency. The supply of medical radioisotopes: *An assessment of long-term global demand of technetium-99m*
- [2] Revista *CUINAP Argentina* - 'Empresas publicas y mixtas, tecnología y desarrollo II'. El caso INVAP. Zappino, Jorge Salvador.
- [3] CEA Monograph, *Research Nuclear Reactors*
- [4] IAEA-TECDOC-1430, *Radioisotope handling facilities and automation of radioisotope production*
- [5] IAEA-TECDOC-1340, *Manual for reactor produced radioisotopes*
- [6] Publicación de ARN, 2016 *La ARN informa sobre un nuevo límite de dosis equivalente en cristalino para trabajadores ocupacionalmente expuestos*
- [7] Características Reactor RA-3, Página oficial del gobierno de la nación. <https://www.argentina.gov.ar/cnea/Tecnologia-nuclear/reactores-de-investigacion/ra-3>
- [8] E. Pozzi-' Diseño y caracterización de un nuevo blindaje neutrónico para la aplicación de BNCT en un modelo experimental de cáncer bucal en el reactor RA-3 '
- [9] Informe de seguridad del reactor RA-3, IS-RA3-01
- [10] Características Reactor RA-10, Página oficial del gobierno de la nación.<https://www.argentina.gov.ar/cnea/ra10/caracteristicas-tecnicas>
- [11] Apuntes teóricos de la materia *Producción de Radioisótopos*. Ing. Germán Chetri.
- [12] Carranza E.C., Novello A., Bronca M. -*Producción de Mo-99 por fisión y proyección a futuro* https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/127/46127049.pdf
- [13] Planta de producción de Radioisótopos, Página oficial de la Nación. <https://www.argentina.gov.ar/cnea/cae/instalacion-e-instalaciones/radioquimica/planta-de-produccion-de-radioisotopos>
- [14] Página oficial de empresa Lcalhene. <https://www.lcalhene.com/int/applications-products/transport/padirac/>
- [15] Ficha técnica del blindaje tipo Padirac. <https://www.lcalhene.com/siteassets/la-calhene/application--products/transport/padirac/lcalhene-padirac-en-2021.pdf>
- [16] Micro Shield User's Manual - Grove Software
- [17] Norma ISO 8373:2012.<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en>
- [18] Barrientos, Antonio. *Fundamentos de robótica*.
- [19] http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0708/archivos/_15/Tema_5.4.htm
- [20] Página oficial del simulador *Coppelia-Sim*.<https://www.coppeliarobotics.com/>

- [21] Ficha técnica del brazo KUKA 1000 L750 Titan. https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000156586_es.pdf?rev=eb163874545846ec85301b26944b1d1d&hash=A0692FF23DDCD318C378D15F82DE1060
- [22] Kaiqiang, Z., Hutson, C. '*Radiation Tolerance Testing Methodology of Robotic Manipulator Prior to Nuclear Waste Handling*'- Artículo Científico. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frobt.2020.00006/full>
- [23] Feria Internacional de la Máquina, Herramienta y Tecnologías para la Producción - 2022. <https://www.fimaqh.com/2022/es/inicio/>

Agradecimientos

Antes que nada agradecer el apoyo incondicional de toda mi familia. A mi papá Oscar, por ser mi sostén y mi mayor fan, a mis hermanos Andrés y Carla por escucharme todos los días con los mismos problemas y dudas, y estar ahí para darme una palabra de aliento. Pero principalmente le dedico mi trabajo final y todo el esfuerzo detrás del mismo, a mi mamá Simona que a pesar de no estar compartiendo físicamente este logro, siempre me acompaña en el corazón. Gracias a ella por haberme enseñado a no bajar nunca los brazos y perseguir siempre mis sueños.

A mi familia en Bs. As. Lili, Chanco, Pri, Mili y Nahuel por su constante compañía y amor. En particular a mis primas Pri y Mili por ser mi contención emocional todo este tiempo.

A mis amigos de Salta: Mili, Tarzán, Rubén, Julio, Juanchi, Tadeo y Rama por alentarme constantemente a lo largo de estos años, estar siempre al pie del cañón a pesar de la distancia y escucharme llorar y quejarme mil y un veces por lo mismo. A mis amigas de toda la vida Sara, Andi, Rocio y Camila que me acompañaron en los peores momentos de mi vida y me siguen alentando en los mejores.

A Laura, que sin su ayuda no hubiese podido enfrentar mis miedos y enfocarme en mis metas. Por enseñarme a valorar cada pequeño paso dado hasta llegar a este punto.

A mis compañeros del instituto, Christian, Mariel y Camila que me apoyaron en un momento difícil y sin los cuales no hubiera podido retomar el ritmo. En especial a mi gran amiga Camila. Por esas salidas al Café San Bernardo, acompañadas de una cerveza y una buena tortilla de papa. Por todas nuestras charlas, momentos de colpaso y sobre todo por siempre alentarnos una a la otra.

A Ariel por su predisposición a darme una mano con información o cualquier detalle que necesitara para el proyecto. A Robert por estar a disposición de despejar mis dudas y aconsejarme en este último trayecto.

A Pablo, los directivos y profesores del instituto, que estuvieron en el paso a paso de mi carrera, sobre todo en un momento difícil. A Vero que siempre esta dispuesta dar un consejo o charlar en un momento de crisis.

A mis directores Daniel, Martín y José por su paciencia y predisposición constante a responder mis dudas y encaminarme en este proyecto.

Finalmente agradecer a las personas de INVAP, del RA-3 y CNEA por responder cada pregunta o duda respecto a la información necesaria para mi trabajo.