

“Cuantificación de las dosis recibidas en las tareas de mantenimiento por los trabajadores ocupacionalmente expuestos de la unidad ciclotrón.”

Trabajo Final para obtener el Título de Especialista en Radioquímica y Aplicaciones Nucleares.

Alumna: Bioing. Gregorutti, Marianela

Director: M.Sc. Bioing. Belloto, Iván E.

Co-directora: M.Sc. Lic. Papp, Cinthia



UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN



Comisión Nacional
de Energía Atómica

Noviembre 2023

Índice

Índice	2
Resumen	4
Abstract	5
Índice de abreviaturas	6
Introducción	7
Objetivo	8
Capítulo 1	9
1.1. Radiactividad.....	9
1.2. Desintegraciones radiactivas.....	10
1.3. Características de las radiaciones ionizantes.....	11
1.4. Interacción de la radiación con la materia.....	12
1.5. Magnitudes dosimétricas de importancia en radioprotección.....	15
1.6. Instrumentos de detección.....	15
I. Detectores gaseosos.....	16
II. Detectores de neutrones.....	18
III. Detectores de centelleo.....	18
IV. Detectores OSL.....	18
Capítulo 2	19
2.1. Efectos biológicos de las RI y penetración en los tejidos.....	19
2.2. Clasificación de los efectos.....	20
2.3. Protección radiológica.....	22
2.3.1. Herramientas de protección radiológica.....	23
2.4. Principio de optimización.....	23
2.5. Límites de dosis.....	24
Capítulo 3	26
3.1. Radiofármacos.....	26
3.2. Ciclotrón.....	26
Capítulo 4	28
4.1. Presentación de la instalación.....	28
4.2. Monitoreo y seguridad.....	30
4.3. Acelerador PET Trace 800.....	32
4.3.1. Subsistemas.....	32
4.4. Operación.....	38
4.5. Mantenimiento.....	38
4.5.1. Mantenimiento de Targets.....	40
Capítulo 5	42
5.1. Método de mediciones.....	42
5.1.1. Monitoreo ambiental.....	42
Parte A: Tasas de dosis medidas dentro del búnker para diferentes sitios.....	42
Parte B: Tasas de dosis de los residuos y piezas activadas.....	42

Parte C: Tasas de dosis en diferentes posiciones de trabajo durante mantenimiento.	
43	
5.1.2. Monitoreo del personal.....	43
Parte A: Monitoreo por lectura diferida.....	44
Parte B: Monitoreo por lectura directa en tareas de mantenimiento.....	44
Capítulo 6.....	46
6. Análisis de resultados.....	46
6.1.1. Monitoreo ambiental.....	46
Parte A: Tasas de dosis medidas dentro del búnker para diferentes sitios.....	46
Parte B: Tasas de dosis de los residuos y piezas activadas.....	47
Parte C: Tasas de dosis en diferentes posiciones de trabajo durante mantenimiento.	
49	
6.1.2. Monitoreo del personal.....	52
Parte A: Monitoreo por lectura diferida.....	52
Parte B: Monitoreo por lectura directa en tareas de mantenimiento.....	58
Conclusiones.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....	63
ANEXO.....	65
Anexo 1. Mediciones de tasa de dosis ambiental $H^*(10)$ con monitor de área.....	65
Anexo 2. Mediciones de dosis personal con monitor EPD.....	66

Resumen

El presente trabajo se enmarca en la Fundación para la Lucha contra las Enfermedades Neurológicas Infantiles (FLENI), específicamente en la unidad Ciclotrón del Centro de Imágenes Moleculares (CIM), ubicado en Escobar, provincia de Buenos Aires, Argentina.

En los primeros capítulos se realiza una breve reseña bibliográfica, abordando conceptos necesarios para la comprensión del tema en estudio; como lo son las radiaciones ionizantes (RI), los mecanismos de interacción con la materia, los instrumentos de detección y normativas vigentes, entre otros.

A continuación se presentan los métodos de medición utilizados para cumplir con el objetivo de análisis y la dosis recibida por los Trabajadores Ocupacionalmente Expuestos (TOE) del ciclotrón. Para lo cual, se relevaron las tasas de dosis en diferentes áreas y las dosis del personal. Se utilizaron los datos arrojados por la dosimetría diferida (tecnología luminiscencia ópticamente estimulada (OSL)) para las mediciones sobre los TOE correspondientes a un período de 5 años. Específicamente, para el año 2022, se analizaron las dosis recibidas durante cada mes de trabajo y mediante dosímetros electrónicos personales (EPD), se tomaron mediciones para discriminarlas por tareas realizadas durante los distintos mantenimientos. Adicionalmente, se discriminaron las tasas de dosis de fondo de cada área de trabajo, pieza activa o residuo de manera de contar con resultados más representativos de la dosis recibida por cada tarea realizada.

Los resultados de las mediciones en los TOE arrojan una tendencia de aumento en las dosis recibidas en correspondencia directa con el aumento de los mantenimientos correctivos realizados sobre el equipo. Se concluye que el incremento en las intervenciones requeridas en el ciclotrón, además de deberse a un aumento en la producción de radiofármacos, también son producto del uso y años de desempeño del equipo.

Ante este planteo, es recomendable implementar acciones de mejora que procuren disminuir las dosis recibidas por los trabajadores durante los mantenimientos correctivos, fortaleciendo los criterios de la protección radiológica. Por lo antes concluido, estas acciones deberían incluir una actualización con sustitución de piezas del equipo y una mejor distribución de tareas entre los trabajadores de manera de lograr equidad en las dosis recibidas por cada TOE.

Abstract

This work is part of the “Fundación para la Lucha contra las Enfermedades Neurológicas Infantiles” (FLENI), specifically in the Cyclotron unit of the Molecular Imaging Center (CIM), located in Escobar, province of Buenos Aires, Argentina.

In the first chapters a brief bibliographic review is made, addressing concepts necessary for the understanding of the subject under study; such as ionizing radiation (IR), interaction mechanisms with matter, detection instruments and current regulations, among others.

Below are the measurement methods used to meet the objective of analysis and the dose received by Occupationally Exposed Workers (TOE) from the cyclotron. For which, the dose rates in different areas and the doses of the personnel were collected. Data from delayed dosimetry (optically stimulated luminescence (OSL) technology) were used for TOE measurements over a 5-year period. Specifically, for the year 2022, the doses received during each month of work were analyzed and, using electronic personal dosimeters (EPD), measurements were taken to discriminate them by tasks performed during the different maintenance. In addition, the background dose rates of each work area, active piece or residue were discriminated in order to have more representative results of the dose received for each task performed.

The results of the measurements in the TOE show a trend of increase in the doses received in direct correspondence with the increase in corrective maintenance performed on the equipment. It is concluded that the increase in the interruptions required in the cyclotron, in addition to being due to an increase in the production of radiopharmaceuticals, are also a product of the use and years of performance of the equipment.

Given this approach, it is advisable to implement actions that seek to reduce the doses received by workers during corrective maintenance, strengthening the improvement of radiological protection criteria. Due to what has been previously concluded, these actions will include an update with the replacement of pieces of equipment and a better distribution of tasks among the workers in order to achieve equity in the doses received by each TOE.

Índice de abreviaturas

ACU: Unidad de Control del Acelerador. Del inglés: Accelerator Control Unit.

ALI: Límite Anual de Incorporación. Del inglés: Annual incorporation limit.

ARN: Autoridad Regulatoria Nuclear.

CIM: Centro de Imágenes Moleculares.

CNEA: Comisión Nacional de Energía Atómica.

DAC: Concentración Derivada en Aire. Del inglés: Derived Air Concentration.

EPD: Dosímetros Electrónicos Personales. Del inglés: Electronic Personal Dosimeters.

FLENI: Fundación para la Lucha contra las Enfermedades Neurológicas de la Infancia.

ICRU: Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas. Del inglés: International Commission on Radiological Units and Measurements.

LET: Transferencia Lineal de Energía. Del inglés: Linear Energy Transfer.

OSL: Luminiscencia Ópticamente Estimulada. Del inglés: Optically Stimulated Luminescence.

PET: Tomografía por Emisión de Positrones. Del inglés: Positron Emission Tomography.

PROCAB: Cabina de procesos. Del inglés: Process Cabinet.

PSMA: Alimentación de la Bobina Principal. Del inglés: Primary System Magnet Alimentation.

RF: Radiofrecuencia.

RI: Radiación Ionizante.

SAS: Sistema de Acceso Estéril. Del inglés: Sterile Access System.

SPECT: Tomografía por Emisión de Fotón Único. Del inglés: Single Photon Emission Computed Tomography.

TOE: Trabajador Ocupacionalmente Expuesto.

UNSAM: Universidad Nacional de San Martín.

WGU: Unidad de Decaimiento de Gases. Del inglés: Waste Gas Unit.

Introducción

La Organización Mundial de la Salud define la salud laboral como una actividad multidisciplinaria que promueve y protege la salud de los trabajadores. Esta disciplina busca controlar los accidentes y las enfermedades mediante la reducción de las condiciones de riesgo. [1][2]

Esta definición es importante ya que evidencia que el riesgo siempre existe, lo define como una probabilidad buscando que sea la más baja posible.

El personal que se desarrolla en una institución nuclear, sumado a los riesgos laborales como físicos, químicos, ergonómicos, psicosociales, etc, a los que está expuesto, también debe considerar el riesgo radiológico. La definición de este último, dada por la ARN es la siguiente: “El riesgo radiológico es el riesgo de efectos nocivos para la salud, debido a la exposición a la radiación ionizante (incluida la probabilidad de que se produzcan esos efectos) y cualquier otro riesgo relacionado con la seguridad (incluidos los riesgos para el ambiente) que podrían surgir como consecuencia directa de la exposición a la radiación ionizante, la presencia de material radiactivo o su emisión al ambiente, o la pérdida de control de una fuente de radiación.”[3]

Los Trabajadores Ocupacionalmente Expuestos (TOE) como operadores de un ciclotrón, al realizar tareas de mantenimiento sobre el equipo, están expuestos a determinadas tasas de dosis como consecuencia de la activación inducida que genera el bombardeo de las partículas aceleradas sobre los componentes estructurales del equipo. Esta activación representa la fuente de exposición más significativa para quienes trabajan con el equipo realizando tareas de mantenimiento preventivo y correctivo, resultando la principal motivación para el desarrollo del presente trabajo.

Como alumna de la Especialidad en Radioquímica y Aplicaciones Nucleares resulta interesante aplicar los conocimientos desarrollados a lo largo de la Especialización para estudiar las dosis recibidas por los TOE del ciclotrón ante las intervenciones de mantenimiento al equipo desde el punto de vista de la protección radiológica.

En este trabajo, se realizó la cuantificación de las dosis recibidas por los TOE del ciclotrón, mediante el seguimiento del registro de la dosis diferida por tecnología OSL, así como también por mediciones inmediatas a través de la monitorización portátil con el uso de dosimetría electrónica EPD durante la realización de tareas de mantenimientos preventivos, correctivos, reemplazo de suministros e inspección al equipo. De esta manera, se pudo cuantificar la dosis recibida por los trabajadores y el grupo de trabajo en determinadas tareas a fines de extraer conclusiones que permitan, en la medida de lo posible, incrementar la seguridad de los trabajadores y procurar por las buenas prácticas de protección radiológica.

Cabe aclarar que todos los valores de dosis que se presentan son estimaciones. Los valores medidos de cada trabajador dependen de diferentes variables, como lo son la distancia entre la fuente y el trabajador, el tiempo de exposición que conlleva la realización de una determinada tarea, la posición del cuerpo en la que se coloca el dosímetro y la posición respecto a la fuente, entre otras.

Objetivo

Principal

Cuantificar las dosis recibidas por los Trabajadores Ocupacionalmente Expuestos (TOE) en las tareas de mantenimiento de la unidad ciclotrón, en las que se incluye los mantenimientos preventivos, correctivos, reemplazo de suministros e inspección del equipo.

Específicos:

- Profundizar en los conocimientos desarrollados a lo largo de la especialidad.
- Indagar en los procedimientos existentes en el servicio.
- Cuantificar las tasas de dosis durante tareas de mantenimiento considerando diferentes piezas del equipo.
- Releva el registro de dosis de los TOE de los últimos años.
- Cuantificar las dosis recibidas y, en la medida de lo posible, discriminarlas de acuerdo a la tarea realizada.
- Realizar el análisis de las dosis recibidas por los TOE de un ciclotrón.
- Identificar posibles acciones de mejora que procuren aumentar la protección radiológica, disminuyendo las dosis recibidas.
- Realizar un informe final que evidencie de manera estimada los valores de dosis que reciben los TOE de un ciclotrón.

Capítulo 1

1.1. Radiactividad

A lo largo del desarrollo de la vida, el humano está expuesto a radiaciones ionizantes, ya sea presentes en la naturaleza como los rayos cósmicos o radionucleidos existentes en la corteza terrestre, o bien, provenientes de fuentes artificiales producidas por el hombre con fines industriales, médicos, arqueológicos, etc.

En la naturaleza hay ciertos elementos inestables que emiten espontáneamente radiación ionizantes (RI) en forma de partículas u ondas electromagnéticas, modificando la naturaleza o el estado de sus átomos. Esto es lo que se conoce como fenómeno de radiactividad o desintegración radiactiva. Este proceso no depende de la influencia del entorno, como por ejemplo presión, temperatura, etc; sino que cada radionucleido tiene una constante de desintegración asociada, denominada con la letra λ , la cual refiere a la probabilidad que al azar se produzca una desintegración por unidad de tiempo. [4][5]

De acuerdo al capítulo 1 de la “Guía de radioprotección” publicada por la Autoridad Regulatoria Nuclear, Comisión Nacional de Energía Atómica y la Cámara de Instituciones de Diagnóstico Médico, la dosis efectiva media anual que recibe una persona debido a todas las fuentes naturales combinadas con las artificiales es alrededor de 2,4 mSv, con grandes variaciones alrededor de ese valor. [6]

La *Ley general de decaimiento* expresa el número de núcleos de la sustancia inicial (N_0) que se encuentran presentes en un instante de tiempo t , posterior a que se produzcan desintegraciones radiactivas:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Ecuación 1.1

Esta expresión permite deducir “ $T_{1/2}$ ”, también llamado período de semidesintegración, que es el tiempo que debe transcurrir para que el número de núcleos se reduzca a la mitad de su valor inicial:

$$N(T_{1/2}) = N_0/2$$

Ecuación 1.2

y de aquí resulta que

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda$$

Ecuación 1.3

Definido esto, puede comprenderse el significado del concepto “actividad”, la cual se interpreta como la velocidad o tasa de desintegración de un elemento radiactivo,

$$-\frac{dN}{dt} = A, \quad A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

Ecuación 1.4

cuya unidad es el Becquerel (Bq), de acuerdo a la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiación (ICRU).

Otra magnitud también relacionada con la constante λ es la vida media “ τ ”, que representa el tiempo medio que un estado nuclear sobrevivirá antes de experimentar una transformación hasta un estado de energía más bajo, mediante la emisión de radiación ionizante (RI). Se expresa en unidades de tiempo (segundos, horas, días o años) y está definida por la siguiente ecuación:

$$\tau = 1/\lambda$$

Ecuación 1.5

donde τ es la vida media y λ es, como se mencionó anteriormente, la constante de desintegración de un nucleido dado en un estado energético determinado.

1.2. Desintegraciones radiactivas

Las radiaciones ionizantes pueden ser ondas electromagnéticas o partículas, capaces de causar ionización y excitación en los átomos del medio que atraviesan.

A su vez, se clasifican de dos maneras, directamente ionizantes o indirectamente ionizantes.

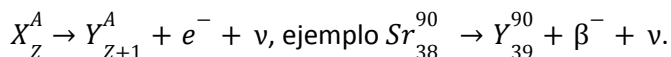
Las radiaciones directamente ionizantes, son partículas cargadas eléctricamente tales como electrones, protones, deuteronos y partículas alfa. Interactúan con la materia mayormente mediante la fuerza de Coulomb, que provoca la repulsión o atracción de electrones de átomos y moléculas en función de sus cargas.

La desintegración alfa se da por la emisión de partículas alfa que son núcleos de He. Contienen 2 protones y 2 neutrones, por lo que un átomo que se desintegra con este tipo de emisión pierde 4 unidades de su número másico (A) y 2 de su número atómico (Z), dando lugar a la formación de un nuevo núcleo. Este tipo de decaimiento es característico de núcleos pesados, es decir, con Z mayor que 82, aunque existen excepciones. La siguiente expresión simboliza el proceso: $X_Z^A \rightarrow Y_{Z-2}^{A-4} + \alpha$, por ejemplo: $Po_{84}^{210} \rightarrow Pb_{82}^{206} + \alpha$.

Las desintegración beta (β) pueden ser positivas o negativas, siguiendo la siguientes expresiones: $n \rightarrow p^+ + \beta^- + \nu$, o bien, $p^+ \rightarrow n + \beta^+ + \nu$.

En la desintegración β^- , el núcleo transforma un neutrón en un protón (p^+) más una partícula β^- y una partícula sin carga de masa despreciable, llamada neutrino (ν). La emisión β^- presenta un espectro de energías que van desde cero hasta un valor máximo, es decir, el

electrón proveniente del núcleo que se está desintegrando puede adquirir cualquier energía entre cero y su máximo, ya que la energía total involucrada en la desintegración es repartida entre él y el neutrino. A continuación se presenta el proceso junto a un ejemplo:



Los emisores β^+ no existen en la naturaleza. Este tipo de desintegración implica la transformación de un protón (p^+) en un neutrón (n) y un positrón (β^+) que es emitido junto con un neutrino (ν) de acuerdo al siguiente esquema: $X_Z^A \rightarrow Y_{Z-1}^A + \beta^+ + \nu$, por ejemplo: $Na_{11}^{22} \rightarrow Ne_{10}^{22} + \beta^+ + \nu$.

Las radiaciones indirectamente ionizantes, no poseen carga eléctrica, como los fotones y neutrones e interactúan de manera diferenciada. Los fotones pueden interactuar mediante efecto fotoeléctrico, efecto Compton o creación de pares, dependiendo de la energía que poseen y el tipo de material con el que interactúan, mientras que los neutrones interactúan con los núcleos de la materia por colisiones inelásticas, captura (o activación) de neutrones y fisión.

Por otro lado, existe la denominada emisión gamma (γ). La radiación γ habitualmente acompaña algunos procesos de desintegración radiactiva en la que el núcleo queda en un estado excitado y para lograr un estado energético más bajo emite rayos γ . Esta radiación es del tipo electromagnética, de la misma naturaleza que la luz, pero de menor longitud de onda. [5]

1.3. Características de las radiaciones ionizantes

La siguiente tabla (Tabla 1.1) ilustra los distintos tipos de radiaciones ionizantes (RI) y sus características principales, las cuales definen el mecanismo de interacción de las radiaciones con la materia.

Radiación	Masa	Carga eléctrica
Electromagnética (rayos X y γ)	No poseen	No poseen
Neutrones	Poseen	No poseen
Beta (e^- y e^+)	Poseen	Poseen
Partículas pesadas (p^+ , deuterones, α , otros iones)	Poseen	Poseen

Tabla 1.1. Principales características de las RI

Como se mencionó anteriormente las partículas cargadas interactúan en forma *directa* con el medio material a través de fuerzas de Coulomb, por lo cual, se pueden frenar completamente interponiendo un determinado espesor de material dependiendo de la energía incidente. En contraste, las radiaciones que interactúan *indirectamente*, carentes de carga eléctrica, como la

radiación electromagnética o neutrones, tienen un alcance indefinido, de manera que solo son atenuadas. [5]

1.4. Interacción de la radiación con la materia

Es necesario conocer los mecanismos por los cuales la radiación interactúa con la materia para comprender los principios de radioprotección, los distintos tipos de blindajes utilizados y los conceptos asociados a la dosimetría.

La RI interactúa con los núcleos y electrones orbitales de los átomos que constituyen la materia con una probabilidad que depende del tipo y de la energía de la radiación.

Las partículas que *poseen carga eléctrica* interactúan con los núcleos o los electrones orbitales del medio a través de colisiones que pueden ser: elásticas o inelásticas. En el primer caso se mantiene constante la energía cinética de todo el conjunto y en el segundo caso, parte de la energía se transforma en otro tipo de energía.

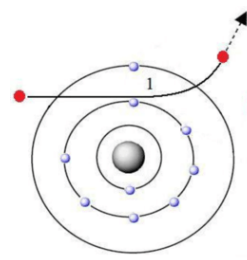
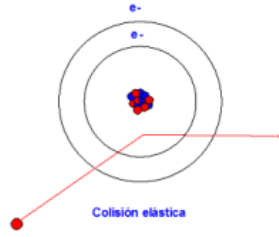
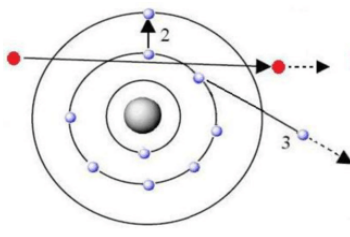
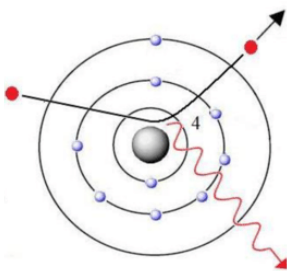
Colisión	con electrones atómicos	con núcleos
Elástica	<p>La partícula incidente es desviada por electrones del absorbente. (1)</p> 	<p>La partícula es desviada de su trayectoria por efecto de la interacción electrostática con las cargas del núcleo.</p> 
Inelástica	<p>La partícula incidente pierde energía ionizando el medio (3), mediante la producción de un par iónico; o, excitando (2) electrones atómicos. Al producirse excitación, el electrón excitado vuelve al estado fundamental emitiendo un fotón de energía equivalente a la de excitación.</p> 	<p>La partícula pierde una cantidad significativa de energía al ser acelerada o frenada por interacción electrostática con el núcleo, esta energía se manifiesta como radiación electromagnética, llamada de frenamiento o Bremsstrahlung (4).</p> 

Tabla 1.2. Tipo de interacción de la radiación con la materia y esquemas

Interacción de las partículas α : Estas partículas emitidas por los núcleos atómicos poseen energías con un rango comprendido entre los 3 y los 9 MeV, absorbiéndose fácilmente en la materia. Por ejemplo, partículas alfa de 3 MeV tiene un alcance en aire de 2,8 centímetros y produce alrededor de 4000 pares iónicos por milímetro de recorrido.

Por la gran producción de iones en su camino recorrido, se dice que las partículas alfa tienen alta Transferencia Lineal de Energía (LET), y la pérdida de energía que sufren en el medio absorbente se debe principalmente a la ionización y excitación, siendo despreciables las pérdidas por radiación de frenamiento o Bremsstrahlung.

La LET se define como la energía media perdida por una partícula cargada por colisión con electrones al atravesar un determinado recorrido (dl) en la materia. La ecuación que la define es la siguiente:

$$L = dE/dl, \text{ con unidades de } [J \cdot m^{-1}]$$

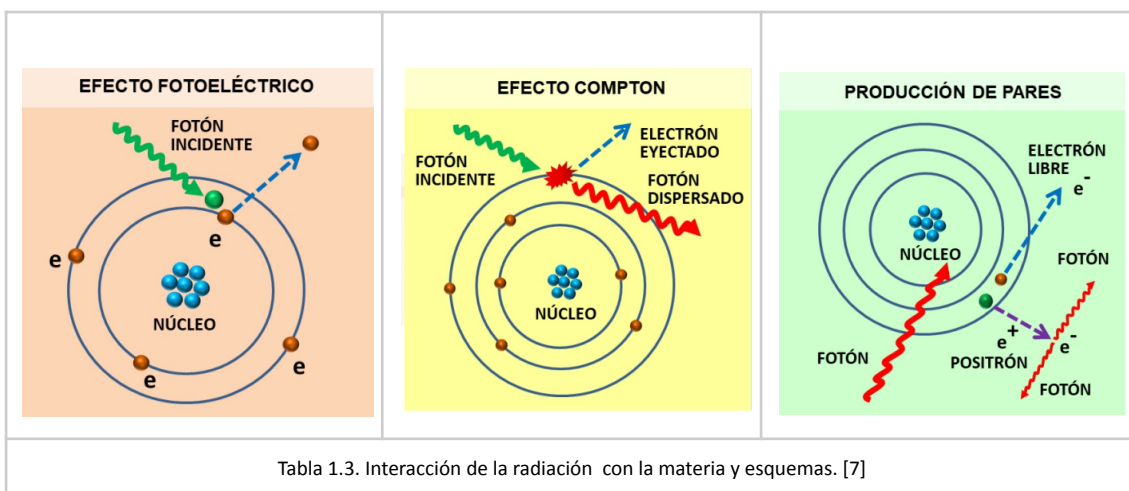
Ecuación 1.6

Por tratarse de partículas pesadas, las partículas alfa tienen su trayectoria casi rectilínea hasta su frenamiento. Al ser mono energéticas, por más que aumente el espesor del material absorbente interpuesto, el número de partículas que lo traspasarán será el mismo, hasta un determinado valor a partir del cual el haz decrecerá bruscamente hasta absorberse totalmente. [5][6]

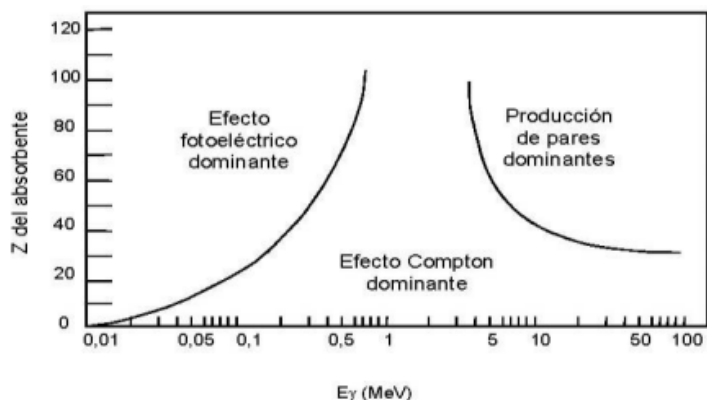
Interacción de las partículas β : Interaccionan por dispersión elástica y choques inelásticos (excitación e ionización) que dan lugar a la radiación de frenamiento que se produce dado que una partícula a gran velocidad experimenta una desaceleración brusca, emitiendo fotones de rayos X. Una partícula beta de 3 MeV tiene un alcance en aire de más de 100 centímetros y sólo produce 4 pares iónicos por milímetro. Estas partículas se caracterizan por ser radiación de baja LET. [5][6]

Las partículas que *no poseen carga eléctrica*, como lo son los fotones de los rayos X y γ , interaccionan mediante tres tipos de efectos de acuerdo a su energía: efecto fotoeléctrico, efecto Compton o creación de pares. En la Tabla 1.3 puede verse un esquema de cada efecto.

Efecto Fotoeléctrico	Efecto Compton	Creación de pares
Interacción entre un fotón y un electrón fuertemente ligado al átomo. Toda la energía es transferida al "fotoelectrón". (Energías menores a 100 KeV)	Interacción entre un fotón y un electrón débilmente ligado en las capas más externas del átomo. Parte de la energía se utiliza para arrancar el electrón y otra parte se le transfiere al fotón dispersado. (Energías entre 100 y 1000 KeV)	Interacción entre un fotón y el núcleo. El fotón desaparece dando lugar a la creación de un par electrón-positrón. Cuando el positrón ha perdido su energía se aniquila en dos fotones que se emiten en direcciones opuestas. (Energías a partir de 1024 KeV)



El siguiente gráfico permite observar cuál es el efecto dominante de acuerdo a la energía del fotón incidente y del Z del material absorbente.



Gráfica 1.1. Esquema del efecto predominante de acuerdo al Z del absorbente.[5]

Estos tres tipos de interacciones experimentan una atenuación exponencial a medida que atraviesan la materia, que depende de la distancia recorrida en el material y del coeficiente másico de atenuación, el cual es dependiente de la energía de los rayos y del tipo de material con el que interactúa. [4]

Por otro lado, dentro de la clasificación de las partículas sin carga se encuentran los neutrones, pero estos por su pequeña masa solo interactúan con los núcleos del medio absorbente. Los dos tipos de interacciones predominantes, a efectos de seguridad radiológica, son la dispersión inelástica y la captura de neutrones. En el primer caso, un núcleo es colisionado inelásticamente por un neutrón, quedando en un nivel de energía más alto pudiendo liberar esta energía en forma de un rayo γ , mediante la emisión de una partícula β , o de ambas formas. En el caso de la absorción o captura de neutrones, lo que sucede es que un núcleo puede absorber el neutrón y, posteriormente, emitir energía en forma de rayos γ , X o partículas β , o ambas. Estas partículas secundarias causan ionizaciones en el medio. También los neutrones son capaces de inducir reacciones de fisión, en esta, un núcleo pesado puede absorber al neutrón y dividirse en dos núcleos más ligeros, generalmente radiactivos. [4][5][8]

1.5. Magnitudes dosimétricas de importancia en radioprotección.

Las magnitudes dosimétricas son una forma de correlacionar los efectos reales o potenciales de la radiación.

Para el desarrollo del presente trabajo se presentan las siguientes definiciones extraídas de la Norma Básica de Seguridad radiológica 10.1.1 [9] de la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN):

- Dosis absorbida, D : es el cociente entre la energía impartida media por la radiación ionizante a una masa de materia. La unidad es J/Kg lo que se denomina Gray (Gy).
- Tasa de dosis absorbida: es el cociente entre el incremento de la dosis absorbida en el intervalo de tiempo t . (Gy/s)

Cuando estas magnitudes se aplican en protección radiológica, se consideran los factores de ponderación del tipo de RI que se trate y del tejido, dando lugar a la:

- Dosis equivalente en órgano o tejido, H_T : producto de la dosis absorbida debida a un tipo determinado de radiación, promediada sobre un órgano o tejido por el factor de ponderación de la radiación considerada.

$$H_T = \sum_R W_R D_{T,R}$$

Donde, $D_{T,R}$ es la dosis absorbida media en un órgano o tejido "T" debida a la radiación "R" y W_R es el factor de ponderación de la radiación.

La unidad de la dosis equivalente en órgano o tejido, H_T , es joule por kilogramo (J/kg) y su nombre especial es Sievert (Sv).

- Dosis efectiva, E : suma de los productos de las dosis equivalentes en órgano o tejido, H_T , y de los factores de ponderación del órgano o tejido correspondiente, W_T .

$$E = \sum_T H_T W_T$$

La unidad de la dosis efectiva es joule por kilogramo (J/kg) y su nombre especial es Sievert (Sv).

-Hp(0,07) es el equivalente de dosis personal a una profundidad $d = 0,07$ mm.

-Hp(3) es el equivalente de dosis personal a una profundidad $d = 3$ mm.

-Hp(10) es el equivalente de dosis personal a una profundidad $d = 10$ mm.

1.6. Instrumentos de detección

Para asegurar que no se superen los límites de dosis en los trabajadores establecidos por la ARN y alcanzar los objetivos de la radioprotección, es necesario el monitoreo tanto de las áreas de trabajo como de los TOEs de forma individual. A continuación se detallan los instrumentos de detección de interés para el desarrollo del presente trabajo.

La Norma Básica de Seguridad Radiológica, define dos tipos de áreas de trabajo, controlada y supervisada. La primera, se define textualmente como "una zona de trabajo delimitada donde, en situación de exposición planificada, se requiere la aplicación de procedimientos

preestablecidos para prevenir y controlar la exposición a fuentes de radiación, y medidas específicas para prevenir y mitigar las consecuencias de las exposiciones potenciales”. Mientras que el Área supervisada se define como “una zona de trabajo delimitada donde, en situación de exposición planificada, se deben mantener bajo supervisión las condiciones radiológicas, aunque no se requieran procedimientos específicos.” [9] Esto quiere decir que las áreas de trabajo siempre deben estar bajo supervisión radiológica mediante el monitoreo de radiación ambiental y, en caso que sea requerido, el monitoreo de la contaminación del aire y la medición de la contaminación superficial.

El monitoreo ambiental tiene como objetivo conocer la tasa de dosis a la que está expuesto un trabajador en las áreas donde el monitoreo individual no es necesario y ser un complemento en las áreas que sí lo requieran. Esto, proporciona una mejor aplicación de los principios de la radioprotección, optimizando las prácticas y limitando las dosis recibidas. Por ejemplo, en base a la información brindada por el monitoreo pueden realizarse modificaciones necesarias a procedimientos de trabajo o conocer el tiempo óptimo para realizar determinada tarea.

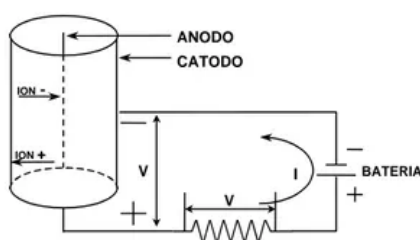
La dosimetría personal permite evaluar cuantitativamente el grado de exposición del TOE de manera de determinar si las dosis de radiación recibidas se encuentran dentro de los límites o restricciones establecidos como razonablemente seguros por la ARN.

Los detectores, dependiendo del tiempo de entrega de la información, pueden ser inmediatos o diferidos y, de acuerdo al fenómeno en que se basa su funcionamiento, se clasifican en detectores de ionización o excitación.

Dentro de la clasificación de detectores de ionización inmediatos se desarrollarán los detectores gaseosos dado que en el servicio se cuenta con estos para el monitoreo ambiental. Mientras que de los detectores de excitación, se describirán los detectores de estimulación óptica por láser (de lectura diferida) y los detectores de centelleo de lectura inmediata, ambos utilizados para dosimetría personal.

I. Detectores gaseosos

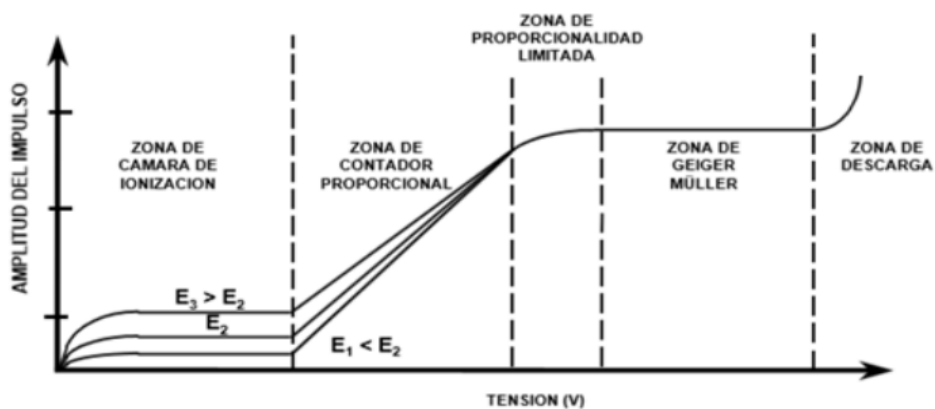
Se constituyen por un recinto que contiene un gas, sometido a un campo eléctrico generado por una diferencia de potencial que se aplica entre dos electrodos, como puede observarse en el gráfico 1.2. Cuando dicho dispositivo se expone a la radiación, la interacción de las partículas ionizantes con el gas hacen que se generen iones (+ y -). Estos iones en presencia del campo eléctrico se aceleran en dirección a los electrodos polarizados eléctricamente con signo opuesto. De este modo, circula una corriente por el circuito exterior dando una señal eléctrica medible.



Gráfica 1.2. Esquema de funcionamiento de una cámara de ionización

De acuerdo al potencial aplicado sobre los electrodos, los detectores gaseosos se clasifican en:

- Cámara de ionización: si la diferencia de potencial es nula, los iones se atraerán por su signo de carga y se recombinarán formando moléculas neutras. Cuando la diferencia sea distinta de cero el campo eléctrico atraerá los iones hacia los electrodos con una fuerza proporcional al campo eléctrico y a la carga. Al aumentar más la diferencia de potencial habrá menos recombinaciones y aumentará la intensidad del pulso eléctrico. Cuando un detector gaseoso se polariza de manera que todos los iones son recolectados se dice que opera en modo de “cámara de ionización”, esto puede observarse en el gráfico 1.3 donde el eje de ordenadas representa la diferencia de tensión aplicada entre los electrodos y en el eje de las abscisas se aprecia la amplitud del pulso. Las corrientes generadas suelen ser de bajo valor, 10^{-12} Amper, lo que hace que sea poco práctico para el conteo de eventos. Una vez recolectados todos los iones, la amplitud se mantendrá constante aunque varíe la tensión.
- Contadores proporcionales: existe un valor de tensión a partir del cual la amplitud comenzará a variar, debido a que los iones primarios adquieren en su camino energía cinética suficiente para ionizar otros átomos neutros, liberando cargas que incrementan la inicial. De esta manera, se formará una especie de cascada de cargas que aumentará la amplitud del pulso eléctrico. En estas condiciones se denomina al detector contador proporcional, la amplitud del pulso guarda proporcionalidad con la energía y con la tensión de polarización. Se usa para espectrometría y para contar eventos de detección.
- Geiger Müller: al continuar aumentando la diferencia de potencial, más allá de los valores que corresponden al contador proporcional, el factor de multiplicación de iones dejará de ser lineal con la tensión aplicada, ya que el ión + es más grande, y por lo tanto, más lento que el ión -. Se formará una carga espacial que altera la forma del campo eléctrico en el detector y por ende la linealidad. En el punto donde deja de aumentar la proporcionalidad se lo denomina Geiger Müller. La amplitud de la señal eléctrica es independiente de la energía y naturaleza de las partículas ionizantes, resultando la de mayor amplitud obtenible con un detector gaseoso. Generalmente este tipo de detectores es el más utilizado para detectar radiación beta o fotónica.



Gráfica 1.3. Curva de detectores gaseosos

Los detectores gaseosos ambientales funcionan como un dosímetro ambiental ya que tienen incorporado un amperímetro precalibrado de lectura de tasa de dosis, que en sus rangos más comunes cubren de 0,1 $\mu\text{Sv/h}$ hasta 100 mSv/h , permitiendo integrar estas tasas en un tiempo predeterminado. [6]

II. Detectores de neutrones

Debido a la baja interacción de los neutrones con el gas, se los detecta recurriendo a interacciones nucleares que generan partículas cargadas secundarias. Por ejemplo, una reacción común es con el trifluoruro de boro, la reacción es (n, α) entre el B-10 y el neutrón térmico, emitiendo una partícula α dentro del gas, la cual puede ser detectada con un contador proporcional. Por lo general, se utiliza un detector gaseoso al cual se le reviste una ventana con el espesor correspondiente de BF-3, otra opción es revestirla con material fisionable.[5]

III. Detectores de centelleo

Los detectores que funcionan con el fenómeno de excitación, utilizan sustancias luminiscentes, en las que los átomos o moléculas excitados por la radiación pierden la excitación en procesos rápidos (fluorescencia, “centelleo”) emitiendo fotones luminosos. Estos detectores están limitados a exposiciones de baja tasa dado que el tiempo de decaimiento del impulso luminoso es relativamente largo. [6]

Los dosímetros EPD con los que cuenta el servicio son de este tipo, muestran una lectura directa de la dosis detectada o la tasa de dosis en tiempo real y posee alarmas que pueden programarse, tanto para la dosis como para la tasa de dosis a la que se está expuesto.

IV. Detectores OSL

Estos detectores se basan en la Luminiscencia Ópticamente Estimulada (OSL). Proporcionan monitoreo de radiación X, gamma y beta y miden la exposición a través de detectores de cristales de óxido de aluminio. Para la lectura de éstos se utiliza una matriz de diodos emisores de luz que estimulan los detectores haciendo que emitan luz, la cual es detectada y medida por un tubo fotomultiplicador. La cantidad de luz liberada durante la estimulación óptica es directamente proporcional a la dosis de radiación recibida. Esta tecnología es una de las más modernas y tiene el límite de detección con una sensibilidad de 0,01 mSv . [10]

Capítulo 2

2.1. Efectos biológicos de las RI y penetración en los tejidos

Desde el comienzo de la vida en la tierra, en la naturaleza se encuentran presentes materiales radiactivos, los principales son el radón (Rn-222), potasio (K-40), rubidio (Rb-87) y dos elementos procedentes de la desintegración del uranio, uranio (U-238) y torio (Th-232). Es por esto, que podemos recibir radiación tanto de la corteza terrestre, como de algunos alimentos que consumimos o bien de los materiales de construcción, como ladrillos y hormigón. Los valores de radiación natural a los que estamos expuestos de acuerdo a lo aportado por la Autoridad Regulatoria Nuclear, rondan aproximadamente en una dosis promedio de 2,4mSv.

Un informe publicado en el año 2010 por el Consejo de Seguridad Nuclear de España, expresa que la exposición originada por la presencia de radiación natural en la dieta es aproximadamente 0,29 mSv por año, siendo el rango posible entre 0,2 a 0,8 mSv. Solamente 0,17 mSv se deben al K-40, por lo que es la fuente más importante de irradiación interna debido a que lo incorporamos a través de los alimentos y el agua, donde se encuentra presente. De hecho, todas las especies de este planeta han evolucionado en presencia de la radiación ionizante. Si bien, los seres humanos expuestos a pequeñas dosis de radiación pueden no presentar de inmediato ningún efecto biológico aparente, no hay dudas de que la radiación ionizante, cuando se administra en cantidades suficientes, puede causar grandes daños. [4]

A modo de ejemplo, la dosis media de la radiación debida a los rayos cósmicos es 0,39 mSv al año, oscilando entre 0,3 y 1 mSv. Este valor depende de la latitud (mayores dosis en los polos que en el ecuador) y la altitud (mayores dosis en las montañas que a nivel del mar) en que nos encontremos.

Si bien en el capítulo anterior se describieron los tipos de interacción de las RI con la materia, lo que interesa a fines de los efectos biológicos y la aplicación de los principios de la radioprotección es la penetración de la radiación en los tejidos. Esto es importante porque cuando la radiación es frenada o atenuada se produce una conversión de la energía de la radiación en energía térmica, provocando ionización o interacciones secundarias que dan como resultado daños en el sistema biológico.

Las partículas alfa, depositan su energía a corta distancia y, como ya se mencionó, poseen alta LET. Estas dos razones hacen que las mismas no presenten un riesgo de radiación externa, pero sí son peligrosas si ingresan al organismo, ya sea por vía de inhalación, ingesta o por heridas.

Las partículas beta interactúan por colisiones elásticas e inelásticas. Por su baja LET, se necesitan partículas beta de 70 keV de energía, como mínimo, para atravesar la epidermis. Su trayectoria es tortuosa, lo que hace que vaya depositando su energía a lo largo de todo su recorrido.

Los rayos X y γ , no pueden ser frenados, lo que sucede con los mismos es una atenuación. A medida que atraviesan la materia, los rayos se atenúan exponencialmente debido a interacciones, dependiendo de la distancia recorrida y del coeficiente másico de atenuación del tejido o material atravesado. [6]

Tipo RI	Carga	Penetración en aire	Penetración en sólido
Alfa	+2	centímetros	micrómetros
Beta	-1; +1	metros	milímetros
Gamma o RX	0	100 metros	centímetros/metros

Tabla 2.1. RI y penetración

Las RI al interactuar con el organismo producen daños por excitación o ionización. Lo pueden hacer de manera directa, es decir, depositando su energía en las moléculas que componen al organismo, o de manera indirecta, generando radicales libres dando lugar a mecanismos de daños secundarios. El primer mecanismo mencionado se da cuando se expone al organismo a RI de alta LET, mientras que el segundo cuando la exposición a la radiación es de baja LET. El oxígeno tiene un efecto potenciador del daño ante la interacción de la RI, es decir, funciona como un radiosensibilizador, sobre todo en las RI con baja LET.

La estructura más sensible a la radiación es el núcleo de la célula. En él se encuentra la molécula de ADN, la cual puede sufrir distintos tipos de lesiones:

- Rupturas de cadenas (simples o dobles)
- Alteración de las bases nitrogenadas
- Alteración de azúcares
- Otras lesiones (formación de dímeros entre dos bases, formación de puentes entre las dos cadenas del ADN (cross links))

Es importante resaltar que la célula cuenta con mecanismos de reparación del daño radioinducido. La eficiencia de estos mecanismos, en parte, depende del tiempo entre dos eventos ionizantes, ya que en este intervalo, la célula puede ponerlos en marcha para reparar el daño o adaptarse a la injuria. A mayor tiempo entre dos eventos subletales mayor es la probabilidad de reparación del daño.

Los mecanismos de reparación son muy complejos e involucran la participación de numerosas enzimas como: endonucleasas, ADN polimerasas y ligasas, entre otras. Las rupturas dobles son incluso más difíciles de reparar que las simples, estas últimas se reparan por el mecanismo de escisión y resíntesis, que permite la reparación de rupturas simples, y las recombinaciones homólogas o heterólogas, funcionan como reparadoras de las rupturas dobles. [5][6]

2.2. Clasificación de los efectos

Los efectos producidos por las RI pueden clasificarse en efectos estocásticos o probabilísticos y determinísticos o tisulares.

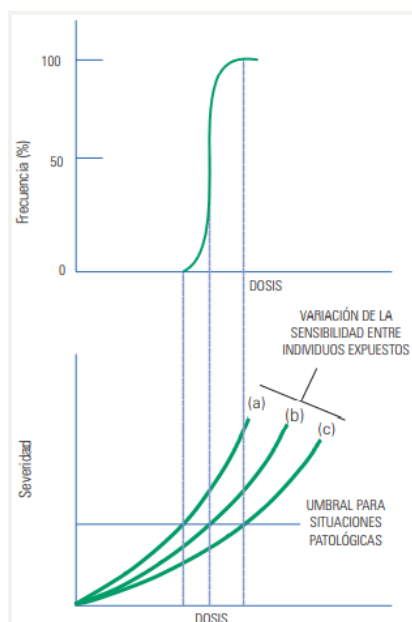
Existe un nivel de dosis umbral, que se define como la dosis necesaria para provocar un efecto determinista en al menos el 1 al 5% de los individuos expuestos. [6]

Los efectos estocásticos, se caracterizan por no poseer umbral. La severidad es independiente de la dosis, es decir, el daño producido se mantiene constante incluso al aumentar la dosis. Mientras que la probabilidad de que se produzca el efecto (frecuencia de aparición del daño) aumenta junto con la dosis. La gráfica 2.1 representa lo antes mencionado.



Gráfica 2.1 . Frecuencia y severidad vs dosis de efectos estocásticos. [6]

Para el caso de los efectos determinísticos, la severidad del daño aumenta con la dosis recibida, al igual que la frecuencia de aparición que también varía en función de la misma, a partir de la dosis umbral. La dosis suficiente para alcanzar el umbral de severidad de toda la población determina la frecuencia de aparición del daño del 100%. [6]



Gráfica 2.2. Frecuencia y severidad vs dosis de efectos determinísticos. [6]

Como se mencionó anteriormente, los efectos deterministas son consecuencia de una sobre exposición externa o interna, que puede ser instantánea o prolongada, en todo el cuerpo o parte del mismo. Se produce la muerte de un gran número de células cuya reparación no puede compensar los daños, provocando deterioros detectables clínicamente.

En cuanto a exposiciones localizadas, el daño puede ser tolerado en un órgano o tejido a mayores dosis que las recibidas por exposiciones de todo el cuerpo. En la piel, pudiéndose producir eritema, edema, ampollas, úlceras y necrosis, en función de la dosis recibida. El umbral parte de 3 Gy con eritema y depilación temporaria, pasando por depilación permanente y los efectos mencionados, hasta provocar necrosis del tejido cuando se superan los 25 Gy.

Otro ejemplo es el aparato digestivo, el cual posee una variada radiosensibilidad de acuerdo a la zona irradiada. Pudiéndose observar obstrucciones, perforaciones, fístulas, etc. Los

pulmones también son órganos muy radiosensibles pudiendo ocurrir fibrosis o neumonitis. En cuanto a los órganos de reproducción, se puede observar esterilidad temporal o permanente de acuerdo a la dosis recibida, incluso dosis únicas de 2 a 6 Gy ya pueden provocar este efecto. Las dosis entre 0,1 a 0,15 Gy producen esterilidad temporal. En el caso ocular, las dosis superiores a 0,5 Gy puede producir opacidades en el cristalino y su acumulación derivar en cataratas. Así también podrían mencionarse efectos a nivel del sistema urinario, en los huesos, cartílagos, sistema cardiovascular, etc.

Existe un síndrome provocado por sobre exposición en todo el cuerpo denominado Síndrome Agudo de Radiación (SAR), que puede manifestarse por efectos hematopoyéticos (1 a 10 Gy), gastrointestinales (10 a 20 Gy) o neurológicos (> 20 Gy). Este síndrome comienza desde exposiciones leves donde no existen manifestaciones clínicas, pasando por fases moderadas donde resultan favorables algunos tratamientos y concluye con exposiciones extremadamente severas donde la probabilidad de muerte es del 100%, cualquiera sea el tratamiento.[6]

Lo mencionado anteriormente pretende introducir al lector, de manera general, a modo de producir interés en los efectos que la radiación es capaz de generar.

2.3. Protección radiológica

La Ley 24804, establece que en materia nuclear, es el Estado Nacional quién ejerce las funciones de investigación y desarrollo a través de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y, es la Autoridad Regulatoria Nuclear la responsable de la regulación y fiscalización. Fue así que en abril de 1997 se crea la ARN como único organismo autárquico competente e independiente en materia de protección radiológica y seguridad nuclear. [11][12]

La Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) es el organismo del estado argentino dedicado a la regulación y fiscalización de la actividad nuclear en las áreas de seguridad radiológica y nuclear, protección y seguridad física, y salvaguardias y no proliferación, cuyo objetivo es sostener un nivel apropiado de protección de las personas, el ambiente y las futuras generaciones de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes. [3]

Para cumplir con su objetivo, una de sus responsabilidades, es desarrollar funciones regulatorias; dispone normas y guías que establecen los requisitos para las instalaciones y prácticas, y para el personal que opera las instalaciones o realiza las prácticas en las mismas, de manera de minimizar los riesgos radiológicos.

La Norma Básica de Seguridad Radiológica AR 10.1.1 [9], tiene como objetivo principal establecer los requisitos para la protección de las personas y el ambiente contra los efectos nocivos de la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación. Es por ello que enuncia los tres principios de la radioprotección: justificación de las prácticas, optimización de la seguridad radiológica y límite de dosis.

El primer principio, la justificación de las prácticas, consiste en evaluar si una práctica o aplicación de una medida resulta globalmente más beneficiosa para las personas y para la sociedad, es decir, si los beneficios previstos superan los perjuicios (incluido el detrimento debido a la radiación). La optimización de la seguridad radiológica es un proceso para determinar el nivel de seguridad que hace que la magnitud de las dosis individuales, el número de personas (trabajadores y público) expuestas a radiación ionizante y la probabilidad de ocurrencia de exposiciones se mantengan en el valor más bajo que pueda razonablemente alcanzarse, teniendo en cuenta los factores económicos y sociales pertinentes. Y finalmente, el

tercer principio pero no menos importante, es el límite de dosis que establece los valores de dosis efectiva o dosis equivalente en órgano o tejido que no deben ser superados en un período determinado en una situación de exposición planificada. [9]

2.3.1. Herramientas de protección radiológica

Existen herramientas utilizadas con el objetivo de disminuir la contaminación tanto interna como externa de los TOE o protegerlos de la radiación externa y así contribuir a hacer más efectiva la aplicación de los principios de la radioprotección.

Dentro de las herramientas cuyo objetivo es disminuir la contaminación interna se encuentran la ventilación, la filtración y el confinamiento. El empleo de las mismas se logra a través del control de diferenciales de presiones entre áreas, el uso de filtros de aire adecuados como de carbón activado y/o filtros HEPA y la utilización de recintos de contención provistos de blindaje.

Las herramientas para proteger de la radiación externa a los trabajadores consisten en la utilización de blindajes y/o barreras físicas según corresponda, mantener determinada distancia de las fuentes emisoras de radiación ionizante y reducir el tiempo de exposición a las fuentes radiactivas.

Existen distintos tipos de blindajes dependiendo de la fuente radiactiva y de su utilización, de diferentes formas geométricas, materiales constitutivos y tamaños. Por ejemplo, se pueden mencionar: contenedores de mano para trasladar radiofármacos, ladrillos plomados, las puertas y paredes donde se aloja un acelerador, entre otros.

La “ley del cuadrado de la distancia”, enuncia que la intensidad de la fuente disminuye de forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de donde se origina, es por ello que al duplicar la distancia a la fuente, la tasa de dosis disminuirá a un cuarto de su valor inicial. Es por esto que en la medida de lo posible, siempre es más conveniente mantener la mayor distancia posible de la fuente emisora.

El tiempo es uno de los parámetros más importantes cuando se trabaja con radiación, disminuir los tiempos de exposición permite disminuir la dosis recibida, y así funcionar como una herramienta de protección radiológica. Para lograrlo es muy importante el conocimiento de los procedimientos de las tareas a realizar cuando se trabaja con material radiactivo o en sitios donde existe radiación por niveles superiores a la tasa de dosis natural.

2.4. Principio de optimización

Las prácticas que se desarrollan deben estar optimizadas a razón de lo que exige la ARN.

Cuando se diseña una instalación como la del presente trabajo, los sistemas de seguridad radiológica deben asegurar que, en condiciones normales de operación, ningún trabajador reciba una dosis efectiva superior a 5 mSv en un año y ningún miembro del público reciba una dosis efectiva superior a 0,1 mSv en un año. Si el diseño de los sistemas de seguridad radiológica aseguran estas condiciones, se dice que la práctica está optimizada, por lo tanto no será necesario demostrarlo excepto que la Autoridad Regulatoria lo requiera expresamente. Las opciones aceptables para la optimización son las que se encuentran por debajo del valor asignado a la restricción de dosis. [9]

La restricción de dosis es un valor prospectivo de la dosis individual, relacionada directamente con la fuente de radiación que la produce y que se utiliza en una situación de exposición planificada como parámetro para la optimización de la seguridad radiológica.

2.5. Límites de dosis

Los límites de dosis para los TOE establecidos en la Norma AR 10.1.1: dosis efectiva de 20 mSv por año, considerado como el promedio en 5 años consecutivos (100 mSv en 5 años), no pudiendo excederse 50 mSv en ninguno de los años individuales, en cristalino dosis equivalente de 20 mSv por año y en piel o extremidades 500 mSv por año. Todo trabajador debe ser mayor de 18 años y se debe informar a toda trabajadora la importancia de comunicar su embarazo o si está amamantando.

Para el público, el límite de dosis efectiva es de 1 mSv por año; que en circunstancias especiales, podría aplicarse un valor más elevado de dosis efectiva en un solo año, siempre que el promedio anual durante cinco años consecutivos no exceda de 1 mSv. En cuanto a la dosis equivalente en cristalino el límite es de 15 mSv y 50 mSv en piel o extremidades, ambas por año.

La exposición ante las RI puede darse de dos formas, por irradiación externa o por contaminación interna, cuyas vías de entrada pueden ser: la ingesta, la inhalación o directamente a través de la piel o heridas. Es por esto que para los límites de dosis deben considerarse tanto la radiación externa como la interna.

Para la radiación externa se utiliza el monitoreo individual de $H_p(10)$, que es la dosis equivalente en tejido muscular, a la profundidad apropiada d , mencionada en capítulos anteriores. La dosis equivalente individual $H_p(10)$ se aproxima, en forma conservativa, a la dosis efectiva que recibe una persona por radiación X y γ en un determinado lugar recibiendo una exposición homogénea.

Para controlar la contaminación interna de los TOE se definen los límites secundarios y derivados, para el diseño y para el control, conocidos como Límite Anual de Incorporación (ALI) y Concentración Derivada en Aire (DAC).

Se define al ALI como la actividad de un radionucleido que, incorporada anualmente, implica una dosis efectiva integrada en 50 años igual al límite anual propuesto para la dosis efectiva (20 mSv). Mientras que el DAC determina la concentración de radionucleido en el aire de un ambiente de trabajo, en el que si un trabajador permanece 2000 horas al año, incorporaría un ALI. [6]

Estos límites, al ser comparados con los valores medidos en el ambiente de trabajo, permiten estimar la cantidad de material radiactivo incorporado por el trabajador. También se puede determinar la cantidad de material radiactivo incorporada a través de la realización de mediciones directas sobre el cuerpo del trabajador o por medio del análisis de excretas. [6]

Para la verificación del cumplimiento de los límites establecidos por la ARN se debe proceder de la siguiente manera:

$$\frac{H_p(10)}{20 \text{ mSv}} + \sum_j \frac{I_j}{LI_j} \leq 1$$

Donde $H_p(10)$ es el equivalente de dosis personal a una profundidad $d = 10$ mm, integrada en un año. I_j es la incorporación del radionucleido j en un año. LI_j es el límite anual de incorporación para el radionucleido j , resultante de dividir 20 mSv por el factor dosimétrico de dosis efectiva comprometida para trabajadores, por unidad de incorporación de dicho radionucleido j . [9]

A los fines del presente trabajo se analizaron las dosis por exposición externa, considerando que el objetivo fue la evaluación de la dosis que reciben los trabajadores principalmente en tareas de mantenimiento.

Capítulo 3

3.1. Radiofármacos

La Medicina Nuclear, es una especialidad médica que emplea el uso de radiofármacos para diagnosticar, evaluar y tratar determinadas enfermedades. El radiofármaco o radiotrazador se compone por dos partes fundamentales. Una parte es la molécula transportadora, la cual presenta afinidad por un tejido u órgano, y por otro lado un isótopo radiactivo, el cual permitirá ser detectado por un equipo con la tecnología necesaria para hacerlo, como los equipos de Tomografía por Emisión de Positrones (PET) o Tomografía por Emisión de Fotón Único (SPECT).

A fines de este trabajo se presenta una imagen de la Tomografía por Emisión de Positrones (PET, imagen 3.1). Este equipo permite detectar los rayos γ producidos por la aniquilación entre un positrón emitido por los isótopos como el F-18, O-15, N-13, C-11 y un electrón. Estos isótopos se encuentran unidos químicamente a otras moléculas como la glucosa, la dopamina o agua, la cual actúa como la molécula transportadora, brindando información sobre la actividad metabólica o funcional de los distintos órganos. [13]

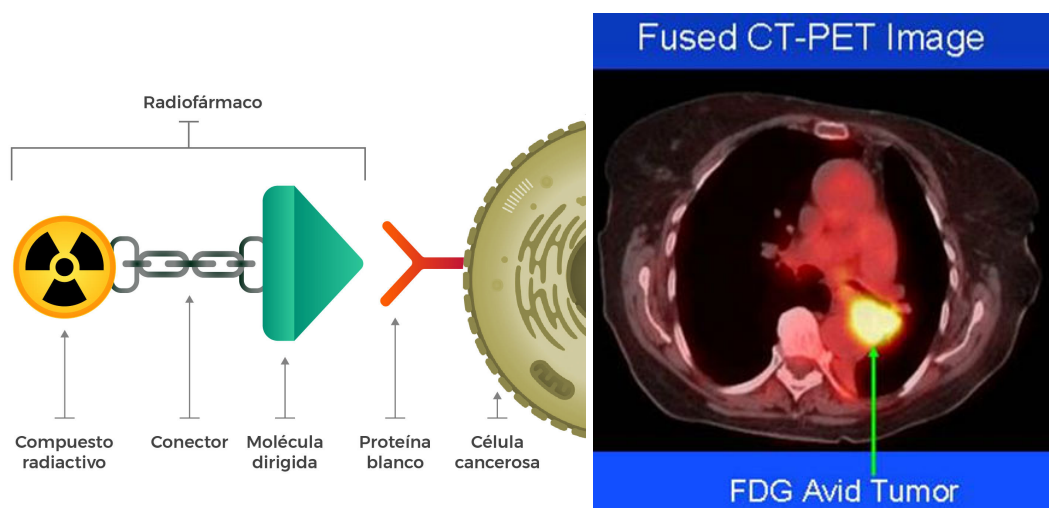


Imagen 3.1. A la izquierda: esquema de un radiofármaco. A la derecha: imagen de estudio PET-CT

Una de las características físicas de los isótopos mencionados, es su período de semidesintegración, es decir, el tiempo en que reducen la capacidad de emitir radiación en el transcurso del tiempo, perdiendo la mitad de esta capacidad cada 2 minutos en el caso del O-15 y 109,7 minutos en el caso del F-18. Por este motivo, a estos isótopos se los clasifica como de período de semidesintegración corto. Esta particularidad hace necesario que el equipo en el cual se producen, el ciclotrón, tenga que estar instalado en las proximidades de los centros de medicina nuclear o enviados de inmediato por vía terrestre o aérea mediante una logística determinada.

3.2. Ciclotrón

El ciclotrón es un acelerador de partículas capaz de acelerar protones hasta energías típicas en el orden de los 11-18 MeV, aunque hay ciclotrones comerciales de mayor energía disponibles.

El principio de funcionamiento, se basa en la aceleración de una partícula cargada mediante la aplicación de un campo eléctrico y un campo magnético.

Para ello, se inyecta gas a una fuente iónica, en el centro del ciclotrón. Este gas es ionizado y los iones requeridos son extraídos de la fuente e introducidos dentro de dos semicírculos denominados Dees.

El voltaje en los Dees alterna rápidamente entre positivo y negativo gracias a la aplicación de radiofrecuencia (RF), lo que atrae hacia un polo u otro al ión inyectado. A su vez, se aplica un fuerte campo magnético, perpendicular al plano del ciclotrón, que hace que la trayectoria de la partícula se curve hacia el centro y una fuerza centrífuga mecánica que actúa impulsando la partícula fuera del centro.

Por lo tanto, si se repite muchas veces este proceso donde D1 es positivo y D2 negativo, causando que la partícula sea expulsada de D1 y atraída a D2 y viceversa, la partícula ganará cada vez más energía mientras rota con un radio levemente mayor cada vez hasta alcanzar el borde del ciclotrón. La imagen 3.2 esquematiza la trayectoria de una partícula.

Una vez que la partícula adquiere la energía requerida, en ese punto, pasa por un sistema de extracción que retiene las cargas opuestas a las requeridas permitiendo que estas últimas pasen. El campo magnético aplica una fuerza en la dirección opuesta haciendo que la carga sea extraída para dirigirse e impactar sobre un material de blanco que se desee irradiar. [14]

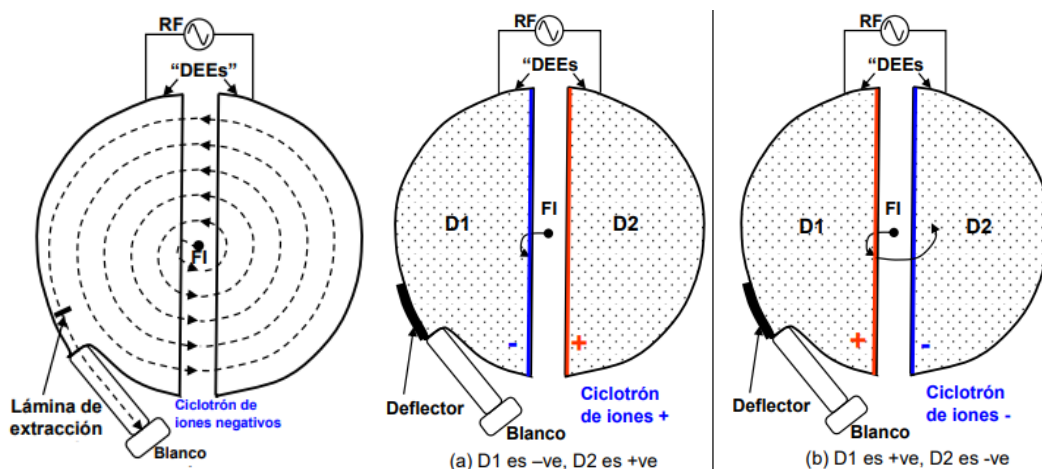


Imagen 3.2. Diagrama que esquematiza un ciclotrón con la trayectoria del ion dentro de los semicírculos. [14]

En el capítulo a continuación se detalla el equipo PET Trace 800, cuyo equipo es con el que se cuenta en la institución donde se lleva a cabo la realización del trabajo.

Se describe cada uno de los subsistemas que conforman el equipo, se desarrolla una explicación y se muestran fotos reales de las partes constitutivas del ciclotrón.

Capítulo 4

4.1. Presentación de la instalación

El presente trabajo se llevó adelante en la Fundación para la Lucha contra las Enfermedades Neurológicas de la Infancia (FLENI), en el servicio del Centro de Imágenes Moleculares (CIM), en el área Ciclotrón.

El edificio donde se encuentra el CIM, está integrado por una unidad PET/CT, un ciclotrón, un Laboratorio de Radiofarmacia y un PET para animales pequeños (MicroPET).

El CIM se encuentra en el KM 53 de la ruta 9, dentro de la Sede Escobar de FLENI. En la siguiente foto satelital (imagen 4.1) se representa la ubicación del servicio con un rectángulo rojo.

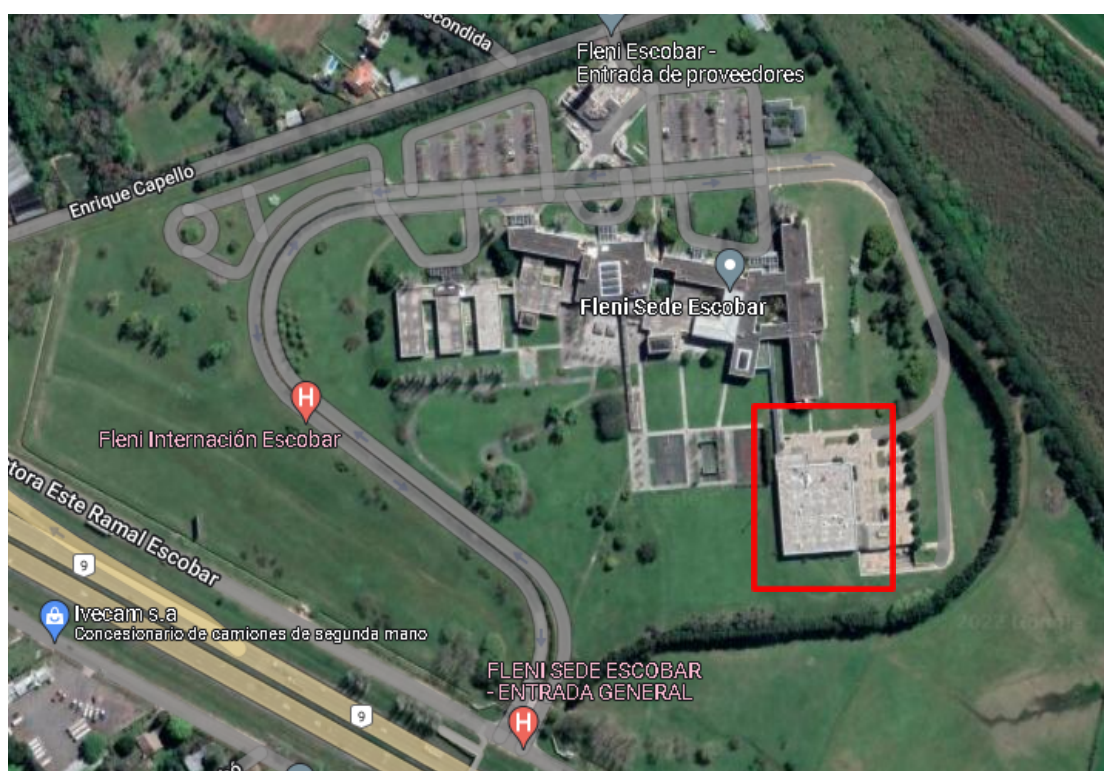


Imagen 4.1. Foto satelital de [google.maps](https://www.google.com/maps)// Sede FLENI Escobar. Servicio CIM en el rectángulo rojo.

La instalación radiactiva descrita en este informe corresponde a una instalación Clase 1 de acuerdo a la norma de ARN AR 0.0.1, donde se incluyen a los Aceleradores de Partículas con $E > 1$ MeV (excepto los aceleradores de uso médico).

Este tipo de instalación requiere un proceso de licenciamiento de más de una etapa [15] y se comprende de cuatro módulos.

El primer módulo, equivalente a $\frac{1}{3}$ de la construcción, se compone por el búnker del ciclotrón, consola de operación, sala de electrónica del ciclotrón y zona de baños con vestidores.

El segundo módulo, anexo al antes mencionado, ocupa el segundo tercio de la instalación, comprende el Laboratorio de Producción de Radiofármacos PET, y el Laboratorio de

Investigación y Desarrollo, separando ambos laboratorios, se ubica el área técnica de celdas. Cada laboratorio cuenta con su correspondiente vestidor y SAS de ingreso, los cuales se conectan con el primer módulo a través de un pasillo.

El último tercio de superficie está formado por los módulos 3 y 4, constituidos por el módulo de Control de Calidad y el de Despacho, respectivamente. Ambos se encuentran contiguos e interconectados al segundo módulo mediante un sistema de SAS.

El Laboratorio de control de calidad posee una zona de antecámara, vestuario, una zona donde se realiza el Control Microbiológico y el Laboratorio de Calidad propiamente dicho, el cual recibe las muestras a través de SAS desde los Laboratorios de Producción y Desarrollo.

El módulo de despacho posee un área de salida de material a uso interno, limpieza, cuarentena y depósito; también posee un sector de empaque y salida de material al exterior. Tanto el depósito como la zona de empaque se conectan con el laboratorio de Producción y Desarrollo a través de SAS.

El presente trabajo se desarrolla en el módulo 1, que comprende el búnker donde se aloja el ciclotrón propiamente dicho y algunos equipos complementarios al sistema, como el chiller de enfriamiento, los paneles de gases, la unidad de decaimiento de gases (WGU), entre otros. Las paredes estructurales de este búnker son de hormigón de 70 cm de espesor. Contiguo al mismo, se encuentra la sala de electrónica del equipo, donde se encuentra el control de las unidades principales del ciclotrón, como la alimentación del magneto, de la fuente de iones, de la radiofrecuencia o el sistema de aire comprimido. Además se alojan determinados repuestos y herramientas.

La consola de ciclotrón se encuentra separada de la sala de electrónica por una puerta. En la sala de operación del ciclotrón al momento de realización del trabajo se desempeñan 3 personas, quienes desarrollan, principalmente, la operación del mismo. Adicionalmente, se llevan a cabo las siguientes tareas: resolución de problemas que surgen durante la operación del equipo, ejecución de mantenimiento preventivo y correctivo, reposición de insumos, control de stock de repuestos, solicitud de presupuestos, control de stock y reemplazo de tubos de gases de la instalación, coordinación de tareas con otros servicios (como tareas generales en el entepiso técnico/subsuelo, control de las unidades manejadoras de aire, cambios de filtro, chiller de refrigeración, problemas eléctricos, entre otras).

Por otro lado, este personal también ejerce el rol de oficial de radioprotección (de forma alternada con el rol de operador), incluyendo el control de registros de la dosimetría del personal, control de monitores de área, gestión de certificados y calibraciones, firma certificada de documentación, análisis de datos de los registros de chimenea, actualización de actas y registros, elaboración de informes para presentar ante la ARN y gestión de residuos radiactivos.

Cuando se desarrollan tareas de mantenimiento, dentro del búnker, además de los operadores, también se desempeñan el jefe de mantenimiento y operación del ciclotrón y el jefe de la instalación.

El área de importancia, donde se realizaron los registros y medidas de los datos necesarios para el desarrollo del trabajo se clasifica como área controlada. De acuerdo a la ARN [9], en las áreas controladas se debe implementar la delimitación mediante barreras físicas apropiadas, la señalización, el control de accesos, el monitoreo del personal y el monitoreo de área; es por

esto que para el ingreso a la misma se debe estar autorizado, poseer elementos de protección personal (en caso que sea necesario) y elementos de dosimetría personal. Además, las puertas poseen enclavamientos que solo pueden ser abiertos si las condiciones del equipo lo permiten y si se cuenta con tarjetas de autorización. En éstas áreas se debe trabajar bajo procedimientos establecidos y además se debe realizar el control de las presiones ambientales.

En las áreas supervisadas, se debe implementar la señalización y el monitoreo de área. Si bien no debe trabajarse bajo procedimientos establecidos, sí es necesaria la revisión periódica de las condiciones de trabajo.

4.2. Monitoreo y seguridad

Dentro del búnker, se cuenta con dos equipos de monitoreo de área con sonda externa marca Thermo Scientific, modelo RMS3-C2, capaz de detectar tasa de dosis ambiental debido a la radiación gamma con un rango de registro de 0,1 $\mu\text{Sv/h}$ a 100 Sv/h, con alarmas audibles y visuales seteables por el usuario. Las sondas están colocadas dentro del búnker y los monitores de visualización por fuera del mismo, a un costado de la puerta de ingreso (imagen 4.2). A su vez, el registro de estos monitores es supervisado desde una pantalla ubicada en la sala de consola de ciclotrón.

En la consola de ciclotrón, se cuenta con un equipo detector de neutrones, de igual marca que los antes mencionados Thermo Scientific también con alarmas audibles y visuales seteables por el usuario.

Para un monitoreo de piezas, posiciones de trabajo, herramientas o superficies, se cuenta con un equipo de medición portátil del tipo Geiger Müller, capaz de detectar γ , β y α , con rangos de hasta 500.000 cps, 100 mSv/h, o bien 10 Rem/h, marca Thermo Scientific, modelo Radeye B20-ER.



Imagen 4.2. Primera: ingreso al búnker, monitores con sonda. Segunda: detector de neutrones de consola. Tercera: detector portátil.

Es obligación y exigencia de la ARN llevar el registro de dosimetría del personal que se desempeña en el servicio, el mismo debe ser del tipo diferido y por un servicio externo a la instalación. Por este motivo, el registro de dosimetría está tercerizado por la empresa Nuclear Control, la cual utiliza el método OSL (explicado en el capítulo 2), brindando dosímetros de cuerpo entero y muñeca.

Además, para complementar el seguimiento de la dosimetría del personal se cuenta con Dosímetros Electrónicos Personales (EPD), que arrojan la información de manera instantánea lo

que permite controlar la dosis en tiempo real, además de contar con alarmas ante exposiciones a altas tasas de dosis (imagen 4.3).



Imagen 4.3. Primera: EPD. Segunda/Tercera: dosímetro personal de muñeca y cuerpo entero.

Respecto a las herramientas cuyo objetivo es disminuir la contaminación interna de los TOE, la instalación cuenta con celdas calientes como sistemas de confinamiento, tanto en el Laboratorio de Producción como en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo. Por otro lado, se lleva a cabo el control de la ventilación, mediante diferencias de presión entre las distintas salas, siendo más negativa la presión del área con mayor riesgo de contaminación radiológica y más positiva la presión del área donde el riesgo de es menor. De esta manera, el aire queda confinado en el área de mayor riesgo radiológico. En combinación con el control de las renovaciones de aire se implementa el uso de filtros, HEPA para los aerosoles y carbón activado para gases y vapores.

Para proteger a los trabajadores de la radiación externa, dentro del búnker del ciclotrón se cuenta con reservorios debajo del suelo denominados trincheras, estos son utilizados para almacenar los elementos que permanecen con activación inducida por la generación de material radiactivo luego de ser reemplazados durante los distintos mantenimientos del equipo. También existe un contenedor blindado de 10 cm de espesor de plomo ubicado en el banco de trabajo, en el que se almacenan las ventanas de los blancos y los foils de extracción reemplazados luego de un mantenimiento o cualquier parte pequeña que resulte altamente activada por la operación del ciclotrón.

También se cuenta con una pantalla de fraccionamiento plomada que posee un vidrio de 8.5 cm de espesor y se utiliza para trabajar con pequeñas piezas detrás de la misma.

Finalmente también se cuenta con ladrillos de plomo, cuyas dimensiones son 20 cm de largo, 10 cm de ancho y 5 cm de espesor, los cuales son empleados para construir paredes plomadas que funcionarán como barrera en caso de ser necesario. Todo lo antes descrito puede observarse en la imagen 4.4.



Imagen 4.4. Primera/segunda: contenedores plomados, diferentes estructuras. Tercera: pantalla de fraccionamiento blindada.

En lo que se refiere a la distancia, respecto de las distintas fuentes emisoras de radiación, es recomendable trabajar a la mayor distancia posible de las mismas. Por este motivo, existen posiciones más adecuadas que otras para realizar una determinada tarea, estas posiciones pueden conocerse midiendo la tasa de dosis en los diferentes sitios mediante los dosímetros EPD, a los cuales se les puede programar alarmas con un determinado valor de tasa de dosis de manera de indicarle al TOE la radiación a la que está expuesto.

Para disminuir los tiempos de exposición y, por consiguiente, disminuir la dosis recibida es necesario el conocimiento de los procedimientos de las tareas a realizar dentro del búnker, es por esto que los procedimientos son estudiados, revisados y actualizados constantemente. Además se realizan charlas de capacitación y discusión dentro del grupo de trabajo.

4.3. Acelerador PET Trace 800

El equipo con el que se cuenta en la institución donde se desarrolla este trabajo es de marca General Electric, modelo PET Trace 800. Es un ciclotrón auto-blindado de ión negativo, doble haz y se puede configurar para la producción de diferentes radioisótopos PET. Al momento, está configurado para irradiar con protones con un solo haz y acelerar partículas hasta los 16,5 MeV.

El acelerador está compuesto principalmente por un magneto, una fuente de iones, un sistema de extracción de haz, un sistema de diagnóstico del haz, una bomba de vacío y un sistema de radiofrecuencia. A su vez, se complementa con un sistema de control, un circuito de enfriamiento, una estación de trabajo y almacenamiento de datos y equipos de alimentación y soporte.

Los radionucleidos que actualmente se producen son F-18 y C-11. Éstos son enviados automáticamente a los sistemas de procesamiento de radioquímica, es decir, a los módulos de síntesis, para su conversión en radiotrazadores o en precursores para su uso en la preparación de otras moléculas marcadas tanto en el laboratorio de producción o el laboratorio de desarrollo.

4.3.1. Subsistemas

Brevemente se mencionan las características principales de cada subsistema.

- I. Fuente de iones

Dentro de la fuente de iones se inyecta el gas de interés y se generan los iones negativos que se van a acelerar. Cuando las Dees alcanzan un voltaje positivamente alto, la punta de las mismas extrae los iones negativos a través de la hendidura ubicada en el ánodo (imagen 4.5). Los iones que se aceleran pueden ser H^- con energía de haz de 16,5 MeV, para la cual se utiliza una corriente de 80 μA .

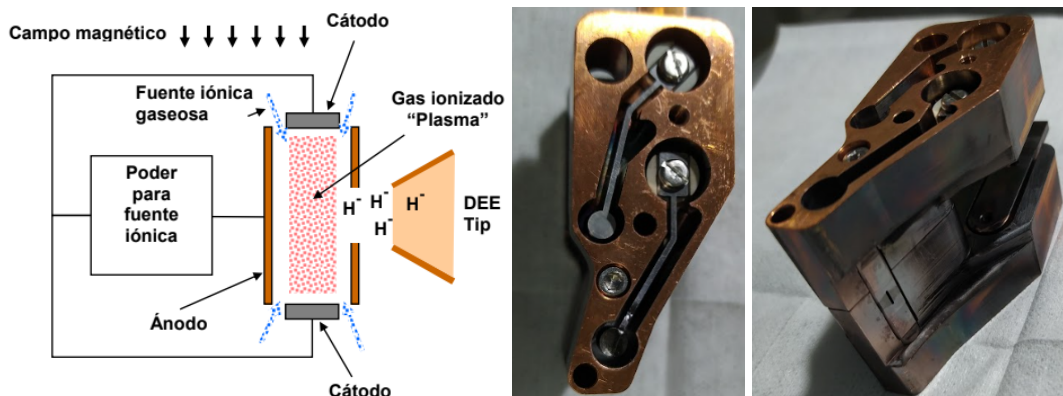


Imagen 4.5. Primera: esquema de representación del funcionamiento de la fuente de iones. Segunda: foto real. Vista lateral de fuente y sus cátodos. Tercera: vista frontal, donde se observa la ventana por donde se extraen los iones.

II. Sistema de radiofrecuencia y sistema de magneto

El sistema de RF proporciona el potencial de aceleración de las partículas. La aplicación de radiofrecuencia (RF) a las Dees hace alternar un voltaje de 35 kV rápidamente entre positivo y negativo, atrayendo la partícula a una u otra Dee, que sumado al campo magnético hacen girar la partícula haciendo que la misma alcance energías cada vez más altas. El campo magnético mantiene las partículas aceleradas en órbitas controladas, su dirección es perpendicular al plano del ciclotrón, siendo el campo medio en el radio de extracción de 1,8 T, 2,1 T en los valles y 1,4 T en las colinas. Está comprendido por el imán con bobinas, la fuente de alimentación de la bobina principal (PSMA) y los mecanismos de apertura de puertas.

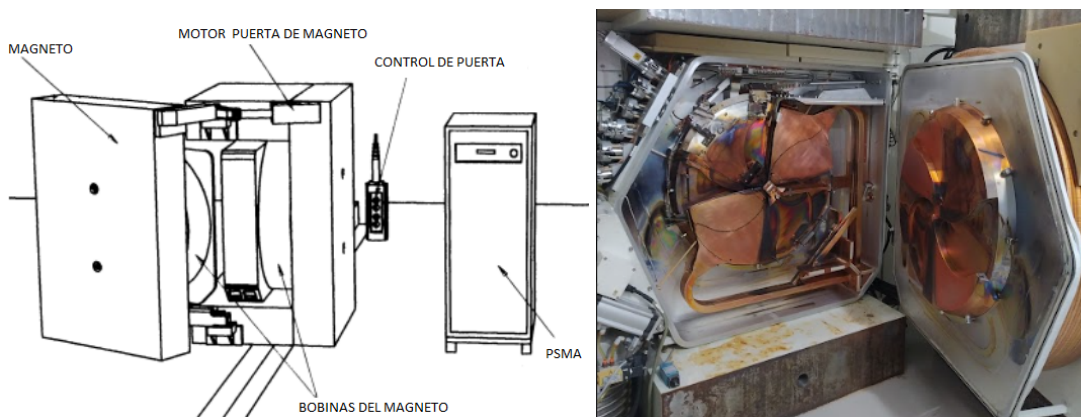


Imagen 4.6. Primera: esquema de imán, PSMA y control de apertura de puertas. Segunda: foto real, donde se observa la puerta de la cámara abierta con los valles y colinas.

III. Sistema de extracción del haz

Dirige el haz de partículas al puerto de salida del target a bombardear. Los iones negativos acelerados se convierten en protones y/o deuterones al atravesar una lámina de extracción, llamada foils de extracción (imagen 4.7). El foil de extracción es una pieza muy delgada de carbono (3 μm de espesor), lo cual es suficiente para arrancar los electrones del haz sin absorber el mismo. El foil está montado en un carrusel, este carrusel contiene 6 foils, y puede ser rotado para utilizar uno nuevo cuando se requiera a través del sistema master del equipo, en consola, sin necesidad de abrir la cámara de vacío del ciclotrón.



Imagen 4.7. Foto real. Carrusel de foils de extracción, con láminas montadas en él. A su lado un foils.

En la imagen 4.8 se esquematiza el proceso que sufre la partícula hasta impactar con el blanco.

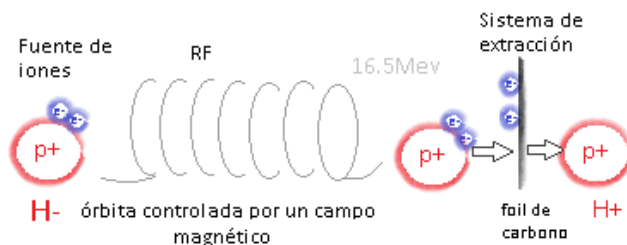


Imagen 4.8. Esquema del proceso de aceleración del ión.

IV. Blancos o Targets.

El ciclotrón posee seis posiciones de blancos (también llamados targets, del inglés) aunque actualmente solo se utilizan 3, una posición para un blanco de C-11 y dos para los blancos de F-18. Los blancos son los encargados de mantener en su interior el material que, al ser irradiado por el haz de partículas, producirá el radionucleido deseado. Para el caso de este equipo, puede tratarse de blancos líquidos, como el utilizado para la producción de F-18, o gaseosos, como el utilizado para la producción de C-11 (imagen 4.9). El haz de protones golpea el blanco seleccionado en la posición correspondiente, donde tiene lugar una reacción nuclear. Después de la irradiación, el contenido radiactivo del target (gas o líquido) es transportado al sistema de radioquímica para su posterior procesamiento.

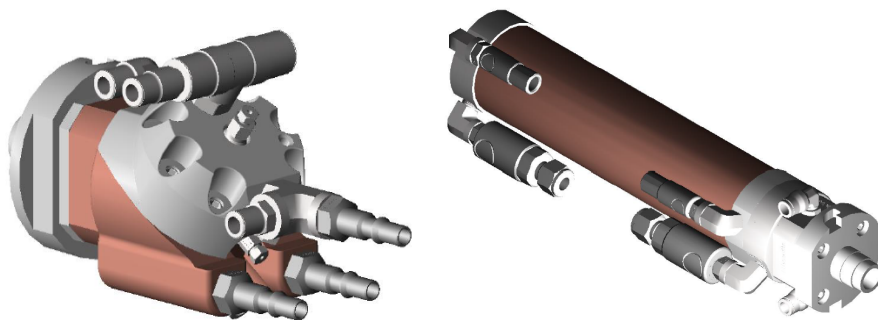


Imagen 4.9. A la izquierda: target de F-18. A la derecha: targets de C-11.

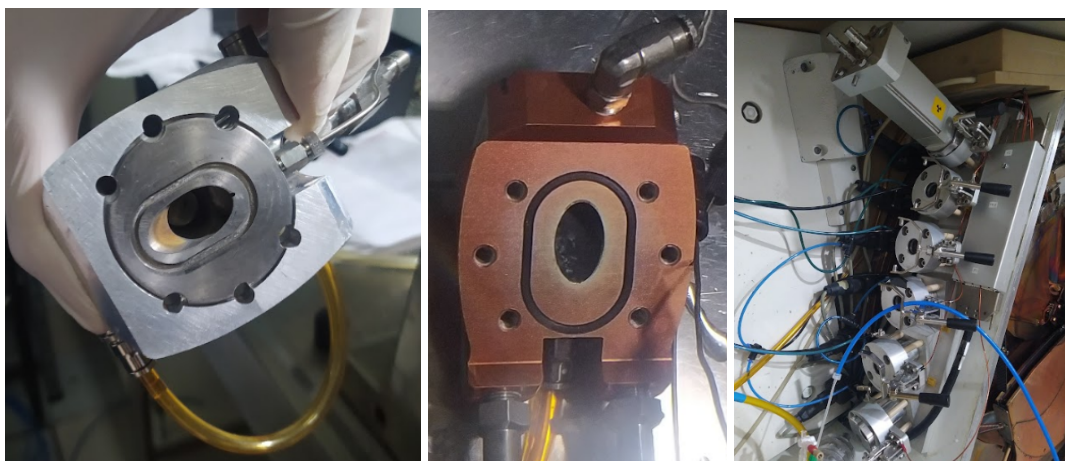


Imagen 4.10. Primera/segunda: fotos reales del target de F-18 desarmado para su mantenimiento. Tercera: foto real que muestra las 6 posiciones que pueden ocupar los blancos en el equipo, la primera posición se encuentra ocupada por un target inactivo.

El target en su estructura posee dos láminas o foil de havar. Uno de ellos, el foil de vacío, separa la cámara de vacío del ciclotrón de la cámara de enfriamiento por helio, mientras que el otro, retiene el material blanco en su cámara. Se utiliza el He como refrigerante ya que es químicamente inerte y no se activa por el bombardeo del haz de partículas. El tiempo de vida útil de estas láminas ronda los 18 mA/h.

V. Sistema de vacío y sistema de refrigeración.

El sistema de vacío acondiciona la cámara al nivel de presión requerido para permitir que las partículas se aceleren con pequeñas pérdidas de haz. Un mal vacío en la cámara del ciclotrón podría producir colisiones del haz con las moléculas de aire allí presentes, resultando en una pérdida en la calidad del haz en la zona de los blancos. Además el vacío generado proporciona aislamiento para los campos de RF de alto voltaje. Para lograr los niveles de vacío adecuado el equipo utiliza una bomba rotativa o mecánica y una bomba difusora de aceite, ambas comandadas desde la sala de electrónica del ciclotrón. La siguiente tabla presenta los valores de vacío normales y las condiciones de operación:

Stand by	$1,7 \cdot 10^{-7}$ mbar
Operación	$1,2 \cdot 10^{-5}$ mbar

Vacío OK	$< 4 \cdot 10^{-5}$ mbar
Vacío No OK	$> 8 \cdot 10^{-5}$ mbar
Tabla 4.1. Valores de vacío	

En cuanto a la refrigeración, el equipo posee dos sistemas de enfriamiento; un sistema primario, interno y cerrado de circulación de agua, ubicado dentro del búnker, el cuál elimina la mayor parte de la energía calórica del equipo; y un sistema de enfriamiento secundario, el cuál posee un chiller ubicado externamente sobre el techo de la instalación el cuál enfría el agua del circuito interno a través de un intercambiador de calor. Dado que el agua de enfriamiento fluye a través de los diferentes componentes eléctricos (bobinas del magneto, amplificador de RF, DEEs, etc), su conductividad debe ser baja para disminuir la probabilidad de conducción eléctrica, es por esto, que el circuito interno tiene en su recorrido un tanque de resina desionizadora para remover los iones del agua de enfriamiento y, por lo tanto, disminuir su conductividad.

Por otro lado, el ciclotrón posee un sistema de enfriamiento por He. Es un sistema interno, el cual tiene como propósito enfriar eficientemente las láminas de havar de los targets. El calor de las láminas se transfiere al helio y por medio de un intercambiador de calor la temperatura se disipa al agua de enfriamiento del circuito.

VI. ACU y sistema de diagnóstico

La Unidad de Control del Acelerador (ACU) monitorea y controla el acelerador. También contiene puertos para la conexión de periféricos. Está montada en un rack en sala de electrónica del ciclotrón y conectada al sistema maestro a través de una red de área local Ethernet (imagen 4.11).

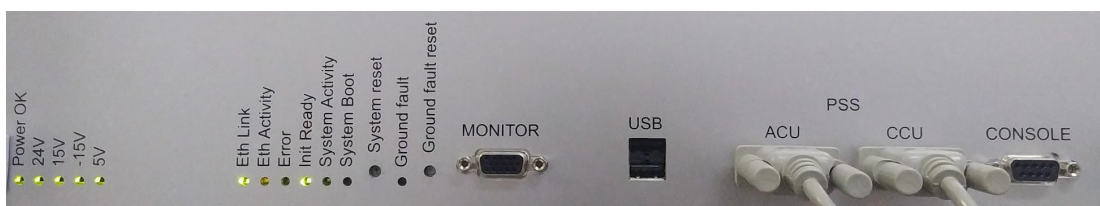


Imagen 4.11. Foto real ACU.

El sistema de diagnóstico se puede observar durante la producción del material radiactivo (imagen 4.12). Permite medir las condiciones del haz en diferentes tramos del ciclotrón, proporcionando información de interés como corriente en colimadores, corriente en fuente de iones, voltaje de las Dees, corriente del campo magnético, entre otros. Durante la producción se va generando un registro (logs) de datos y al finalizar la producción arroja un número que abre un documento (batch) con los datos más relevantes.

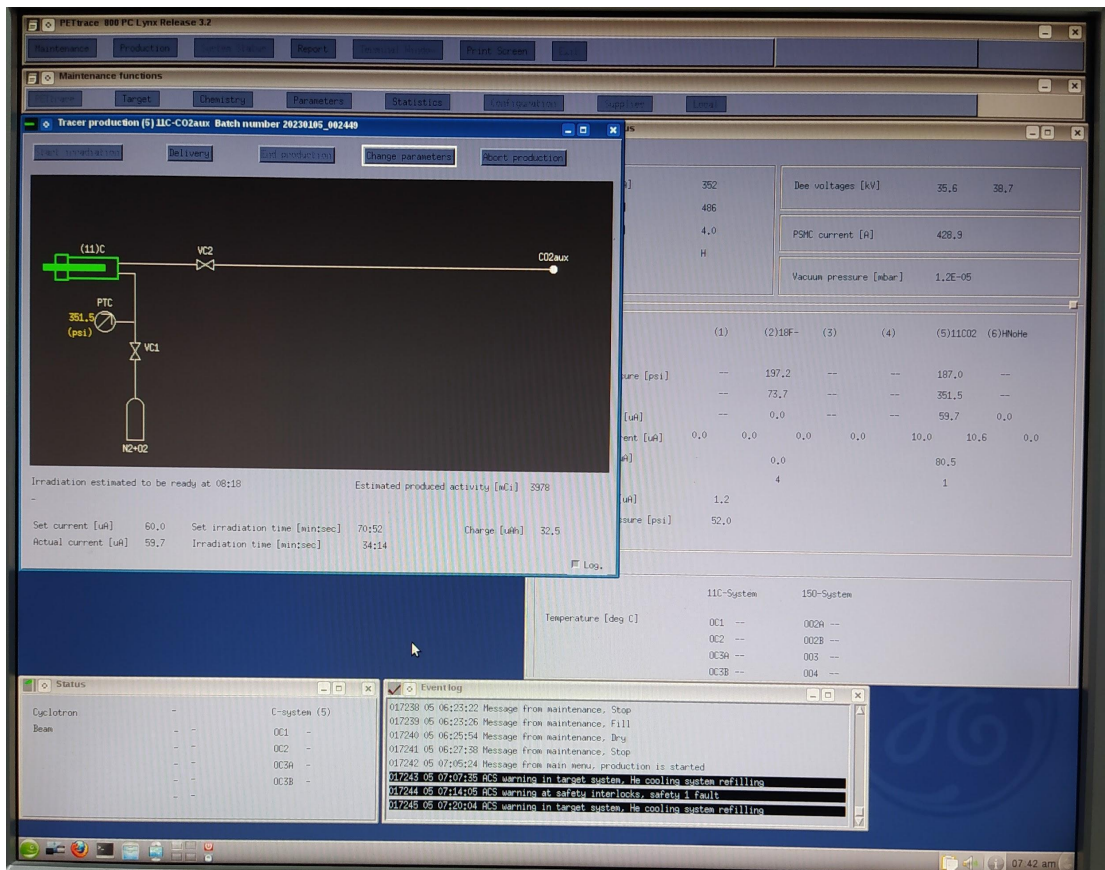


Imagen 4.12. Impresión de pantalla del sistema master durante la operación del ciclotrón.

Adicionalmente, dentro del búnker del ciclotrón se cuenta con un gabinete de procesamiento de gases denominado Procab, con puertas de 14 cm de espesor (imagen 4.13); un sistema de almacenamiento de gases de desecho (WGU) directamente conectado a la chimenea y las puertas de blindaje radiactivo integrado para neutrones y gamma alrededor del ciclotrón y blancos.



Imagen 4.13. Foto real: módulo Procab.

4.4. Operación

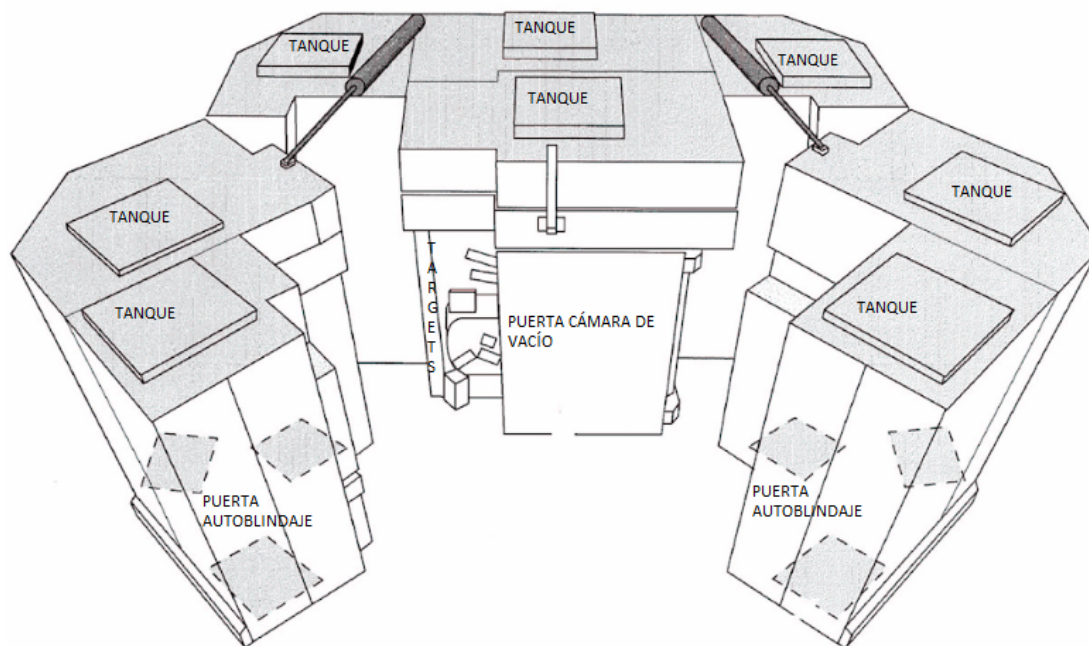
La operación del ciclotrón, específicamente la producción de radioisótopos, se realiza desde la sala de control del equipo. Bajo condiciones normales de trabajo (80 μA para producciones de F-18 y 60 μA para producciones de C-11), la tasa de dosis de fondo en esta área oscila entre 0,18 y 0,28 $\mu\text{Sv/h}$ durante el bombardeo.

Toda la producción es comandada desde una computadora ubicada en consola (imagen 4.12). Al iniciar la jornada se procede al encendido de la PC de registro de monitoreo ambiental, la apertura de los gases necesarios para la producción y al ingreso en el búnker para chequear que las condiciones de trabajo como presiones, temperaturas, etc., sean las adecuadas.

Una vez a la semana, previo al comienzo de la producción, se debe abrir uno de los blindajes del equipo y realizar el reemplazo de suministro de carga de blancos líquidos, (agua enriquecida para la producción de F-18). Al realizar esta actividad, se expone parte del equipo, entre ellas los targets y piezas muy activadas producto de la radiación recibida, es por esto, que siempre que se realiza la apertura de los blindajes del ciclotrón debe ser previo a cualquier irradiación.

4.5. Mantenimiento

La mayor exposición del TOE es recibida durante los mantenimientos ya que se realizan tareas que implican la apertura de los auto-blindajes. El ciclotrón, además de estar contenido dentro de un búnker de paredes de 70 cm de hormigón, posee un sistema de autoblindaje conformado por 8 tanques, los cuales en su interior contienen agua borada para la termalización de los neutrones rápidos emitidos durante la operación del ciclotrón. Estos tanques también poseen láminas de parafina y placas de plomo en su interior. Finalmente blindando la cámara de vacío, se encuentra una puerta de aproximadamente 40 cm de plomo. Para una mayor comprensión se presenta la gráfica 4.1.



Gráfica 4.1 Esquema del ciclotrón autoblindado.

Una vez al mes, como mínimo, se realiza la apertura de los blindajes y de la cámara de vacío del equipo para realizar tareas de mantenimiento programadas.

El primer paso, cuando se realizan tareas de mantenimiento programado, consiste en la colocación de los equipos de dosimetría personal por parte de los TOE (imagen 4.3) y, en caso de ser necesario de acuerdo con las tareas que se requieran hacer, equipos de protección personal, zapatos, cubre calzado, guardapolvo, etc. En una primera instancia, se verifica que los monitores de área del búnker se encuentren funcionando y registrando correctamente, luego se procede a la apertura de los blindajes. Estas puertas se levantan mediante fuerza neumática, por medio de un sistema de aire comprimido que carga unos colchones de aire ubicados en las bases. Mediante un brazo motorizado, se pueden abrir los blindajes que recubren al ciclotrón. De esta manera, quedan expuestos los portablancos y la cámara de vacío.

Una vez abiertas las puertas de los blindajes, se retiran los targets (imagen 4.9) y se los coloca dentro de un blindaje contenedor llamado Procab (imagen 4.13), estas piezas son de las partes más activas del equipo.

Por lo general, excepto que dentro de la cámara de vacío no deban realizarse tareas de mantenimiento, se procede a la apertura de la misma. En su interior se encuentran los carruseles de extracción con los foils (imagen 4.7) los cuales deben ser reemplazados mensualmente. Antes de la apertura de la cámara de vacío, primero se deben apagar las bombas que generan el mismo y ventear, de manera que la presión dentro de la cámara sea igual que fuera de la misma. Luego se abre la cámara y se retiran los carruseles extractores, los cuales deben ser colocados detrás de una pantalla plomada, ya que junto con los targets son otras de las principales piezas que permanecen muy activas.

En caso de que se necesite realizar una tarea con los targets instalados en sus posiciones dentro del ciclotrón, se deben colocar blindajes móviles cubriéndolos como medida de protección radiológica. En este caso, se cuenta con ladrillos de plomo con los cuales se puede construir una pared, para de esta manera, disminuir la tasa de dosis recibida por los TOE.

En cuanto a las tareas de mantenimiento, tanto correctivas como preventivas, se incluyen: reemplazo de foils de carruseles de extracción, calibración de carruseles, medición de valores de resistencia en colimadores de haz, medición y alineación de las Dees, reemplazo de mangueras de He, reemplazo de mangueras de agua, limpieza de líneas peek, medición y registro de la tasas de dosis entregada por los residuos radiactivos, reemplazo de válvulas, limpieza y colocación de grasa de vacío en orings, reemplazo de piezas dañadas (motores, flap, arandelas cerámicas, cables), limpieza de fuente de iones o reemplazo de piezas, ajuste de piezas, búsqueda y solución de pérdidas tanto de agua como de He, entre otras. En la imagen 4.14 se muestran algunas de las tareas de mantenimiento realizadas sobre el ciclotrón o los equipos auxiliares.

Luego de realizar cualquiera de las tareas antes mencionadas, se procede a la colocación nuevamente de los extractores, cierre de la cámara de vacío, colocación de los targets, cierre de puertas de blindaje y pruebas funcionales del equipo.



Imagen 4.14. Fotos reales. Tareas de mantenimiento: limpieza del sistema de refrigeración por He, medición de residuos, extracción de carrusel de foils.

4.5.1. Mantenimiento de Targets

Esta tarea se presenta separada del mantenimiento mensual del equipo por dos razones, la primera es que el día del mantenimiento mensual solo se realiza la extracción del target a mantener, el cual, debido a su alta tasa de dosis debe colocarse en un blindaje donde se espera (en la medida de lo posible de 1 a 2 meses aproximadamente) que disminuya su tasa de dosis para, posteriormente, realizarle el correspondiente mantenimiento preventivo. La segunda, es que esta tarea no se realiza mensualmente sino que se ejecuta cuando el target ha alcanzado sus mA/h de uso, generalmente en un tiempo de 3 a 4 meses, a excepción de que se haya dañado una de sus láminas de havar antes de alcanzar sus horas de uso estipuladas.

El mantenimiento y la limpieza de los blancos deben realizarse detrás de la pantalla blindada mencionada en la sección 4.2. Debe ser planificado con anticipación de manera de reducir el tiempo de trabajo, por lo tanto se debe asegurar de contar tanto con las herramientas correspondientes como con las piezas de reemplazo (o-ring, foil de havar, materiales de limpieza, etc) en el momento del procedimiento.

El procedimiento consiste en el despiece del blanco retirando los tornillos y arandelas que unen las partes, para luego proceder a la remoción de las láminas de havar (imagen 4.15) y de los o-rings (imagen 4.16). Las tasas de dosis de estas piezas son muy elevadas (>100 mSv/h), ya que en contacto superan el rango de lectura del detector, por lo que inmediatamente de ser retiradas deben colocarse en el contenedor blindado del banco de trabajo (imagen 4.4). Seguido a esto se realiza la limpieza de la cámara del target y de sus distintos lados con alcohol isopropílico y papel absorbente libre de pelusas.

Finalmente, se colocan nuevos o-rings previamente engrasados con grasa de vacío, se posicionan correctamente los nuevos foils de havar y se ensamblan las partes del target para fijarlas mediante tornillos.

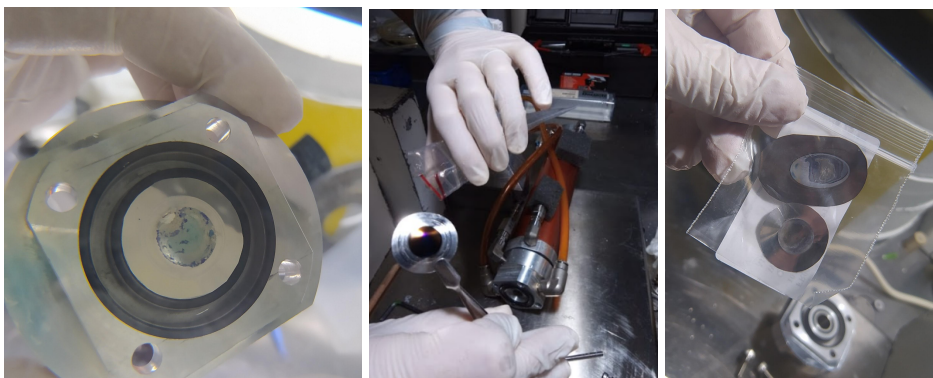


Imagen 4.15. Foto real: extracción de foils de havar utilizados.

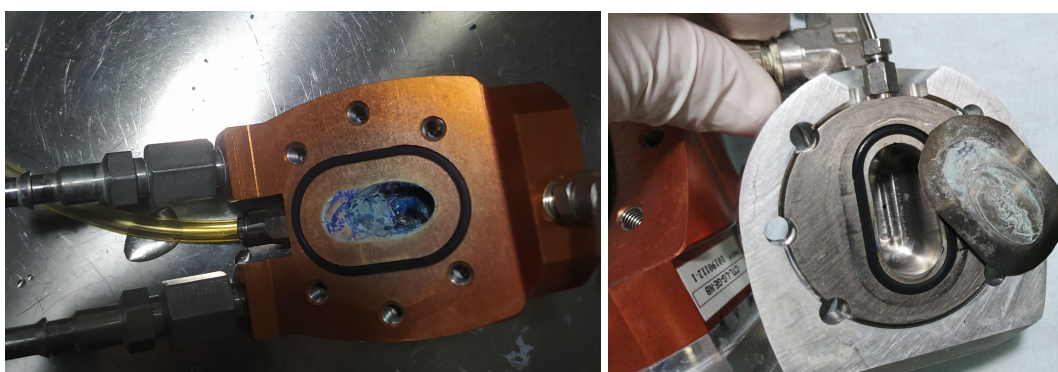


Imagen 4.16. Foto real: o-rings targets de F-18.

Capítulo 5

5.1. Método de mediciones

5.1.1. Monitoreo ambiental

Para realizar las mediciones de tasas de dosis se utilizaron equipos tanto de sonda interna como de sonda externa, considerando para ambos casos la magnitud operacional dosis equivalente ambiental $H^*(10)$ en unidades de Sievert [Sv]. Se Define $H^*(10)$ como la dosis equivalente producida por un campo de radiación alineado y expandido, a una profundidad " $d = 10\text{ mm}$ " del radio de la esfera ICRU.

Los instrumentos de sonda externa utilizados, son 2 equipos marca Thermo Scientific, modelo RMS3-C, N° de serie: 02607 y 02606 respectivamente, que registraron las mediciones posicionados de manera fija en línea recta a la cámara de vacío. La incertidumbre expandida U del factor de calibración (con un factor de cobertura $K=2$) fue obtenida del certificado de calibración emitido por el Departamento de Dosimetría de Radiaciones Ionizantes de la CNEA siendo la misma, 18 para el primer equipo y 12 para el segundo.

Por otro lado, para medir en distintos sitios dentro del búnker y realizar la medición de piezas y residuos, se utilizó un detector Geiger Müller marca Thermo Scientific, modelo RADEYE B20-ER de serie: 31037, de sonda interna. Para este equipo, la incertidumbre expandida U del factor de calibración (con un factor de cobertura $K=2$) fue obtenida del certificado de calibración emitido por el Departamento Dosimetría de Radiaciones Ionizantes de la CNEA, siendo esta igual a 18.

Parte A: Tasas de dosis medidas dentro del búnker para diferentes sitios

El búnker del ciclotrón es un área controlada donde habitualmente existe radiación por encima del fondo natural. Con el objetivo de obtener una medición que permita identificar los sitios más relevantes desde el punto de vista radiológico, en primer lugar, se identificaron diferentes áreas de trabajo. Luego, se realizaron medidas de tasas de dosis con los blindajes del equipo cerrados y sin realizar ninguna tarea dentro del mismo.

Los sitios medidos fueron las posiciones delante de las dos mesas de trabajo, delante de la repisa, delante de cada estantería, el área delante del Procab con las puertas del mismo cerradas, el área de posición delante del WGU y el área de las manos sobre el mismo, y finalmente, el área de manos detrás de la pantalla plomada (ver gráfico 6.1, pág 47).

Parte B: Tasas de dosis de los residuos y piezas activadas

Luego de identificar y sectorizar los sitios de deposición de residuos radiactivos y piezas activas, se revisaron los registros existentes [16] y se efectuaron nuevas mediciones con el detector RADEYE B20-ER en caso de ser necesario, de los residuos o piezas guardadas.

Las medidas se tomaron a una distancia de un metro y otras mediciones fueron realizadas en contacto.

De manera de ordenar la información, para registrar las mediciones, fue necesaria la previa confección de una tabla (tabla 5.1) presentada a continuación:

Fecha	Pieza/Zona área	Residuo SI/NO	Tasa de Dosis en contacto ($\mu\text{Sv/h}$) H*	Tasa de Dosis a 1 m ($\mu\text{Sv/h}$) H*	Observaciones

Tabla 5.1: Planilla mediciones tasa de dosis

Parte C: Tasas de dosis en diferentes posiciones de trabajo durante mantenimiento

Por otro lado, en los mantenimientos realizados al equipo durante un período de 3 meses, con el detector RADEYE B20-ER se registraron las tasas de dosis ($H^*(10)$) en diferentes posiciones de trabajo ocupadas por los TOE al momento de realizar las diferentes tareas, bajo condiciones habituales de un mantenimiento preventivo donde el equipo permanece dos días inactivo, es decir, sin irradiar 2 días previos a su apertura.

Se registraron los valores de tasas de dosis en diferentes situaciones: con el blindaje izquierdo abierto, con ambos blindajes abiertos, con la puerta de cámara de vacío cerrada y abierta; y con o sin los targets colocados.

El gráfico 5.1 esquematiza el ciclotrón con sus blindajes. Las estrellas de color rosado especifican el sitio donde se realizaron las mediciones de acuerdo a diferentes posiciones de trabajo.

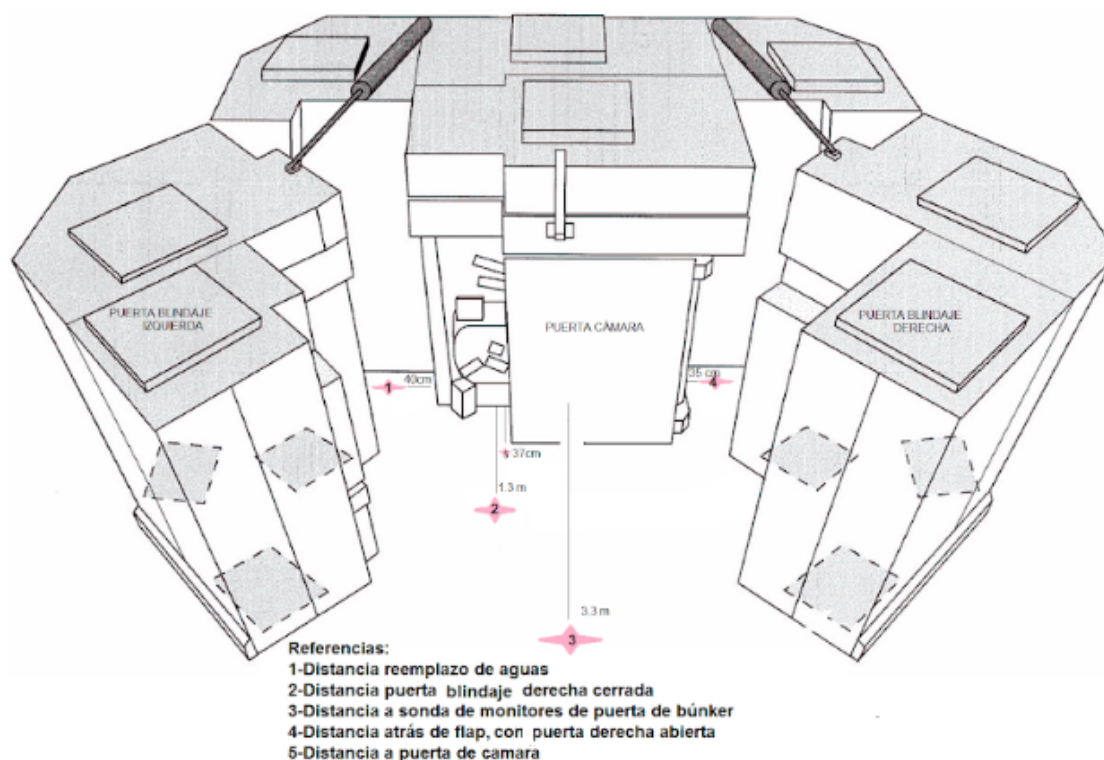


Gráfico 5.1. Esquema del ciclotrón y las diferentes posiciones de trabajo para operaciones de mantenimiento.

5.1.2. Monitoreo del personal

El monitoreo de cada trabajador se realizó mediante dosimetría diferida y dosimetría directa.

En primer lugar, se utilizó la dosimetría diferida para realizar el seguimiento de la dosis de cada trabajador, tanto en extremidades como en cuerpo entero en un período de 5 años.

El método de dosimetría directa fue utilizado para la cuantificación de las dosis recibidas discriminadas por tareas durante los mantenimientos del equipo, en un período de aproximadamente 3 meses.

Adicionalmente, se relevaron de las actas de mantenimiento las intervenciones al equipo, para contabilizar tanto los mantenimientos preventivos como los correctivos realizados durante el año 2022. Cabe aclarar que el mantenimiento a los targets se considera mantenimiento preventivo o programado siempre y cuando esta tarea se haya realizado debido a que se alcanzó su período de utilidad y no porque se haya dañado, en este último caso se considera mantenimiento correctivo.

Se utilizaron las magnitudes de dosis equivalente en órgano o tejido Hp(d), considerando Hp(10) a 10 mm de profundidad para evaluar dosis en cuerpo entero.

Parte A: Monitoreo por lectura diferida

Para obtener el seguimiento de las dosis recibidas por los trabajadores del ciclotrón se relevaron los datos registrados por la empresa Nuclear Control mediante la tecnología OSL durante un período de 5 años comprendido entre el 2018 y 2022 inclusive.

Para esto, se revisaron los registros de dosimetría entregados por la empresa mes a mes y se realizó la sumatoria de las dosis recibidas por cada año para cada trabajador, confeccionando una tabla con estos resultados, en magnitudes de dosis efectiva y dosis equivalente en piel o extremidades. Cabe aclarar que los certificados no se acompañan de los datos de incertidumbre, ni error con el que se presentan las medidas, si bien estos datos fueron solicitados a la empresa, no se cuenta con los mismos.

Para conservar la identidad de los trabajadores en el presente trabajo, se los referenció como TOE 1, TOE 2, TOE 3, TOE 4, TOE 5 y TOE 6.

También se realizó la sumatoria de la dosis de los TOE, obteniendo la dosis colectiva y el total de actividad producida cada año en unidades de Ci.

Se debe tener en cuenta para el análisis de los resultados que el TOE 5 se incorporó a mediados del año 2022 y el TOE 6 se desvinculó a mediados del año 2021.

Parte B: Monitoreo por lectura directa en tareas de mantenimiento

Para realizar la discriminación de la dosis por tareas realizadas durante los mantenimientos, se utilizaron los equipos portátiles de dosimetría EPD, Thermo Scientific mod. MK2, para registrar la magnitud dosis equivalente Hp(10), considerándola de forma conservativa como la dosis efectiva recibida por el TOE.

Se registraron las dosis en un período de 3 meses, es decir, en un total de 3 mantenimientos preventivos mensuales y en los mantenimientos correctivos o intervenciones al equipo realizados durante ese lapso temporal.

Previo a cada intervención, se llevaron a valor de cero todos los dosímetros y se realizó el seguimiento de cada trabajador en cada tarea realizada. Para facilitar esta tarea y realizarla de

manera ordenada, se diseñó la siguiente planilla (Tabla 5.2), la cual fue completada durante las tareas ejecutadas en los distintos mantenimientos.

Fecha	M	Cantidad de TOE's	Tarea	Dosis registrada (μSv) $\Sigma H_p 10$	Observaciones

Tabla 5.2. Planilla: mediciones de dosis. M: mantenimiento. P:Preventivo. C: Correctivo.

Capítulo 6

6. Análisis de resultados

Para determinar los límites y restricciones de dosis, la ARN considera que un trabajador se encuentra en su puesto de trabajo como máximo 2000 horas al año (producto de considerar 8 horas de trabajo por día y 50 semanas al año). Sabiendo esto, se presenta la siguiente tabla, donde, además de presentar la restricción y los límites de dosis anuales, se visualizan las tasas de dosis a las que si un trabajador se encuentra expuesto las 2000 horas alcanzaría dichos valores. Las tasas de dosis ambientales de referencia se utilizan como estimaciones para su comparación con los límites de dosis.

		Tasa de dosis de referencia en mSv/h	Tasa de dosis de referencia en μ Sv/h
Límite dosis efectiva establecido por la ARN [9]	20 mSv	0,01 mSv/h	10 μ Sv/h
Nivel de restricción dosis efectiva para considerar práctica optimizada definido por la ARN [9]	5 mSv	0,0025 mSv/h	2,5 μ Sv/h
Límite dosis en piel o extremidades establecido por la ARN [9]	500 mSv	0,25 mSv/h	250 μ Sv/h

Tabla 6.1 Límites de dosis. Cálculo de tasa de dosis de referencia

Conociendo los límites y restricciones de dosis establecidos por la ARN y las tasas de dosis de referencia con las cuales se alcanzarían esos valores en 2000 horas de trabajo, se realiza el análisis de los resultados de las tasas de dosis de las piezas activas en el búnker de ciclotrón, las posiciones de trabajo y las dosis recibidas por los trabajadores ocupacionalmente expuestos del ciclotrón.

6.1.1. Monitoreo ambiental

Parte A: Tasas de dosis medidas dentro del búnker para diferentes sitios

En el gráfico 6.1 se esquematizan los sitios y las tasas de dosis registradas, en unidades de μ Sv/h. Estas tasas se deben principalmente a las partes constitutivas del equipo activadas producto de la propia irradiación para producción de material radiactivo y a la deposición de residuos radiactivos, o piezas activas en diferentes sitios como la mesada de trabajo, estanterías, trincheras, etc. Se debe considerar además que al momento de las mediciones, un target de F-18 se encontraba dentro del Procab a espera del correspondiente mantenimiento preventivo. Estos registros fueron de gran utilidad para identificar la relevancia, desde el punto de vista radiológico, de las mediciones en cercanía a las mesas de trabajo (como las estanterías, repisa y WGU) y poder dar continuidad a la parte B.

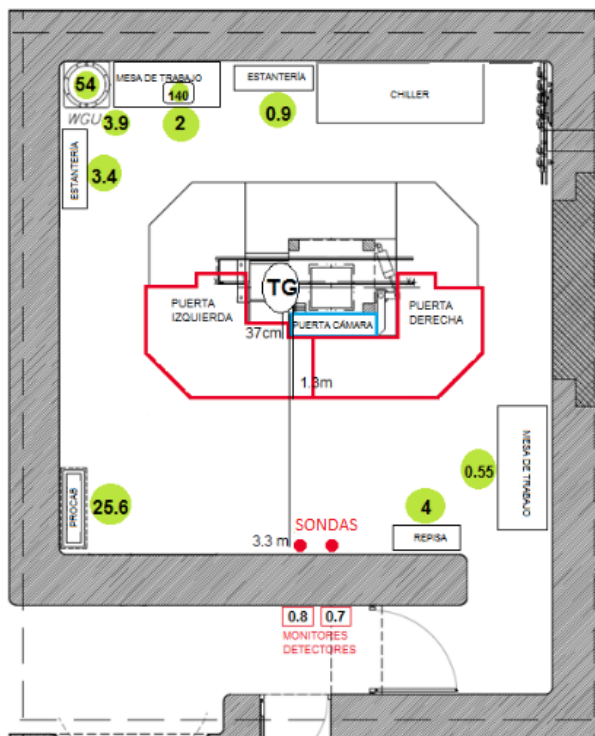


Gráfico 6.1. Croquis del búnker. En círculos verdes se presentan las tasas de dosis de los sitios medidos en $\mu\text{Sv/h}$. Autoblandajes cerrados, sin realizar tareas dentro del búnker.

Parte B: Tasas de dosis de los residuos y piezas activadas

Analizando los valores de tasa de dosis de los residuos y piezas activas registrados en la tabla 5.1 (tabla completa en el anexo 1), se confeccionan las tablas 6.2 correspondiente a las mediciones tomadas a un metro de distancia y 6.3 para las mediciones tomadas en contacto con las piezas.

Las tablas se presentan con colores que clasifican las tasas de dosis respecto a una exposición máxima durante un año de trabajo (o 2000 horas), en analogía con la tabla 6.1.

Esta cantidad de horas es una sobreestimación inicial, considerando que los trabajadores no realizan tareas de mantenimientos durante 2000 horas al año.

Para el caso de la tabla 6.2, las mediciones tomadas a un metro de distancia se comparan con los valores de los límites de dosis efectiva, siendo las piezas cuyas tasas de dosis están en color verde, equivalentes a que la dosis recibida considerando una exposición anual, se encontrarán por debajo de la restricción establecida para considerar optimizadas las prácticas, es decir, que la dosis efectiva se encuentra por debajo de los 5 mSv anuales. El color naranja, indicaría que la dosis recibida se encontraría por encima del anterior valor pero por debajo del límite máximo establecido por la ARN, sin embargo, no se encuentran piezas con estos valores en la tabla. Finalmente, la exposición a las tasas de color rojo, superaría el límite anual de 20 mSv. Se puede observar que más del 50 % de las piezas medidas corresponden a esta última clasificación, entre las que se encuentran los targets, los foil, las válvulas y mangueras, piezas que comúnmente son manipuladas durante la mayoría de los mantenimientos preventivos y correctivos realizados.

Pieza/Zona Área	Tasa Dosis a 1 m (mSv/h)
Recipiente paper burn (para pruebas de irradiación)	0,0005
Filtro de línea	0,0001
Switch probe	0,0001
Baffles	0,0002
Carrusel extractores	0,417
Foil extracción	0,35
Foil tg 5	0,4
Parte tg F-18	4,11
Parte tg F-18	1,73
Parte tg F-18	0,282
Nariz tg F-18	11

Tabla 6.2. Clasificación límite dosis efectiva. Tasas de dosis de piezas y residuos activos. OVL: supera el límite de detección del detector. La tabla completa puede verse en el anexo 1.

La tabla 6.3, cuya medición de piezas se realizó en contacto, fue clasificada de acuerdo al límite en piel o extremidades de 500 mSv anuales. Se representa en color verde a las piezas por las cuales ante una exposición anual, las dosis recibidas en extremidades integrarían un valor menor al límite de 500 mSv. A su vez, se muestra en color rojo las tasas de dosis que integrarían por encima de este valor. En contraste con la tabla 6.2, el mayor porcentaje de piezas corresponde a la clasificación verde, esto se debe principalmente a que en extremidades el límite se encuentra muy superior al límite de dosis efectiva, sin embargo, al igual que se observa en la tabla 6.2 las piezas dentro de la clasificación rojo son las correspondiente a los targets y los foils, cuyas piezas son frecuentemente manipuladas en los mantenimientos.

Pieza/Zona Área	Tasa Dosis contacto (mSv/h)
Manguera He	0,084
Línea transf tg-celda	0,005
Manguera He	0,00276
Válvula Parker*	0,245
Válvula Parker*	0,006
Bolsa virolas	0,00665
Roscas manguera He	0,0084
Virolas mangueras He	0,00834
Acople He	0,0227
Bolsa roscas	0,013
Recipiente de switch-cerámicas	0,0011
Recipiente paper burn	0,014
Bolsa guantes	0,04

Bolsa mangueras He	0,065
Manguera AC	0,005
Filtro de línea	0,00136
Brazo aluminio	0,00046
Switch probe	0,00195
Baffles	0,25
Tg F-18 una vez realizado su mantenimiento	1,72
Tg de paper burn	7,52
Foil extracción	OVL
Foil tg F-18	OVL

Tabla 6.3. Clasificación límite dosis extremidades. Tasas de dosis de piezas y residuos activos. OVL: supera el límite de detección del detector. La tabla completa puede verse en el anexo 1.

Parte C: Tasas de dosis en diferentes posiciones de trabajo durante mantenimiento

En referencia al gráfico 5.1, el cual representa los puntos de mediciones de las tasas de dosis en las cercanías del ciclotrón, se presenta la tabla 6.4. Se pueden observar los valores registrados en cada posición ocupada al momento de realizar las tareas de mantenimiento bajo las condiciones mencionadas en la metodología.

Zona-Área	Targets SI/NO	Cámara abierta SI/NO	Tasa de Dosis ($\mu\text{Sv/h}$)	Observaciones
(1) Posición cambio de aguas	SI	NO	33.5	
(2) Distancia a puerta derecha	SI	NO	370	
(2) Distancia a puerta derecha	SI	NO	102	c/3 ladrillos plomados
(2) Distancia a puerta derecha	NO	NO	5.6	
(3) Monitores puerta	SI	NO	60	
(3) Monitores puerta	SI	NO	15	c/3 ladrillos plomados *
(3) Monitores área	NO	NO	2.5	Ambos blindajes abiertos
(3) Monitores área	NO	SI	6.7	Ambos blindajes abiertos
(4) Posición atrás de motores de flap	NO	NO	75	Tasa en contacto
(5) Posición retirar/colocar target	NO	NO	1520	
(5) Posición retirar/colocar target	SI	NO	4820	

Tabla 6.4 Mediciones tasa de dosis H* de posiciones de trabajo. Puerta izquierda siempre abierta.

Al igual que para el análisis anterior, se evaluaron los valores obtenidos con referencia a la tabla 6.1, obteniéndose una nueva la tabla 6.5.

Se clasificaron las tasas de dosis por color, siendo naranja para valores cuya exposición a esta tasa integraría dosis anuales por encima del nivel de restricción para considerar optimizada una práctica pero debajo del límite máximo establecido por la ARN y rojo para tasas cuya dosis anual integraría por encima del límite establecido por la ARN. Cabe aclarar que en este caso, no se encuentran valores que clasifiquen por debajo del valor de restricción (color verde).

Zona-Área	Tasa de Dosis (mSv/h)
(1) Posición cambio de aguas	0,0335
(2) Distancia a puerta derecha c/tg	0,37
(2) Distancia a puerta derecha c/tg + 3 ladrillos	0,102
(2) Distancia a puerta derecha s/tg cámara cerrada	0,0056
(3) Monitores puerta c/tg	0,06
(3) Monitores puerta c/tg + 3 ladrillos	0,015
(3) Monitores área s/tg Cámara cerrada	0,0025
(3) Monitores área s/tg cámara abierta	0,0067
(4) Posición atrás de motores de flap	0,075
(5) Posición retirar/colocar tg s/tg	1,52
(5) Posición retirar/colocar tg c/tg	4,82

Tabla 6.5. Tasas de dosis de las áreas de trabajo durante tareas de mantenimiento.

La tabla 6.5, también permite observar la disminución de la tasa de dosis al colocar ladrillos de plomo como material de blindaje entre el personal y el punto de registro. Esto es más notorio al retirar los targets del equipo y colocarlos en un lugar radiológicamente más seguro de trabajo. De igual modo, se puede apreciar la diferencia en un aumento de tasa de dosis si permanece la puerta de la cámara abierta durante el registro de los valores o la disminución si la misma se encuentra cerrada.

La posición 1, de reemplazo de agua enriquecida, se encuentra dentro de la clasificación rojo, a pesar de esto es necesario posicionarse allí con periodicidad, ya que el reemplazo de agua enriquecida se realiza con frecuencia semanal o quincenal, dependiendo de la cantidad de producciones de F-18 realizadas. Sin embargo, lo que permite esta frecuencia en ocupar la posición, es el tiempo de permanencia, ya que el mismo es muy breve y no supera los 3 minutos por vez.

Los sitios referenciados como 2 y 5, distancia a la puerta derecha y retirar o colocar target, son posiciones que se toman al evaluar problemas referidos a la pérdida de aire comprimido, helio o agua. Estos sitios son ocupados por el TOE para inspeccionar visualmente un sector y el tiempo de permanencia varía de acuerdo a la complejidad para encontrar la falla. Se puede observar que la diferencia considerable se presenta al retirar o blindar los target. Dado que la dosis que se recibe por retirar y nuevamente colocar los target es de consideración, la decisión de retirarlos o blindarse con ladrillos radica en el tiempo que se estima que se estará posicionado allí. Cuando se identifica que el mantenimiento será de cierta dificultad, se opta directamente por retirar los blancos.

La medición en el punto 3, posición de los monitores de la puerta del búnker, no es específicamente una posición utilizada por el TOE, sino una referencia para estimar el tiempo de permanencia en el búnker realizando tareas de mantenimiento.

Las posiciones para colocar o retirar los targets son las posiciones que más alta tasa de dosis presentan, lo que no significa que no puedan ocuparse estos sitios sino que el tiempo de permanencia debe ser mínimo.

No obstante, esta clasificación por colores es de referencia. Se debe considerar que los trabajadores no realizan tareas de mantenimiento durante toda su jornada laboral ni todos los días pero son indicadores para permitir estimar la dosis recibida al manipular cada pieza y considerar el tiempo de trabajo.

6.1.2. Monitoreo del personal

Parte A: Monitoreo por lectura diferida

La tabla 6.3 evidencia un incremento de la dosis Colectiva, tanto de las dosis efectivas como equivalentes en extremidades recibidas durante el período comprendido entre el 2018 y el 2021. Se puede observar que para el año 2022 no se sigue esta tendencia de aumento pero el valor de dosis de ese año es semejante al del 2021.

En cuanto a la actividad producida expresada en Ci, se puede observar que la tendencia es en incremento, a excepción del año 2020, donde este descenso fue causado por la baja en la producción a consecuencia de la pandemia del COVID-19, lo cual llevó a una reducción de las jornadas laborales así como también de los días de trabajo por semana.

Trabajador	2018		2019		2020		2021		2022	
	Efectiva	Extremidades	Efectiva	Extremidades	Efectiva	Extremidades	Efectiva	Extremidades	Efectiva	Extremidades
	[mSv]									
TOE 1	1,85	4,05	1,35	5,1	1,25	4,75	1,95	7	1,4	5,75
TOE 2	1	2,35	1,5	3,1	1,05	2,3	1,6	5,8	1,45	3,2
TOE 3	1,45	3,5	1,7	5,2	3,1	5,15	4,05	11,5	3,85	11,45
TOE 4	0,95	2,1	2,65	5,9	3,3	14,55	4,65	12,7	5,9	13,85
TOE 5	0	0	0	0	0	0	0	0	1,35	2,1
TOE 6	0,45	1,5	1,9	4,2	2,15	6,9	1,9	5,8	0	0
Dosis Colectiva [mSv. hombre]	5,7	13,5	9,1	23,5	10,85	33,65	14,15	42,8	13,95	36,35
Actividad anual [Ci]	1663,8		2040,366		1699,72		2461,87		2850,01	

Tabla 6.3. Dosis efectiva y equivalente en extremidades recibidas por los TOE durante el período 2018-2022.

Realizando una representación mediante líneas de los valores detallados en la tabla 6.3, se obtuvo el gráfico 6.2.

En el mismo, se observa que las dosis de los trabajadores 3, 4 y 6 poseen tendencia positiva. El trabajador 6 se desvinculó antes de finalizar el año 2021, es por esto que se observa la disminución de su dosis durante ese mismo año y llegando al valor de 0 en el año 2022. El caso inverso se puede observar para el caso del TOE 5, quien se incorporó en el año 2022 al servicio.

Vale aclarar que los TOE 3, 4 y 5 son los que mayor presencia tienen en los mantenimientos y tareas habituales sobre el equipo, incluida la manipulación de los targets. Para el caso del TOE 5, debido a su reciente incorporación y a encontrarse en período de entrenamiento, la dosis no alcanza los valores de los TOE 3 y 4.

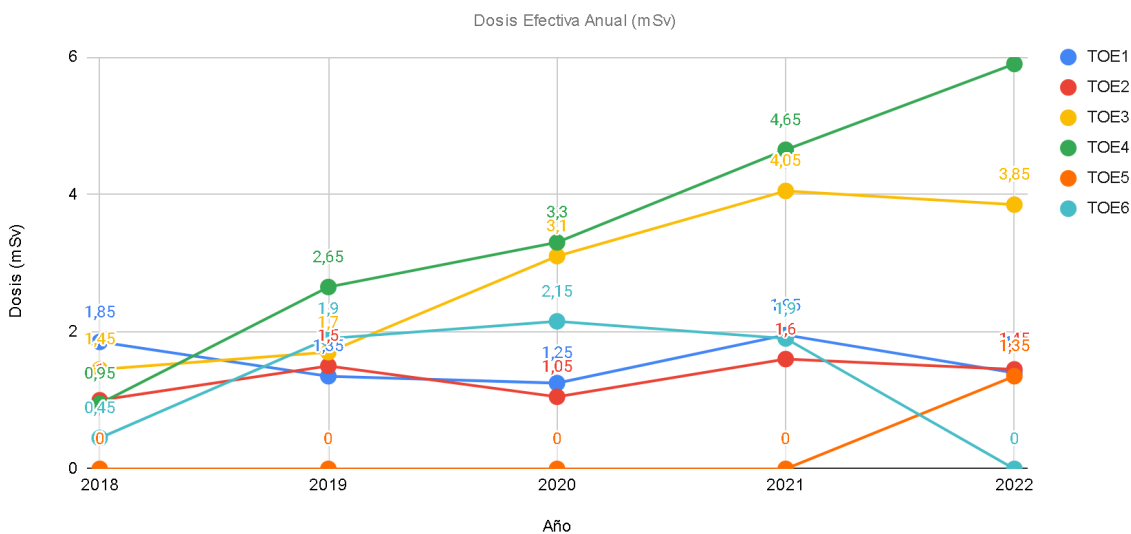


Gráfico 6.2

Por otro lado, se analizaron las dosis recibidas mensualmente por tecnología OSL durante todo un año de trabajo. Las tablas 6.4 y 6.5 presentan las dosis efectivas y dosis equivalente en extremidades, respectivamente, recibidas mensualmente durante el año 2022, para los trabajadores involucrados en tareas de operación y mantenimiento del equipo.

Los valores se presentan en unidades de mSv, siendo la última columna la dosis anual para cada trabajador. El TOE 6 se desvinculó el año 2021 por lo que no se presenta en estas tablas.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total [mSv]
Nombre	Dosis Efectiva [mSv]												
TOE1	0,20	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,30	0,15	0,00	0,25	0,15	0,20	1,40
TOE2	0,15	0,10	0,20	0,25	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,15	0,20	1,45
TOE3	0,10	0,45	0,20	0,00	0,30	0,15	0,35	0,15	0,10	1,15	0,70	0,20	3,85
TOE4	0,55	0,25	0,00	0,15	0,95	0,20	0,95	0,60	0,50	1,00	0,40	0,35	5,90
TOE5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,10	0,15	0,10	0,35	0,15	0,30	0,00	1,35

Tabla 6.4. Dosis efectiva mensual, año 2022. Unidades de [mSv].

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total [mSv]
Nombre	Dosis Equivalente en extremidades [mSv]												
TOE1	0,65	0	0,35	0,2	0,1	0	1,5	1,05	0,15	1,4	0,25	0,1	5,75
TOE2	0,7	0,2	0,2	0,3	0,1	0	0,7	0,1	0	0	0,4	0,5	3,20
TOE3	0,4	0,5	0,65	0	0,5	0,25	1	2,1	0,15	4,25	1,3	0,35	11,45
TOE4	1,3	0,4	0,2	0,35	2,2	0,25	2,25	1,4	1,75	2,3	0,55	0,9	13,85
TOE5	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	1	0,35	0,55	0	2,10

Tabla 6.5. Dosis: Dosis Equivalente en extremidades; Total: Total dosis Equivalente en Extremidades. Año 2022. Unidades de [mSv].

Para un mejor análisis de los datos se realizaron los gráficos 6.3 y 6.4, donde se representa mediante líneas los datos de las tablas 6.4 y 6.5, respectivamente. De esta manera, se pueden obtener curvas de las dosis mensuales recibidas, en función del mes, para cada trabajador durante todo el año 2022.

Tanto en las dosis efectivas como equivalentes en extremidades para cada trabajador, se observa que los valores varían durante todo el período anual, presentando un incremento en el segundo semestre del año.

En mayo, julio y octubre el TOE 4 presenta un pico de casi 1 mSv. Estos picos se observan también, aunque en menor magnitud, en los TOE 3 y TOE 5. De igual modo, comparando las gráficas 6.3 y 6.4 con la gráfica 6.2 para el período 2018 a 2022, se observa una tendencia similar a la antes

mencionada donde los trabajadores TOE 3 y TOE 4, son los que mayores dosis presentan; observándose en las gráficas analizadas que superan e incluso duplican el valor de dosis recibida comparados con el resto de los trabajadores en determinados meses.

Para el TOE 5 no se registra dosimetría por OSL de cuerpo entero hasta el mes de mayo y no contó con dosimetría de extremidades hasta el mes de junio, es por esto que se observa el valor de cero en los meses correspondientes a los períodos mencionados.

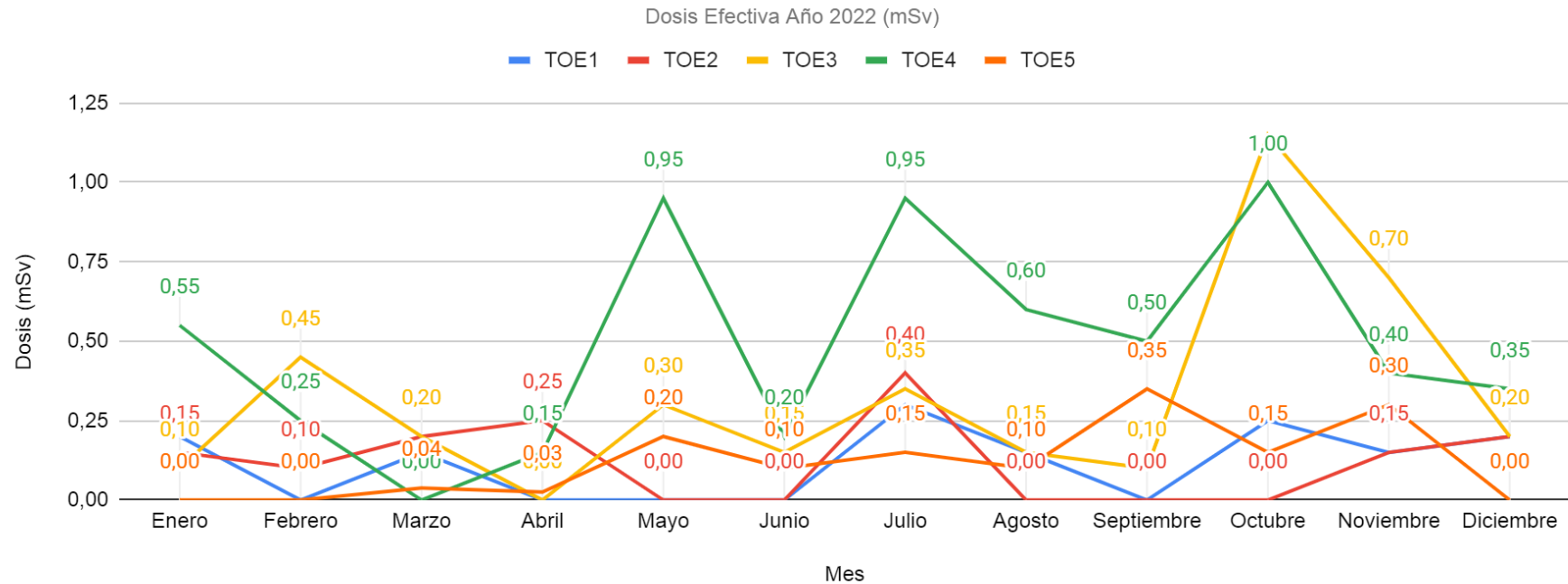


Gráfico 6.3

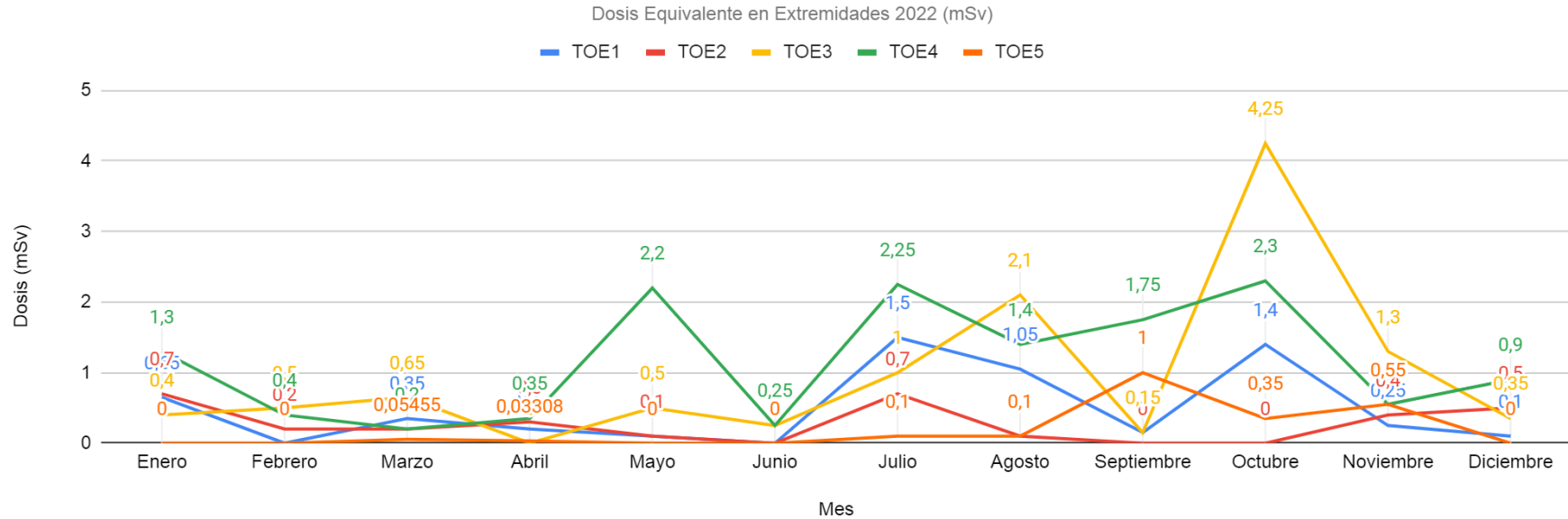


Gráfico 6.4

De manera de correlacionar los registros de dosis obtenidos por los TOEs con los mantenimientos tanto preventivos como correctivos al equipo, el relevo de las actas arrojó los siguientes resultados, presentados en la tabla 6.7

M	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
C	0	0	1	0	0	1	3	4	4	3	3	2
P	1	1	1	1	2	0	2	1	1	3	1	0
Total	1	1	2	1	2	1	5	5	5	6	4	2

Tabla 6.7. M: mantenimiento. C: mantenimiento correctivo. P: mantenimiento preventivo.

Con la salvedad de que el mantenimiento a los targets se considera mantenimiento preventivo siempre y cuando esta tarea se haya realizado debido a que se alcanzó su período de utilidad, y sabiendo que los mantenimientos preventivos al ciclotrón son 1 vez al mes, los meses con más de un mantenimiento preventivo son los meses donde además de mantenimientos preventivo al ciclotrón también se realizó el mantenimiento preventivo a los targets. A su vez, esto se corroboró por el libro de actas.

Este análisis permite adjudicar que los picos de casi 1 mSv del TOE 4 y en menor magnitud, de los TOE 3 y TOE 5, en los meses de mayo, julio y octubre pueden deberse a la manipulación de los targets por realizarse el mantenimiento preventivo a los mismos.

El gráfico 6.5 representa la dosis colectiva recibida por todos los TOE, tanto efectiva como equivalentes en extremidades, mientras que el gráfico 6.6 hace referencia a los mantenimientos realizados durante el año 2022.

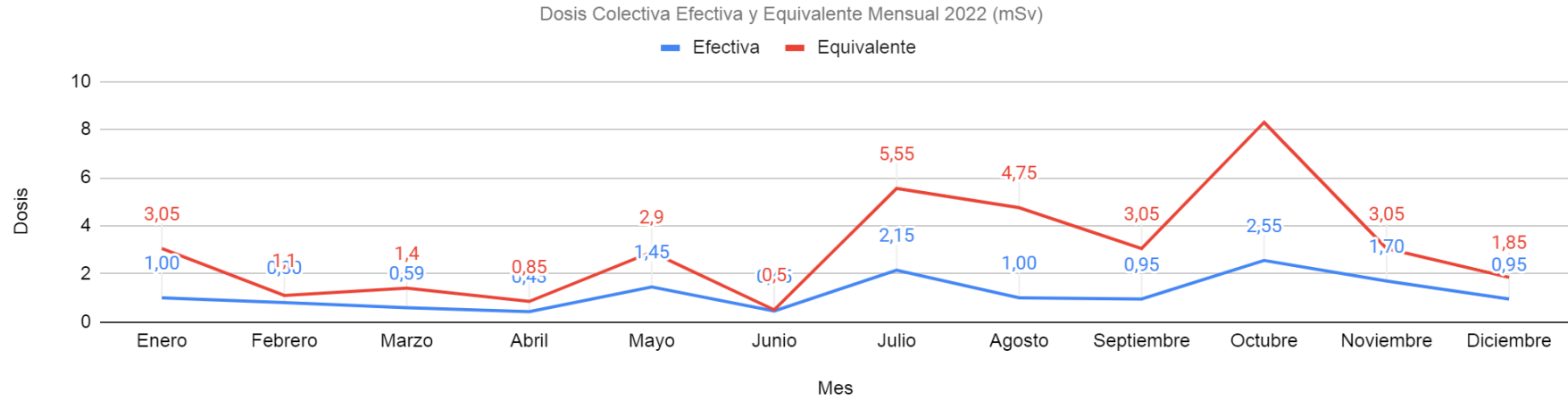


Gráfico 6.5

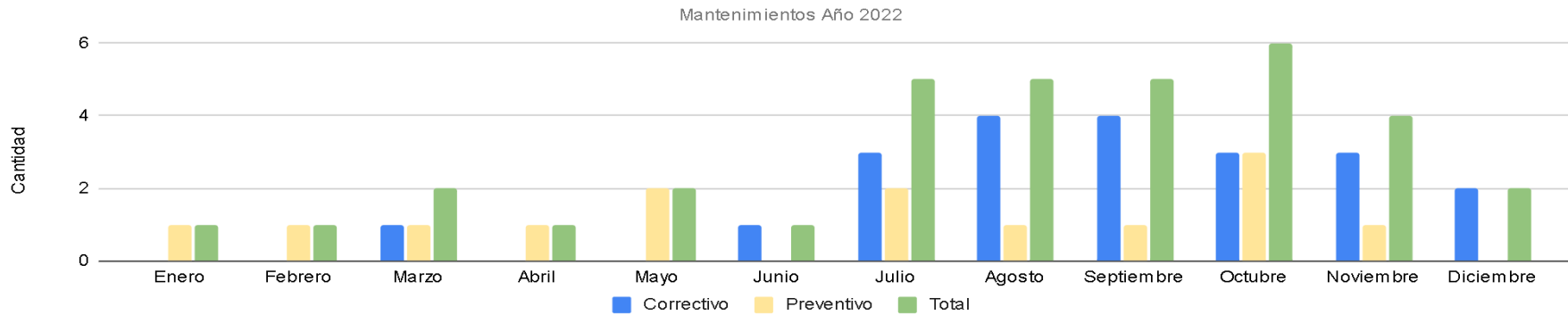


Gráfico 6.6

Al comparar ambas gráficas (6.5 y 6.6) se puede observar una correspondencia directa del aumento en las dosis colectivas recibidas con el aumento de los mantenimientos realizados durante un mismo mes, que a su vez, se corresponde con el aumento de las dosis individuales de los TOE al transcurrir el año.

El número de mantenimientos se vió incrementado durante el segundo semestre del año, tiempo en el que el equipo presentó mayores problemas de funcionamiento. Esto se ve reflejado en la gráfica 6.5 con un notable incremento en la dosis grupal comparando los valores antes y después del mes de junio.

Adicionalmente y como era de esperar, también se observan los picos en los meses de mayo, julio y octubre en las dosis grupales en correspondencia a las gráficas 6.3 y 6.4, coincidente con los meses donde además de los mantenimientos al ciclotrón se realizaron mantenimiento a los targets.

En los meses de junio y diciembre no se contabilizan mantenimientos preventivos dado que el equipo requirió mantenimientos correctivos, donde las tareas de mantenimiento preventivo quedaron incluídas dentro del procedimiento correctivo. Un ejemplo de esto fue en lugar de MP para engrasado del oring de la cámara de vacío, se realizó un MC donde se reemplazó el mismo, que a su vez luego de la colocación debió ser engrasado.

Parte B: Monitoreo por lectura directa en tareas de mantenimiento

Finalmente, se analizan los resultados de la planilla 5.2 (tabla completa en el anexo 2), referidos a la estimación de las dosis efectivas recibidas, promediadas y discriminadas por cada tarea realizada durante los mantenimientos preventivos mensuales y correctivos.

Los datos obtenidos permiten la realización del siguiente gráfico de barras, donde el eje de las abscisas representa el valor de la dosis efectiva colectiva [$mSv.hombre$] con respecto a cada tarea realizada. (Gráfico 6.7)

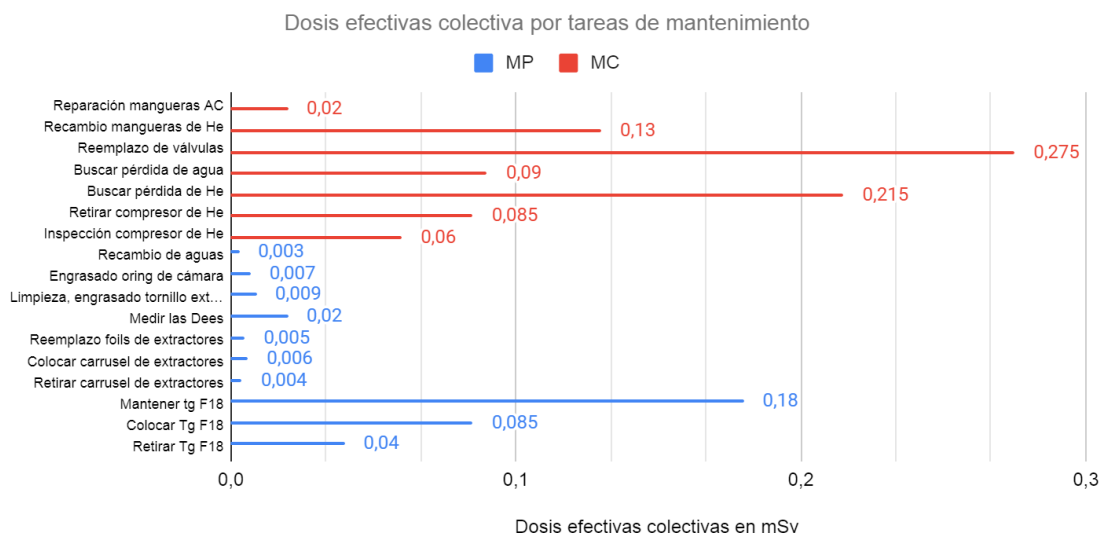


Gráfico 6.7 MP: Mantenimiento Preventivo. MC: Mantenimiento Correctivo

Se puede observar, que a excepción de las tareas que implican la manipulación de los targets, las dosis recibidas por tareas de mantenimientos correctivos son notablemente más elevadas que las dosis recibidas por tareas de mantenimientos preventivos.

Se evidencia que la dosis más alta recibida por una tarea correspondiente a mantenimiento preventivo (0,02 mSv), exceptuando la manipulación de los target, iguala la menor dosis recibida por una tarea de mantenimiento correctivo. Mientras que las dosis recibidas por cualquiera de las tareas de MC, superan por uno e incluso 2 órdenes de magnitud las dosis recibidas por tareas de MP.

Sin embargo, las dosis totales recibidas en los MP resultan aumentadas dado que la mayoría de las veces que se realizan mantenimientos se procede al retiro y colocación de los blancos.

Respecto a la dosis recibida por los mantenimientos preventivos a los targets, si bien se menciona en el capítulo 4 que esta tarea requiere ser realizada con una frecuencia aproximada de 3 a 4 meses por target. Debe considerarse que actualmente se cuenta con 3 targets en uso, lo que implica que la frecuencia en la manipulación por mantenimiento preventivo sea menor a este tiempo, aumentando principalmente las dosis en extremidades de los TOE que realizan la tarea.

Conclusiones

Las radiaciones ionizantes están presentes en distintos ámbitos de la vida cotidiana, algunos ejemplos pueden ser en la industria; para la generación de electricidad mediante centrales nucleares o la producción de materiales radiactivos en reactores nucleares; también se encuentran en el ámbito de la salud, a través del uso de radioisótopos producidos en un ciclotrón o reactor para el diagnóstico de enfermedades en pacientes o también para el tratamiento de enfermedades oncológicas como puede ser el uso de aceleradores lineales. Por lo tanto, las RI mejoran la calidad de vida y ayudan a la sociedad de diversas maneras. Estos beneficios deben ser contrastados con los riesgos que la generación de material radiactivo implica, tanto en los TOE, como en la población en general, medio ambiente y generaciones futuras.

El material radiactivo producido por un ciclotrón, se obtiene por el bombardeo de partículas cargadas sobre diferentes blancos. Este bombardeo, además de producir los radionucleidos de interés, genera elementos de activación en los componentes estructurales del equipo. La activación inducida de los componentes metálicos representa la principal fuente de exposición para quienes trabajan con este tipo de equipos realizando tareas de mantenimiento, siendo esta la causa principal que motivó el desarrollo y análisis del presente trabajo.

Los resultados obtenidos de las mediciones de las tasas de dosis de las distintas piezas activadas y residuos generados, dejan en manifiesto la importancia de depositarlos en lugares correctamente blindados o sitios radiológicamente seguros, así como también conocer el tiempo que es aconsejable su manipulación. También permiten inferir que, si las piezas o residuos no son correctamente blindados, aumentaría considerablemente la tasa de dosis dentro del búnker, haciendo que aumente notablemente la dosis recibida por los trabajadores durante las distintas tareas de mantenimiento que se requieran realizar.

Los resultados de las tasas de dosis de las áreas ocupadas durante los mantenimientos, permiten comprender el riesgo radiológico que existe al ocupar determinadas posiciones de trabajo. Conocer estos valores permite estimar el tiempo de permanencia que un operario puede estar realizando sus tareas dentro del búnker de modo de que no sean superados los niveles de restricción de dosis establecidos para la instalación. También, permite visualizar la importancia de la utilización de ciertos materiales empleados como blindajes para disminuir la dosis recibida.

Distintas posiciones de trabajo y tareas desarrolladas dentro del búnker, como las de colocar o retirar los targets, la distancia entre la puerta derecha con los targets colocados y blindado con ladrillos de plomo, o detrás de los motores flap, son las posiciones más relevantes desde el punto de vista de la dosis recibida por el trabajador, ya que en esos casos, la tasa de dosis es más alta. Estos valores no significan que un TOE no pueda posicionarse allí, sino que el tiempo de permanencia debe ser el mínimo necesario, estimándose previamente la dosis a recibir por los trabajadores dependiendo del tiempo de operación. Por este motivo, las tareas que implican estas ubicaciones para ser realizadas, deben ejecutarse con alto grado de conocimiento y práctica.

De acuerdo a los resultados obtenidos, las dosis de los TOE a lo largo de 5 años presentan una tendencia a aumentar en función del incremento de la actividad de Ci producida, mostrando una disminución, sólo, en el año 2020 producto de la pandemia del COVID-19. Durante los próximos años se podría suponer que el número de actividad producida se ajustará a una

constante dado que se trabaja con el equipo a su máxima capacidad de producción. El aumento anual de la dosis recibida observado para cada TOE a lo largo de los años, además del aumento en la producción de material radiactivo, también se debe a un mayor uso y en consecuencia desgaste del equipo, que sumado a la falta de repuestos, requiere una mayor frecuencia de mantenimientos, tanto correctivos como preventivos.

Al comparar las dosis recibidas del personal durante todo el año 2022 con el análisis de mantenimientos, puede observarse que las dosis recibidas por los TOE son mayores cuanto más mantenimientos son realizados, reafirmando el concepto de que a mayor tiempo de exposición a una fuente radiactiva, mayor es la dosis recibida por la persona expuesta.

Los picos observados en los TOE 3, 4 y 5, en las dosis equivalente en extremidades se asocia a la manipulación de los targets. En el mes de octubre, donde se observa el mayor pico de 4,25 mSv para el TOE 3 se realizaron 6 mantenimientos, de los cuales 3 de ellos corresponden al mantenimiento de targets, uno considerado preventivo y dos correctivos. La gráfica de “Dosis efectivas por tareas de mantenimiento”, permite diferenciar que los trabajadores reciben mayores dosis por las tareas de mantenimiento correctivo que preventivo. Este razonamiento permite concluir y constatar que la dosis del personal aumenta en mayor medida cuando se realizan tareas de mantenimiento correctivo respecto de los preventivos. Esto es debido a que la ejecución de las tareas preventivas son programadas y generalmente, las mismas se llevan a cabo luego de que hayan pasado dos días sin producción de material radiactivo. En contrapartida, los mantenimientos correctivos son efectuados, muchas veces, sin poder esperar este tiempo de dos días por requerimiento de producción de radiofármacos para su uso clínico, lo que genera que las piezas del propio equipo se encuentren más activas producto de ello.

Del análisis de las distintas gráficas mostradas a lo largo de este trabajo, se puede concluir que las tareas correctivas han sido más frecuentes a lo largo del año 2022 ya sea por un aumento en la producción de material radiactivo, y con esto mayor desgaste, y/o por un deterioro propio del equipo a medida de que se acerca a su vida útil.

De acuerdo a los resultados obtenidos por dosimetría EPD se puede concluir que diferenciando las tareas por mantenimiento preventivo o correctivo, las dosis más altas recibidas se deben a tareas que implican la manipulación de los targets y es por esto que las dosis recibidas de los mantenimientos preventivos resultan aumentadas. Sin embargo, exceptuando las tareas de manipulación de los targets, las dosis recibidas por tareas de mantenimiento preventivo serían significativamente menor que las dosis recibidas por tareas de mantenimiento correctivo. Estos resultados permiten reafirmar la conclusión que los trabajadores reciben mayores dosis al aumentar el número de mantenimientos realizados y además, que éstas dosis son mayores por tareas de mantenimiento correctivo que por tareas de mantenimiento preventivo.

Con el fin de no incrementarse las dosis recibidas por los TOE del ciclotrón se podrían analizar acciones de mejora que involucren una actualización con sustitución de piezas del equipo si fuera necesario y/o la incorporación de más trabajadores en los mantenimientos, a fin de dividir las tareas y en consecuencia disminuir las dosis individuales recibidas.

Las estimaciones realizadas en el presente trabajo, tanto en áreas como referente a piezas y residuos, permitirán la planificación y optimización de los trabajos de mantenimiento del ciclotrón, disminuyendo en la medida de lo posible, las dosis recibidas por los TOE.

Finalmente, como en todo trabajo que se realice, especialmente cuando existe un riesgo radiológico asociado al mismo, siempre se debe procurar por implementar el uso de las herramientas de protección radiológica y las buenas prácticas de seguridad en el trabajo, como puede ser el empleo de elementos de protección, respetar las normativas y las indicaciones de los oficiales de radioprotección, entre otras. Ante la inminencia de trabajar con fuentes radiactivas, para reducir la tasa de exposición a las mismas, se debe trabajar siempre con el objetivo de que la dosis recibida sea la más baja posible, esto se logra trabajando con conciencia radiológica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Página oficial Ministerio de salud Argentina. Consultada en diciembre de 2022. <<https://www.argentina.gob.ar/salud/ocupacional>>
- [2] Página oficial de la OMS. Consultada en diciembre de 2022. <<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/occupational-health--health-workers>>
- [3] Página oficial de la Autoridad Regulatoria Nuclear. Consultada en Nov. 2022 <<https://www.argentina.gob.ar/arn>>
- [4] Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo, Riesgos generales, Sección 4.8: Radiaciones ionizantes. Robert N. Cherry, Jr., Arthur C. Upton, Gordon M. Lodde, Sydney W. Porter, Jr. Publicado en el año 2012.
- [5] Centro Regional de Capacitación para América Latina y El Caribe - UCE - ARN. Consultada en septiembre de 2022.
- [6] Guía de radioprotección. Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN), Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la Cámara de Instituciones de Diagnóstico Médico (CADIME). Publicado el 1 de Noviembre de 2000.
- [7] Una mirada a la Interacción de la Radiación Electromagnética Ionizante con la Materia y aplicaciones. Carlos E. Chiossi. Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable. CNEA. Consultada: octubre de 2022. <https://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/extras/hojitas_conocimiento/2020/Chiossi_Interaccion_Rad_Ioniz_CIENCIA_41_331-332.pdf>
- [8] Curso de supervisores de instalaciones radiactivas. Módulo básico, CSN - CIEMAT, España. Consultada en septiembre de 2022. <<https://csn.ciemat.es/MDCSN/portal.do?TR=C&IDR=13>>
- [9] Norma Básica de Seguridad radiológica 10.1.1 Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN). Rev.4. Aprobada por Resolución del Directorio N° 521/19 (Boletín Oficial 19/11/19). Consultada en septiembre de 2022.
- [10] InLight® Systems Dosimeters. Especificaciones de producto. <<http://www.nuclearcontrol.com.ar/>>
- [11] Ley N° 24804, Ley Nacional de la Actividad Nuclear, Publicado el sábado 25 de abril de 2020. <<https://www.argentina.gob.ar/noticias/conmemoracion-de-la-ley-ndeg-24804-ley-nacional-de-la-actividad-nuclear>>
- [12] Ley Nacional de la Actividad Nuclear. Funciones - Criterio de Regulación. Fecha de sanción 02-04-1997. Publicada en el Boletín Nacional del 25-Abr-1997. <<https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/42924/texto>>
- [13] Página oficial de la IAEA. Consultada en enero 2023. <<https://www.iaea.org/es/temas/radiofarmacos-de-diagnostico>>

[14] Programa de Entrenamiento Asistido a Distancia para Profesionales de Medicina Nuclear. Publicación original de Stefan Erbel, Organismo Internacional de Energía Atómica. Viena, Austria. Traducción al Español: Margarita Núñez. Publicación original de Stefan Erbel, Organismo Internacional de Energía Atómica. Viena, Austria. Consultada en: septiembre 2022.

[15] Normas Regulatorias AR. AR 0.0.1. Rev. 2. Licenciamiento de instalaciones Clase I. Consultada en septiembre de 2022.

[16] Acta de registros de residuos radiactivos de la instalación.

ANEXO**Anexo 1. Mediciones de tasa de dosis ambiental H*(10) con monitor de área**

Fecha	Pieza/Zona Área	Residuo SI/NO	Tasa Dosis contacto (μ Sv/h)	Tasa Dosis 1m (μ Sv/h)	Observaciones
16/2/2021	Foil extracción	SI	OVL	350	
15/3/2021	Foil tg 5	SI	OVL	400	
31/3/2021	Línea transf tg-celda	SI	5		
7/7/2022	Manguera He	SI	2.76		Usada retirada ese día
7/7/2022	Acople He	NO	22.7		Usada retirada ese día
5/7/2022	Válvula Parker*	SI	245		Usada ese día con F18
7/7/2022	Válvula Parker*	SI	6		2 días después
7/7/2022	Bolsa virolas	SI	6.65		Usadas
4/7/2022	Roscas manguera He	SI	8.1		Medidas el día que se retiraron
4/7/2022	Virolas mangueras He	SI	8.34		Medidas el día que se retiraron
8/7/2022	Acople He	NO	22.7		Usado
8/7/2022	Bolsa roscas	SI	13		Usadas
25/8/2022	Parte tg F18	NO		4110	Color cobre sin oring. Sin irradiar desde 11/07/22
25/8/2022	Parte tg F18	NO		1730	Color aluminio lado foil. S/irradiar desde 11/07/22
25/8/2022	Parte tg F18	NO		282	Color aluminio. S/irradiar desde 11/07/22
25/8/2022	Nariz tg F18	NO		11000	
29/8/2022	Recipiente de switch-cerámicas	SI	1.1		Se encuentra detrás de pantalla
29/8/2022	Recipiente paper burn	SI	14	0.5	Se encuentra detrás de pantalla
29/8/2022	Bolsa guantes	SI	40		Usados
29/8/2022	Bolsa mangueras He	SI	65		Área técnica de celdas. Usadas
29/8/2022	Manguera AC	SI	5		Almacenada el 15/09/2021

29/8/2022	Filtro de línea	SI	1.36	0.1	Almacenada el 28/3/2022
29/8/2022	Brazo aluminio	SI	0.46	-	Almacenado el 22/04/2021
29/8/2022	Switch probe	SI	1.95	0.1	Almacenado el 22/04/2021
29/8/2022	Baffles	SI	250	0.22	Almacenado el 19/04/2021
3/10/2022	Carrusel extractores	NO		417	Con foil usados puestos. Sin irradiar desde 11/07/22
27/10/2022	Tg F18 mantenido	NO	1720		
27/10/2022	Manguera He	SI	84		3 días de irradiación. Usada
23/01/2023	Tg de paper burn	NO	7520		

Tabla 5.1 Planilla: mediciones tasa de dosis de piezas. Referencia: OVL medición superior al rango del detector.

Anexo 2. Mediciones de dosis personal con monitor EPD

Fecha	M	TOE's	Tarea	Dosis Colectiva ($\mu\text{Sv.hombre}$) $\Sigma H_p 10$	Observaciones
25/8/2022	P	1	Mantenimiento de blanco de C11	210,72	
3/10/2022	P	1	Retirar tg F18	39	Dosímetro en el pecho y con el otro Tg de F18 y C11 aún colocados
3/10/2022	P	1	Retirar tg C11	4	Dosímetro en la cintura y con el de F18 activo ya afuera
3/10/2022	P	1	Retirar tg F18 s/uso	3	Dosímetro en el pecho
3/10/2022	P	1	Sacar 1 extractor (carrusel de foils)	2	Dosímetro en el pecho/sin blancos
3/10/2022	P	1	Colocar extractor (carrusel de foils)	3	Dosímetro en el pecho/sin blancos
3/10/2022	P	1	Sacar 1 extractor (carrusel de foils)	6	Dosímetro en el pecho/con blancos
3/10/2022	P	1	Reemplazo de 4 foil carrusel de extracción	5	Dosímetro en el pecho detrás de la pantalla de fraccionamiento
3/10/2022	P	1	Tomar medidas de distancia de las D	20	Dosímetro en el pecho/ sin blancos
3/10/2022	P	1	Limpieza y engrasado de tornillo de brazo de extractor	9	Dosímetro en el pecho/ sin blancos
3/10/2022	P	1	Cambio de oring y colocación de tg F18 sin uso	35	Dosímetro en el pecho sin tg colocados
3/10/2022	P	1	Colocación de Tg F18 en uso	85	Dosímetro en el pecho con tg de C11 y F18 ya colocados
3/10/2022	P	1	Colocar tg C11	23	Dosímetro en el pecho y tg de flúor c/actividad fuera
3/10/2022	C	1	Buscar pérdida de He	213	Dosímetro en el pecho y c/ tg puestos

3/10/2022	P	1	Colocar grasa al oring de la cámara	7	Dosímetro en el pecho y sin los tg ni extractores puestos
3/10/2022	P	1	Reemplazo de 1 frasco de agua	1	
3/10/2022	P	5		455	Dosis de 5 TOE realizando distintas tareas
3/10/2022	C	1	Reemplazo válv. BEV	874.64	
14/10/2022	C	3	Solucionar pérdida de He	144.22	Dosis de 3 TOE realizando distintas tareas (colocación de tapón en He, sacar bomba He, dosímetros en el pecho c/blancos colocados y cámara de vacío cerrada)
19/10/2022	C	1	Sacar la bomba de He con tg puestos	84.44	Dosímetro en el pecho 4 días sin irradiar
21/10/2022	P	1	Sacar tg de F18, mantener y colocar	180.45	Dosímetro en el pecho 4 días de irradiación
21/10/2022	P	1	Sacar tg de F18, mantener y colocar	116.38	Dosímetro en el pecho 4 días de irradiación
21/10/2022		2		296,83	(2 TOE realizaron la tarea)
22/10/2022	C	2	Mantenimiento de tg de F18	247.5	(2 TOE realizaron la tarea)
24/10/2022		1	Recambio de 3 viales de agua	2	Dosímetro en el pecho 2 días s/irradiar, c/ tg
27/10/2022	C	1	Inspección compresor de He	58.58	
27/10/2022	C	1	Buscar pérdida de agua	88	
27/10/2022		1	Colocación de tg F18	50	
15/11/2022		1	Retirar tg F18	41	sin extractores ni tg carbono
15/11/2022	C	1	Correctivo cambio motor flap	64.02	
15/11/2022	C	1	Correctivo cambio motor flap	87.05	
15/11/2022	C	1	Correctivo cambio motor flap	70.95	
15/11/2022		3	Total	222.01	(3 TOE realizaron la tarea)
7/12/2022	P	1	Mantenimiento BEV	276,38	
7/12/2022	P	1	Recambio mangueras de He	75,45	
7/12/2022	P	1	Recambio mangueras de He	178,57	
7/12/2022		3		530,4	Dosis de 3 TOE realizando distintas tareas
16/1/2023	C	1	Reparacion manguera AC vacío	17	izquierda abierta, derecha cerrada tg colocados 2 días s/ irradiar + 3 ladrillos
34 días		no corres ponde	Registro dosis en consola 34 días	65,80	Medición de consola incluido fin de semanas

Tabla 5.2. Planilla: mediciones de dosis. M: mantenimiento. P: preventivo. C: Correctivo. G: grupal. I: individual.