

Pontificia Universidad Javeriana



Facultad de Ciencias

Maestría en física Médica

Análisis probabilístico de seguridad para el irradiador de ^{60}Co , para calibración de equipos detectores a nivel de terapia, a ser instalado en el Laboratorio Secundario de Calibración

Dosimétrica del Servicio Geológico Colombiano

Presentado por:

JUAN GUILLERMO RAMÍREZ GONZÁLEZ

Tutor del trabajo de grado:

JOSE ESAÚ GARAVITO

Cotutor del trabajo:

MARIA ESPERANZA CASTELLANOS

Bogotá D. C., Colombia

2020

NOTA DE ADVERTENCIA

“La universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Sólo velará porque no se publique nada contrario al dogma y a la moral católica y porque las tesis no contengan ataques personales contra persona alguna, antes bien se vean en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia.”

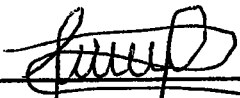
Artículo 23, Resolución N° 13 del 6 de julio de 1946, por la cual se reglamenta lo concerniente a Tesis y Exámenes de Grado en la Pontificia Universidad Javeriana.

Análisis probabilístico de seguridad para el irradiador de ^{60}Co , para calibración de equipos detectores a nivel de terapia, a ser instalado en el Laboratorio Secundario de Calibración

Dosimétrica del Servicio Geológico Colombiano

JUAN GUILLERMO RAMÍREZ GONZÁLEZ

APROBADO



MSc. José Esaú Garavito
Tutor

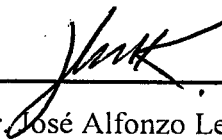


Dra. María Esperanza Castellanos
Cotutora



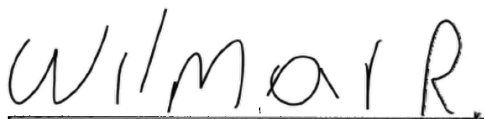
Dr. Jorge Anselmo Puerta

Jurado 1



Dr. José Alfonzo Leyva

Jurado 2



Dr. Wilmar Rodríguez


Jurado 3




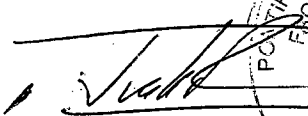
Análisis probabilístico de seguridad para el irradiador de ^{60}Co , para calibración de equipos detectores a nivel de terapia, a ser instalado en el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica del Servicio Geológico Colombiano

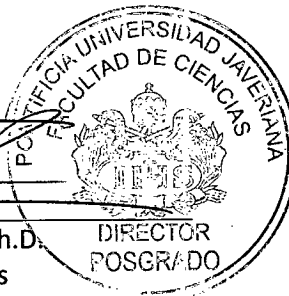
JUAN GUILLERMO RAMIREZ GONZALEZ

APROBADO


CONCEPCION PUERTA Ph.D.
Decana
Facultad de Ciencias




ALBA TRESPALACIOS Ph.D.
Directora de Posgrados
Facultad de Ciencias



DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi amada esposa que con su paciencia, entusiasmo y compromiso ha hecho posible los mayores logros de mi vida personal y profesional, gracias por llenar mi vida de razones para ser feliz y por darme los regalos más grandes en mi vida, tu tiempo y nuestras hijas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Dirección Técnica de Asuntos Nucleares del Servicio Geológico Colombiano y en especial al grupo de trabajo del Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica, por el apoyo y respaldo técnico en la realización de este trabajo, así como por su amable disposición para compartir la información de su quehacer.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Objetivo general	15
1.2. Objetivos específicos	15
1. MARCO TEÓRICO	16
1.1. La radiación ionizante y sus efectos en seres humanos.	16
1.2. Peligrosidad de las fuentes selladas	17
1.3. Protección radiológica.....	18
1.4. Análisis probabilístico de seguridad.	20
1.5. Contexto nacional.	21
2. METODOLOGÍA.....	23
2.1. Fase 1 - Exposiciones normales	24
2.2. Fase 2 - Exposiciones potenciales.....	25
2.3. Fase 3 - Análisis probabilístico de Seguridad (APS).....	27
3. RESULTADOS	33
3.1. EXPOSICIONES NORMALES	33
3.1.1. Escenarios de exposición normal.....	33
3.2. Magnitud de las exposiciones normales.....	36

3.2.	EXPOSICIONES POTENCIALES	38
3.2.1.	Escenarios de exposición potencial.....	38
3.2.2.	Magnitud de las exposiciones potenciales	43
3.3.	ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE SEGURIDAD (APS)	46
3.3.1.	Disposiciones de protección y seguridad	47
3.3.2.	Eventos.....	48
3.3.3.	Secuencias accidentales	53
3.3.4.	Estimación del riesgo y criterio de aceptabilidad	57
3.3.5.	Análisis de importancia Fussel Vesely	58
3.3.6.	Medida de incremento del riesgo RAW.....	59
3.3.7.	Medida de reducción de riesgo	60
3.3.8.	Criticidad de los componentes.	60
	CONCLUSIONES.....	62
	REFERENCIAS	64
	ANEXOS	66
	Anexo 1. Árbol de fallas.....	66

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Categorización de fuentes selladas	18
Tabla 2. Valores de dosis letales.....	26
Tabla 3. Límites de dosis	33
Tabla 4. Escenarios de exposición normal para los TOE.....	35
Tabla 5. Escenarios de exposición potencial y variables de interés	44
Tabla 6. Escenarios de exposición potencial y variables de interés	45
Tabla 7. Disposiciones de protección y seguridad del LSCD-SGC	47
Tabla 8. Eventos externos.....	49
Tabla 9. Eventos base y su probabilidad de fallo	51
Tabla 10. Secuencias accidentales a partir de los caminos mínimos.....	53
Tabla 11. Complejidad de las secuencias accidentales.....	54
Tabla 12. Frecuencia de las secuencias accidentales.....	55
Tabla 13. Estimación del riesgo.....	57

INDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Notación de los árboles de fallas.....	27
Ilustración 2. Esquema de Árbol de fallas	28
Ilustración 3. Árbol de fallas con identificación de camino mínimo	29
Ilustración 4. Dependencias del LSCD-SGC.....	35

RESUMEN

Se aplicó la metodología Análisis Probabilístico de Seguridad para la cuantificación del riesgo radiológico asociado a la operación del irradiador del fabricante Hopewell Designs modelo G-100 en el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica del Servicio Geológico Colombiano. El irradiador cuenta con una fuente radiactiva de ^{60}Co con actividad nominal de 185 TBq considerada como una fuente extremadamente peligrosa para las personas según el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA, 2009, p.32). El análisis contempló la identificación de los sucesos iniciadores mediante la metodología de diagramas lógicos maestros, la determinación de las secuencias accidentales y su frecuencia mediante arboles de fallo y la estimación de la magnitud de la consecuencia de cada secuencia accidental en función de la probabilidad de causar la muerte de un individuo asociada al escenario de exposición planteado. El riesgo cuantificado de muerte inducida por radiación fue de $1,6 \times 10^{-5}$ por año, cuyo valor es inferior a la restricción establecida en $1,44 \times 10^{-4}$ por año. Finalmente, se encontró que las disposiciones de protección y seguridad más críticas son las relacionadas con la capacitación acerca del significado de las señales de advertencia del inicio de las secuencias de último hombre afuera (LMO por su sigla en inglés) y de inicio de irradiación, seguidas por las señales de advertencia de las secuencias mencionadas.

INTRODUCCIÓN

El Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica del Servicio Geológico Colombiano (LSCD-SGC) fue creado en 1985 para servir como referente a nivel nacional en metrología para las radiaciones ionizantes. El LSCD-SGC es miembro de la red de laboratorios secundarios del Organismo Internacional de Energía Atómica y de la Organización Mundial de la Salud. La función primordial del LSCD-SGC es servir de enlace entre los laboratorios primarios de calibración dosimétrica y los usuarios de equipos medidores de radiaciones ionizantes en el país; mediante la prestación de servicios de calibración dirigidos a garantizar que las mediciones obtenidas sean consistentes con el Sistema Internacional de Medidas.

Actualmente, en el país no se presta el servicio de calibración para cámaras de ionización utilizadas en dosimetría de haces de radioterapia externa. Esta necesidad será cubierta con la puesta en operación en el transcurso del 2020 de un irradiador modelo G-100 del fabricante Hopewell Designs. Este irradiador alberga una fuente radiactiva de ^{60}Co con actividad de 185 TBq categorizada como una fuente **extremadamente peligrosa para las personas**, «si no es manejada en condiciones de seguridad tecnológica o no se protege con seguridad desde el punto de vista físico, probablemente causaría lesiones permanentes a la persona que la manipulase o que estuviese en contacto con ella durante más de unos pocos minutos» (OIEA, 2009, p.32).

El gobierno nacional por medio del Ministerio de Minas y Energía ha emitido normativa en la que adoptan reglamentos técnicos y procedimientos con el fin de establecer requisitos a las personas jurídicas o naturales que usen materiales radiactivos, para que estos

sean empleados de forma segura, garantizando así la protección de los individuos, de sus descendientes y de la población en su conjunto. Entre éstos se destacan la Resolución 181434 de 2002 «por la cual se adopta el Reglamento de Protección y Seguridad Radiológica» y la Resolución 9 0874 de 2014 «Por medio de la cual se establecen los requisitos y procedimientos para la expedición de autorizaciones para el empleo de fuentes radiactivas y de las inspecciones de las instalaciones radiactivas».

La Resolución 9 0874 de 2014, establece por primera vez como requisito para la obtención de la autorización de empleo de materiales radiactivos la realización de una evaluación de seguridad, que consiste en el análisis de la eficacia de las disposiciones de materia de protección y seguridad radiológica para lograr el cumplimiento de los objetivos de la protección radiológica, lo que ha representado un desafío para las personas naturales o jurídicas interesadas en el uso de materiales radiactivos.

En la actualidad la mayoría de los solicitantes de autorización han empleado métodos cualitativos o semicuantitativos para realizar las evaluaciones de seguridad de sus instalaciones. En este trabajo se realiza una aproximación cuantitativa, mediante la metodología de Análisis Probabilístico de Seguridad, inicialmente utilizada para la evaluación del riesgo en reactores nucleares y posteriormente aplicado por diferentes sectores como el aeronáutico y petroquímico (González, M. 2010).

El análisis de la seguridad «consiste en un conjunto de distintos análisis cuantitativos a fin de evaluar y valorar los desafíos para la seguridad en diversos estados operacionales, incidentes operacionales previstos y condiciones de accidente, mediante métodos deterministas y también probabilistas» (OIEA, 2009, p.13). En consecuencia, en el presente trabajo se presenta la identificación de los escenarios de exposición normal y la estimación de su magnitud en términos de dosis equivalente con el fin de prever que, bajo condiciones normales de funcionamiento del irradiador Hopewell Designs modelo G-100 en el LSCD-SGC, se restringen las dosis a valores inferiores a los límites legales. Adicionalmente, se analizan las exposiciones potenciales, postulando posibles escenarios no planificados de exposición teniendo en cuenta las características del equipo, de las instalaciones en donde será operado y las condiciones de operación, tras lo cual se analizan las secuencias de eventos que deben ocurrir para que tengan lugar. Finalizando con una evaluación de las disposiciones en materia de protección y seguridad radiológica que permite establecer si son suficientes para contar con un balance apropiado entre la frecuencia de ocurrencia de los escenarios de exposición y las consecuencias que pueden ocasionar.

El presente trabajo se limita al riesgo de irradiación externa, esto quiere decir que los escenarios postulados suponen que el material radiactivo se mantiene en el interior de la cápsula que lo contiene, los valores usados de probabilidad de fallo y consecuencias corresponden a los valores máximos y no se realiza un análisis de incertidumbres.

OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Cuantificar el riesgo radiológico en términos e probabilidad de exposición letal debido a la operación del irradiador Hopewell Designs modelo G-100 en el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica del Servicio Geológico Colombiano (en adelante LSCD-SGC) y compararlo con el criterio de aceptabilidad.

1.2. Objetivos específicos

- Comparar la magnitud de las exposiciones previstas por la operación del irradiador Hopewell Designs modelo G-100, en condiciones normales de funcionamiento del LSCD-SGC, con los requisitos de restricción de dosis establecidos en la normativa.
- Estimar la contribución al riesgo radiológico de los escenarios de exposición potencial, debido a la operación del irradiador Hopewell Desings modelo G-100 en el LSCD-SGC.
- Analizar las vulnerabilidades del Sistema de Protección y Seguridad Radiológica del LSCD-SGC.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. La radiación ionizante y sus efectos en seres humanos.

La radiación ionizante es energía emitida desde una fuente en forma de radiación electromagnética o energía cinética de partículas con la capacidad de ionizar la materia con la que interactúa. Las fuentes de este tipo de radiación pueden ser equipos emisores de rayos X, materiales radiactivos, aceleradores de partículas, reactores nucleares y rayos cósmicos.

Los materiales radiactivos emiten radiación de forma espontánea debido a la ocurrencia de desintegraciones o decaimientos nucleares; las formas más comunes de la radiación emitida por los materiales radiactivos son: partículas alfa, beta y fotones.

La radiación ionizante tiene la capacidad de modificar la estructura electrónica de los átomos y así romper enlaces químicos en la materia por lo que puede afectar el funcionamiento de los sistemas biológicos, causando entre otros efectos modificaciones en las cadenas de ADN a nivel celular que llevan a su muerte o mutación, es así como las personas expuestas a radiación tienen un riesgo de daño biológico.

El daño biológico de un individuo debido a una exposición a radiación ionizante depende de la cantidad, energía y tipo de radiación a la cual se es sometido y se caracteriza mediante la magnitud denominada dosis equivalente, que es la cantidad de energía por unidad de masa depositada por la radiación incidente (dosis absorbida), multiplicada por un factor de ponderación relacionado con la capacidad del tipo de radiación de ceder energía en el medio por unidad de longitud.

Dependiendo de la dosis absorbida en un órgano se pueden provocar dos tipos de efectos:

- **Efectos determinísticos** que son aquellos producidos por dosis superiores a un umbral, para el cual la muerte celular por la radiación supera la capacidad del órgano para recuperarse. La gravedad de los efectos determinísticos aumenta con las dosis.
- **Efectos estocásticos** que son debidos a modificaciones en el ADN de la célula que resultan ser viables, causando un crecimiento de células modificadas en la persona afectada, es decir, efectos cancerígenos; la gravedad de estos efectos es independiente de la dosis, sin embargo, la probabilidad de ocurrencia es directamente proporcional. (ICRP, 2007, p.45)

1.2. Peligrosidad de las fuentes selladas

El Organismo Internacional de Energía Atómica ha implementado un sistema de categorización de fuentes radiactivas selladas (OIEA, 2009, p.32), en el cual se establecen 5 categorías en función de su potencial de causar daño a los seres humanos, con base en la relación $\frac{A}{D}$. «El valor D es la actividad específica de los radionucleidos de una fuente que, de no hallarse bajo control, podría causar graves efectos deterministas en diversas circunstancias hipotéticas, entre ellas la exposición externa procedente de una fuente no blindada y la exposición interna a raíz de la dispersión del material de la fuente» (OIEA, 2009, p.5) y A es la actividad de la fuente, que se define como el número de desintegraciones por unidad de tiempo en una muestra y su unidad en sistema internacional es el Bq que equivale a 1 desintegración por segundo. Las diferentes categorías se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Categorización de fuentes selladas

Categoría	Descripción	$\frac{A}{D}$
1	Extremadamente peligrosa	Mayor o igual a 1000
2	Muy peligrosa	Mayor o igual que 10 y menor que 1000
3	Peligrosa	Mayor o igual que 1 y menor que 10
4	Improbable que sea peligrosa	Mayor o igual que 0.01 y menor que 1
5	Sumamente improbable que sea peligrosa	Mayor o igual que el nivel de exención pero menor que 0.01

Para el caso de ^{60}Co el valor de D es 0.03 TBq por lo que el valor $\frac{A}{D}$ de la fuente radiactiva considerada en el presente trabajo es $\frac{185 \text{ TBq}}{0.03 \text{ TBq}} = 6167$ y por ende es una fuente categoría 1.

1.3. Protección radiológica

El empleo de radiaciones ionizantes trae beneficios en las áreas de la industria, la medicina, la investigación y la educación; su uso es recomendado siempre y cuando se tomen medidas para el manejo del riesgo radiológico. El conjunto de estas medidas se denomina protección radiológica. Los objetivos de la protección radiológica son evitar la ocurrencia de efectos determinísticos y disminuir la probabilidad de ocurrencia de los efectos estocásticos. Los

objetivos de la protección radiológica se alcanzan con la aplicación de tres principios básicos: justificación, limitación de dosis y optimización, definidos en las recomendaciones de ICRP:

Principio de justificación: Cualquier decisión que altera la situación de exposición a la radiación debería ocasionar más beneficio que daño.

Principio de optimización de la protección: La probabilidad de una exposición, el número de personas expuestas y la magnitud de sus dosis individuales deberían ser mantenidas tan bajas como sea razonablemente alcanzable, teniendo en cuenta los factores económicos y sociales.

Principio de limitación de la dosis: La dosis total a todo individuo debida a fuentes controladas en situaciones de exposición planificada, sin tener en cuenta la exposición médica a los pacientes, no debería exceder los límites apropiados especificados por la Comisión (ICRP, 2007, p.13).

En condiciones normales de operación se logra evitar la ocurrencia de efectos determinísticos con la sola aplicación de los límites de dosis. Sin embargo, al considerar la probabilidad de ocurrencia de una exposición no planificada, es necesario aplicar el principio de optimización, lo que pone en consideración el significado de “razonablemente alcanzable”. La probabilidad de ocurrencia de una exposición no planificada debe ser limitada en función de la magnitud de la exposición, esto es, entre mayor sea la magnitud de la exposición menor debe ser la probabilidad que se considera aceptable. Lo anterior, es logrado mediante la restricción del riesgo radiológico R , definido como el producto entre la probabilidad de que ocurra una exposición P_e y la probabilidad de que una exposición cause un daño biológico P_d (ICRP, 1997, p. 3).

$$R = P_e \cdot P_d \quad (1)$$

La restricción del riesgo es la base del análisis probabilístico de seguridad y la definición usada del riesgo depende de los posibles escenarios de exposición considerados. Por ejemplo, en el caso de un reactor nuclear se puede analizar desde el punto de vista del peligro que puede causar la dispersión de material radiactivo y el riesgo puede definirse en términos de muertes por año.

1.4. Análisis Probabilístico de Seguridad (APS).

La metodología de Análisis Probabilístico de Seguridad (APS) fue desarrollada, por exigencia del congreso de los Estados Unidos de América, para determinar la probabilidad de un accidente con consecuencias en la población durante la vida útil de sus reactores nucleares. El proyecto que dio origen a la metodología fue denominado WASH-1400 y su informe final fue publicado en 1975.

La metodología ha mostrado desde su desarrollo su utilidad para la identificación de vulnerabilidades del diseño de una central (González, M. 2010). Una vez sentadas las bases para el desarrollo de la APS, se ha extendido su uso en otros campos como la industria petroquímica, aeronáutica e instalaciones que emplean materiales radiactivos de alta peligrosidad. El desarrollo de un APS está constituido básicamente por las siguientes etapas:

- La identificación de sucesos iniciadores.
- Modelado de las secuencias accidentales.
- Análisis de sistemas
- Cuantificación de secuencias accidentales.

El APS se encuentra basado en la definición del riesgo de una secuencia accidental como el producto de su probabilidad de ocurrencia y su consecuencia, el riesgo total es la suma de los riesgos de las posibles secuencias accidentales.

$$R = f \cdot C \quad (2)$$

1.5. Contexto nacional.

Desde el año 2014 la normativa colombiana exige a los explotadores de materiales radiactivos, para la obtención de autorización, la realización de evaluaciones de seguridad en las que se determine:

- La forma en que podrían producirse exposiciones normales y potenciales.
- La magnitud de las exposiciones normales y potenciales.
- La calidad y amplitud de las disposiciones en materia de protección radiológica.

En la actualidad la metodología más usada para el desarrollo de evaluaciones de seguridad en Colombia es el método de matriz de riesgo descrito en el TECDOC 1685 (IAEA,2012), que corresponde a un método semicuantitativo, en la que se determina el riesgo en categorías discretas como producto de la combinación de diferentes categorías de frecuencia y probabilidad de fallo de las barreras que evitan la ocurrencia de los sucesos iniciadores.

Sin embargo, los objetivos 2 y 3 de la evaluación de seguridad puede ser logrados empleando la metodología de APS.

La ventaja de utilizar la metodología de APS es que permite realizar análisis de importancia de cada una de las disposiciones en materia de protección y seguridad, permitiendo identificar las vulnerabilidades de los sistemas. Adicionalmente, permite

predecir de forma rápida la sensibilidad del riesgo a variaciones de diseño o al mejoramiento de componentes ayudando a que los esfuerzos realizados para la reducción del riesgo sean más eficientes.

Adicionalmente, el APS considera un riesgo general del sistema permitiendo realizar un análisis global y observar de una manera rápida y confiable cuales son los peligros más representativos, facilitando enfocar los esfuerzos en los escenarios de exposición más representativos.

2. METODOLOGÍA

El presente trabajo, titulado «Análisis Probabilístico de Seguridad para el irradiador de ^{60}Co , para calibración de equipos detectores a nivel de terapia, a ser instalado en el Laboratorio Secundario de Calibración Dosimétrica del Servicio Geológico Colombiano», corresponde a una investigación evaluativa de las disposiciones de protección y seguridad de la instalación en términos del riesgo radiológico. La evaluación del riesgo fue concebida como una intervención previa con el fin de realizar un análisis de dichas disposiciones y verificar si se requiere un análisis de seguridad más riguroso.

Para el desarrollo del trabajo fue necesario recopilar información referente al diseño de la instalación, diseño del equipo, blindajes, situaciones operativas, disposiciones de protección y seguridad (leídas como enclavamientos, alarmas, procedimientos y demás medidas del programa de protección radiológica y seguridad física de la instalación), tiempos de operación. Esta información fue obtenida mediante: consulta de los documentos vigentes «Memoria descriptiva de la instalación» y «Manual de protección radiológica», consulta del manual del usuario del equipo irradiador suministrado por el fabricante, visitas guiadas a la instalación y entrevistas con el responsable de la instalación y personal operativo.

Para cumplir los objetivos propuestos de este trabajo, se abordó el problema de investigación en tres fases:

1. Exposiciones normales: postulación de los escenarios de exposición bajo condiciones normales de funcionamiento, estimación de la magnitud de las exposiciones en términos de dosis equivalente y verificación de la restricción de dosis.

2. Exposiciones potenciales: postulación de los escenarios de exposición potencial y estimación de la magnitud de las exposiciones en términos de la variable consecuencia equivalente a la probabilidad de muerte por la dosis sufrida.
3. Análisis Probabilístico de Seguridad: identificación de los sucesos iniciadores, determinación de las secuencias accidentales, valoración del riesgo y análisis.

2.1. Fase 1 - Exposiciones normales

Los escenarios de exposición normal fueron postulados a partir de las situaciones operativas inherentes a la práctica. Una vez identificados los escenarios, debidos a situaciones de exposición normal, se procedió a determinar su magnitud mediante la ecuación 3.

$$H = \frac{r \cdot t \cdot F}{d^2} \quad (3)$$

Donde:

H es la dosis equivalente en el punto en donde se encuentra ubicada la persona de interés (mSv)

r es la tasa de dosis a un metro de la fuente sin la acción de los blindajes (mSv/h·m²)

d es la distancia entre la fuente y la persona de interés (m)

t es el tiempo que la persona se encuentra sometida al escenario durante el año (h)

F es el factor de transmisión del blindaje interpuesto

Se verificó que se restringen las dosis en condiciones normales de operación a los límites de dosis previstos en la normativa, para lo cual se validó que la sumatoria de la

magnitud de las exposiciones normales debidas a todos los escenarios postulados fuera inferior a los límites.

2.2. Fase 2 - Exposiciones potenciales

Se postularon los posibles escenarios de exposición potencial según el lugar en donde se encuentra la persona que podría estar expuesta. Posteriormente, de forma deductiva, partiendo de los escenarios postulados, se identificaron los eventos que deben ocurrir para que se presente el escenario. Dichos eventos se conocen como sucesos iniciadores (OIEA, 2009, p.25). La metodología utilizada corresponde al Diagrama Lógico Maestro, la cual permite además de identificar los sucesos iniciadores, servir de base para construir los árboles de fallas, como se explica en el siguiente numeral.

Seguidamente, se estimó la magnitud de las exposiciones potenciales. Para lo cual, fue necesario calcular los valores de entrada, requeridos en la ecuación 3, para estimar la dosis que sufriría la persona expuesta. Debido a la categoría de la fuente, extremadamente peligrosa para la salud humana, se consideró conveniente describir la magnitud de las exposiciones en términos de la probabilidad que la exposición a la dosis estimada cause la muerte de la persona expuesta. Dicha probabilidad será denotada en adelante como la variable Consecuencia.

La Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, 2004, p.30) analiza los efectos determinísticos sobre el sistema nervioso central y establece valores de dosis letales, los cuales son presentados en la tabla 2.

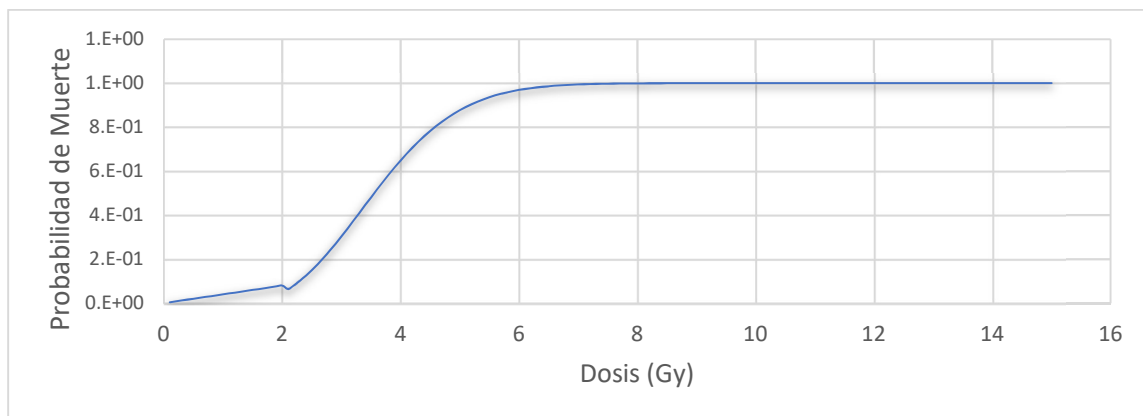
Tabla 2. Valores de dosis letales por efectos determinísticos

Identificación	Descripción	Valor (Gy)
$LD_{\frac{5}{60}}$	Dosis letal para el 5 % de las personas expuestas en los 60 días posteriores.	2
$LD_{\frac{50}{60}}$	Dosis letal para el 50 % de las personas expuestas en los 60 días posteriores.	3,5
$LD_{\frac{100}{60}}$	Dosis letal para el 100 % de las personas expuestas en los 60 días posteriores.	15

Para determinar la consecuencia en función de la dosis, se propuso una función que cumpliera con las condiciones de los valores de dosis letal citados en la tabla 1 y el modelo lineal sin umbral para riesgo de cáncer mortal (ICRP,2007) cuya pendiente es $4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$. La función fue desarrollada a partir de un modelo lineal cuadrático, usado en los modelos de supervivencia celular en radiobiología. La función desarrollada es la ecuación 4 y su comportamiento se presenta en el gráfico 1.

$$C = \begin{cases} Si D < 2 Gy; & 0.04 \cdot D \\ Si D \geq 2 Gy; & (1 - e^{0.1595D - 0.1422D^2})^2 \end{cases} \quad (4)$$






Gráfico 1. Probabilidad de muerte en función de la dosis.




2.3. Fase 3 - Análisis probabilístico de Seguridad (APS)

La evaluación del riesgo se realizó mediante la metodología de APS. El análisis partió de los sucesos iniciadores determinados en la fase anterior y prosiguió con la elaboración del Árbol de fallas para cada uno de los escenarios de exposición. El Árbol de fallas (RAMOS, A.,1990) es una metodología de diagramas de compuertas lógicas que permiten esquematizar el progreso de la secuencia accidental. La notación empleada para la construcción de los diagramas se muestra en la ilustración 1.

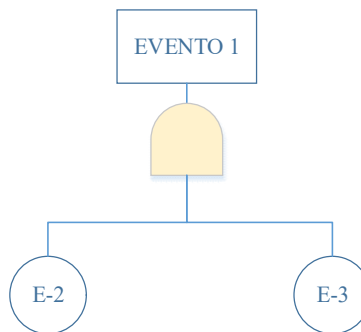
Ilustración 1. Notación de los árboles de fallas

	Suceso básico: que no requiere posterior desarrollo
	Suceso no desarrollado: suceso que no se desarrolla debido a que sus consecuencias son despreciables o no hay información suficiente.
	Suceso intermedio: un suceso de fallo que ocurre porque una o más causas anteriores ocurren a través de unas puertas lógicas.
	Puerta Y: el suceso de fallo a la salida solo ocurre si todas las entradas ocurren.
	Puerta O: El suceso de fallo a la salida ocurre si alguna de las entradas ocurre.

	Transferencia: Indica que el árbol continúa en la compuerta denotada.
---	--

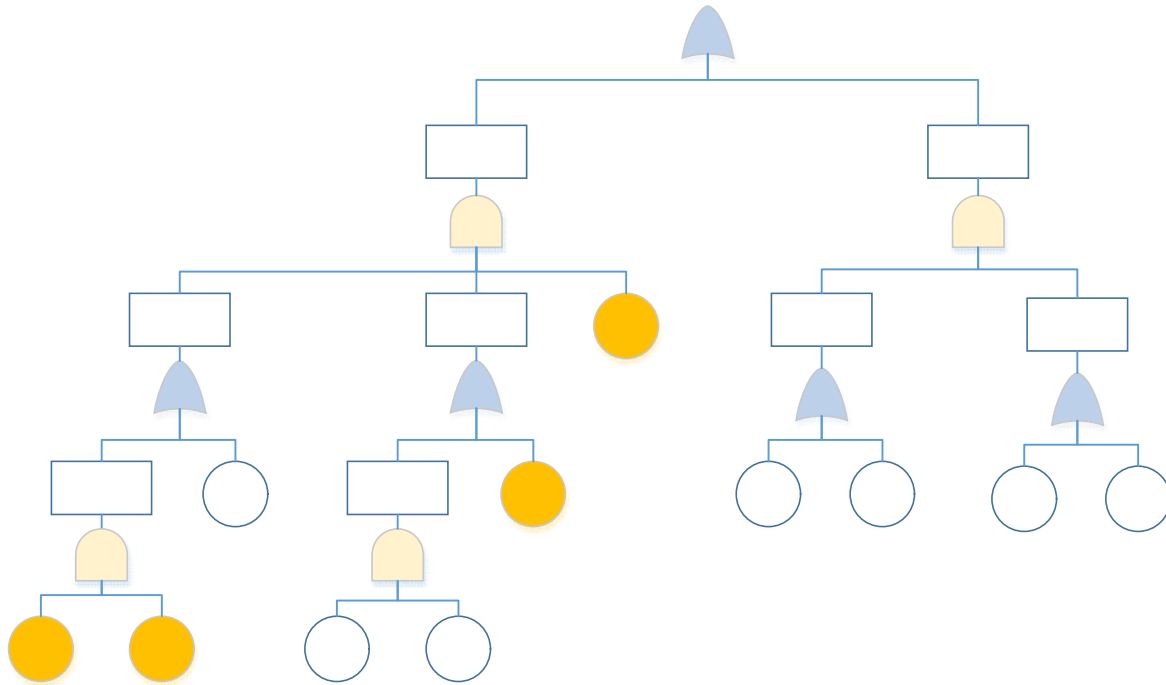
A manera de ejemplo, en la ilustración 2, se presenta un Árbol de Fallas en el cual se observa una compuerta “Y” con dos eventos básicos que producen el evento 1, esto quiere decir que el evento 1 solo ocurre cuando los sucesos básicos E-2 y E-3 ocurren de forma simultánea.

Ilustración 2. Esquema de Árbol de fallas



En los diagramas construidos bajo la metodología de Árbol de Fallas es posible identificar los caminos mínimos. Los caminos mínimos son las diferentes combinaciones de sucesos básicos o eventos que pueden dar origen al escenario de exposición. Por tanto, una vez elaborados los diagramas para cada uno de los escenarios de exposición, se procedió a identificar los caminos mínimos. Con el fin de ilustrar la forma de determinar los caminos mínimos, en la ilustración 3 se presenta un Árbol de Fallas en el cual se resalta uno de los posibles caminos mínimos.

Ilustración 3. Árbol de fallas con identificación de camino mínimo



Cada camino mínimo corresponde a una secuencia accidental. Es así, que un escenario de exposición puede ser provocado por más de una secuencia accidental. La frecuencia de ocurrencia de cada secuencia accidental fue determinada mediante la ecuación 5.

$$f_j = \prod q_i \quad (5)$$

Donde q_i es la probabilidad de fallo o frecuencia de ocurrencia de los sucesos básicos.

Con algunas consideraciones y supuestos presentados en el desarrollo, se estimó la probabilidad de ocurrencia por año de cada suceso básico. Este resultado permitió calcular la probabilidad de ocurrencia de cada secuencia accidental f_j .

Posteriormente se determinó el riesgo, mediante la ecuación 6.

$$R = \sum_i f_i \cdot C_i \quad (6)$$

dónde: i representa cada secuencia accidental que produce un escenario de exposición.

3.3.1. Aceptabilidad del riesgo

Calculados los valores de consecuencia de los diferentes escenarios de exposición y de la probabilidad de ocurrencia de las secuencias accidentales que los provocan, es posible obtener el valor de riesgo de la instalación mediante la ecuación 6. La principal utilidad del APS es verificar que la instalación tiene un riesgo inferior al valor de restricción de riesgo establecido. La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, 1997, p.5) recomienda una restricción de riesgo de las exposiciones potenciales debe ser similar al riesgo de las exposiciones normales. Por lo tanto, para el alcance de este trabajo se considera como aceptable un riesgo (R_A) de cáncer mortal por una dosis de 3.6 mSv que corresponde a la máxima dosis que recibiría un operador del laboratorio por exposiciones normales, la cual se determina usando la ecuación 4, como sigue:

$$R_A = 4 \times 10^{-2} \frac{1}{Sv} \cdot 3.6 \times 10^{-3} \frac{Sv}{año} = 1.44 \times 10^{-4} \frac{1}{año}$$

3.3.2. Medida de importancia según Fussell-Veseley (FV).

La medida FV «es útil para seleccionar los elementos (modos de fallo) que potencialmente tienen mayor contribución en el riesgo total» (OIEA, 2012, p. 13). Es la medida de importancia de una falla x definida como la relación entre la suma de las probabilidades de las secuencias de los caminos mínimos CM_i , en donde participa dicha falla, la suma de las probabilidades de todas las secuencias Q (probabilidad total de ocurrencia de una exposición potencial), como se muestra en la ecuación 7.

$$FV_x = \frac{\sum_{x \in CM_i} P(CM_i)}{Q} \quad (7)$$

FV_x Puede tomar valores entre 0 y 1, representa la probabilidad de que haya intervenido el elemento analizado en un accidente; también puede ser expresada porcentualmente. Se valoró dicha medida con el fin de conocer cuáles son las disposiciones de protección y seguridad más importantes, sobre las cuales se debería intervenir si fuese necesario reducir la probabilidad de ocurrencia de una exposición potencial.

3.3.3. Medida de incremento del riesgo (RAW por su sigla en inglés).

Es la diferencia entre el riesgo si la probabilidad de fallo de una determinada barrera es 1, es decir si la barrera está averiada o no funcional, y el riesgo real del sistema. Esta medida da información de la sensibilidad del riesgo a la falla del componente (IAEA, 2010, p.53). Se determinó la medida RAW para cada una de las barreras que intervienen en las secuencias accidentales.

$$RAW = R_{q=1} - R \quad (8)$$

3.3.4. Medida de reducción de riesgo (RRW por su sigla en inglés).

Es la diferencia entre el riesgo total si el componente nunca falla, es decir la probabilidad de fallo es 0, y el riesgo real del sistema. Esta medida brinda información referente a la contribución del componente a la confiabilidad del sistema (IAEA, 2010, p.52). Se determinó la medida RRW para cada una de las barreras que intervienen en las secuencias accidentales.

$$RRW = R_{q=0} - R \quad (8)$$

3. RESULTADOS

3.1. EXPOSICIONES NORMALES

3.1.1. Escenarios de exposición normal

La magnitud de las exposiciones normales se estimó en términos de la dosis, que es una medida del efecto a la exposición, cuyo resultado es comparable con los límites de dosis establecidos en la normativa. En Colombia, mediante la Resolución 181434 de 2002 emitida por el Ministerio de Minas y Energía, se adoptó el Reglamento de Protección y Seguridad Radiológica. La limitación de las dosis está concebida en el artículo 44 de la Resolución 181434 de 2002, cuyos valores se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Límites de dosis

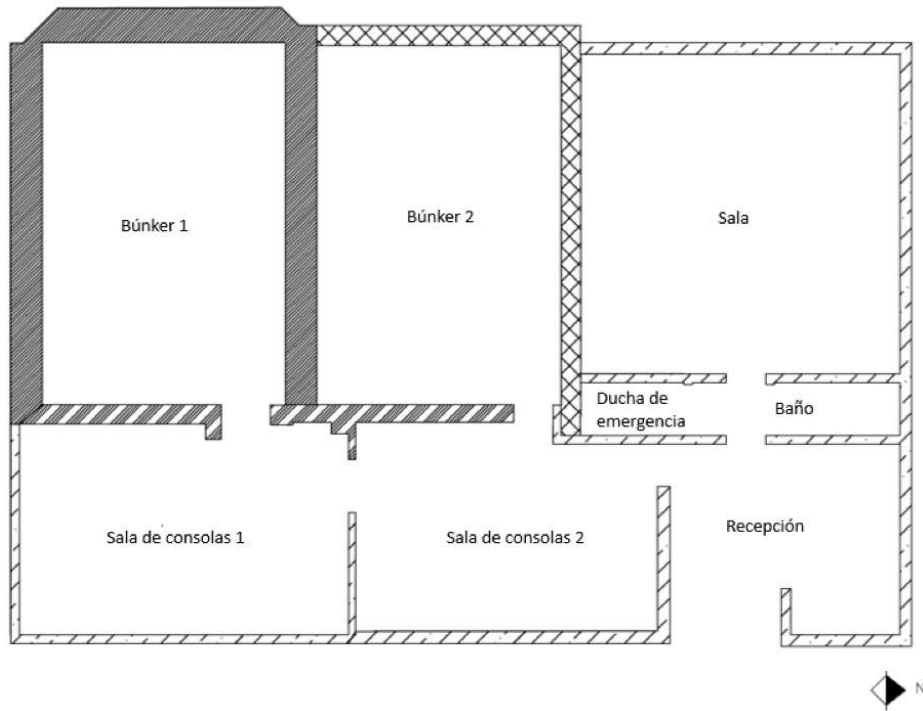
Situación de exposición	Límite
Ocupacional, trabajadores	<ul style="list-style-type: none">a. Una dosis efectiva de 20 mSv por año, como promedio en un periodo de 5 años consecutivos.b. Una dosis efectiva de 50 mSv en cualquier año.c. Una dosis equivalente al cristalino de 150 mSv en un año.d. Una dosis equivalente a las extremidades (manos y pies) o la piel (dosis medida en 1 cm² de la región cutánea más intensamente irradiada) de 500 mSv en un año.
Ocupacional, aprendices y estudiantes De 16 a 18 años	<ul style="list-style-type: none">a. Una dosis efectiva de 6 mSv en un año.b. Una dosis equivalente al cristalino de 50 mSv en un año.c. Una dosis equivalente a las extremidades o la piel de 150 mSv en un año.
Público	<ul style="list-style-type: none">a. Una dosis efectiva de 1 mSv en un año.b. En circunstancias especiales, una dosis efectiva de 5 mSv en un solo año, bajo la condición de que la dosis promedio en 5 años consecutivos no exceda 1 mSv por año.c. Una dosis equivalente al cristalino de 15 mSv en un año.c. Una dosis equivalente a las extremidades o la piel de 50 mSv en un año.

Nota: la tabla 2 muestra los límites de dosis establecidos en el anexo 1 de la Resolución 181434 de 2002, emitida por el Ministerio de Minas y Energía.

Para identificar los escenarios de exposición normal se consideraron todas las situaciones operativas que involucran exposición a radiaciones ionizantes, ya sea esta sufrida por los trabajadores ocupacionalmente expuestos (TOE) o por los miembros del público. De acuerdo con la metodología propuesta, se realizó una revisión de las diferentes situaciones operativas contempladas para la operación del irradiador de ^{60}Co en el LSCD-SGC y se identificaron aquellas actividades que involucran exposición a radiación ionizante, así como su lugar de ejecución en la instalación.

El emplazamiento del LSCD-SGC es una edificación de un nivel, con un área aproximada de 320 m², con las siguientes dependencias: *búnker 1* dispuesto para la operación del irradiador G100 con una fuente ^{60}Co con actividad nominal de 185 TBq y del irradiador OB6 con una fuente de ^{137}Cs con actividad nominal de 37 GBq, *búnker 2* dispuesto para la operación del irradiador G-10-1-12-20Cs con una fuente de ^{137}Cs con actividad nominal de 740 GBq y del tubo de rayos X, *sala* destinada para el empleo de fuentes categoría 5, *sala de consolas 1* en la cual se opera de forma remota los irradiadores G100 y OB6, *sala de consolas 2* en la cual se opera de forma remota el irradiador G-10-1-12-20Cs y el tubo de rayos X, y la *recepción* en donde se reciben los equipos a ser calibrados. Seguidamente se muestra la distribución de las áreas en el LSCD-SGC.

Ilustración 4. Dependencias del LSCD-SGC



Los escenarios de exposición normal postulados para los TOE, de acuerdo con la dependencia en la cual se realiza la actividad, se muestran en la tabla 3.

Tabla 4. Escenarios de exposición normal para los TOE

ID	Escenarios de exposición normal	Dependencia
1	Caracterización de los haces de radiación	Búnker 1 y consola 1
2	Frotis para prueba de hermeticidad de la fuente	Búnker 1 y consola 1
3	Calibración de equipos de protección radiológica para haces externos	Búnker 1 y consola 1
4	Irradiaciones por ejercicios de inter-comparación e investigación	Búnker 1 y consola 1
5	Calibración de equipos medidores de contaminación superficial	Sala
6	Calibración de medidores de actividad	Sala
7	Calibración de patrones de trabajo	Consola 1
8	Verificación de estabilidad de patrones	Consola 1

En cuanto a las exposiciones normales sufridas por los miembros del público, se prevé que estas corresponderán a las sufridas por el tránsito en zonas colindantes a la instalación y por accesos programados a la instalación con motivo de visita (visitas de expertos, actividades educativas y de formación, auditorías e inspecciones, labores de limpieza y mantenimiento, entre otras).

3.2. Magnitud de las exposiciones normales

La magnitud de las exposiciones normales se determinó mediante la ecuación 3, el valor de r se calculó a partir de las tasas de dosis de diseño del equipo marca Hopewell Designs modelo G-100. El fabricante reporta una tasa de dosis de $20 \mu\text{Sv/h}$ a 300 mm de cualquier punto de la superficie del irradiador con la máxima actividad de diseño (444 TBq), por lo que para la actividad con la cual será entregado el irradiador (185 TBq) se estima una tasa de dosis máxima a esta distancia de $8.3 \mu\text{Sv/h}$.

Teniendo en cuenta que el blindaje del irradiador tiene aproximadamente 670 mm de diámetro y que la tasa de dosis se da a 300 mm de la superficie del contenedor, se puede asumir que la distancia entre el centro de la fuente y punto de medición está dada por $(670/2 + 300) \text{ mm}$ es decir 635 mm en donde se estimó una tasa de dosis de $8.3 \mu\text{Sv/h}$. Y haciendo uso de la Ley del Inverso al Cuadrado, según la cual la tasa de dosis decrece con el inverso al cuadrado de la distancia, se calculó la tasa de dosis a 1 m del centro geométrico del irradiador, así:

$$\dot{H}(1 \text{ m}) = 8.3 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \cdot \frac{(635 \text{ mm})^2}{(1000 \text{ mm})^2} = 3.34 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$$

De acuerdo con la experiencia operativa del personal del LSCD-SGC, las actividades en el interior del bunker para la preparación del montaje de calibración se realizan a una distancia aproximada de 80 cm de la superficie del irradiador (1,135 m desde el centro del irradiador) y se permanece un 50 % del tiempo en el interior del búnker realizando los montajes y el tiempo restante realizando la irradiación de manera remota desde la consola. Por tanto, la tasa de dosis promedio a la que se encuentran expuestos los TOE en el interior del bunker se estimó de la siguiente manera:

$$\dot{H}(0.8 \text{ m}) = 3.34 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \cdot \frac{(1000 \text{ mm})^2}{(1135 \text{ mm})^2} = 2.59 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$$

Para determinar la magnitud de las exposiciones sufridas por los TOE se asumió una carga de trabajo de 2000 h al año y se despreciaron las exposiciones sufridas por actividades asociadas a la manipulación de fuentes categoría 5, teniendo en cuenta que serán significativamente menores a las dadas por la operación de los irradiadores. Así las cosas, se estimó la magnitud de las exposiciones considerando si las actividades son realizadas en el interior o exterior de los búnkeres; estas últimas, se estimaron teniendo en cuenta la tasa de dosis de diseño reportada en la memoria descriptiva de la instalación, que corresponde a 1 $\mu\text{Sv/h}$. Como resultado, se estimó la magnitud de las exposiciones normales en 3,59 mSv/año, equivalente a 0,3 mSv/mes, cuyo valor es considerablemente inferior al límite de dosis de 20 mSv/año establecido en la normativa.

3.2.EXPOSICIONES POTENCIALES

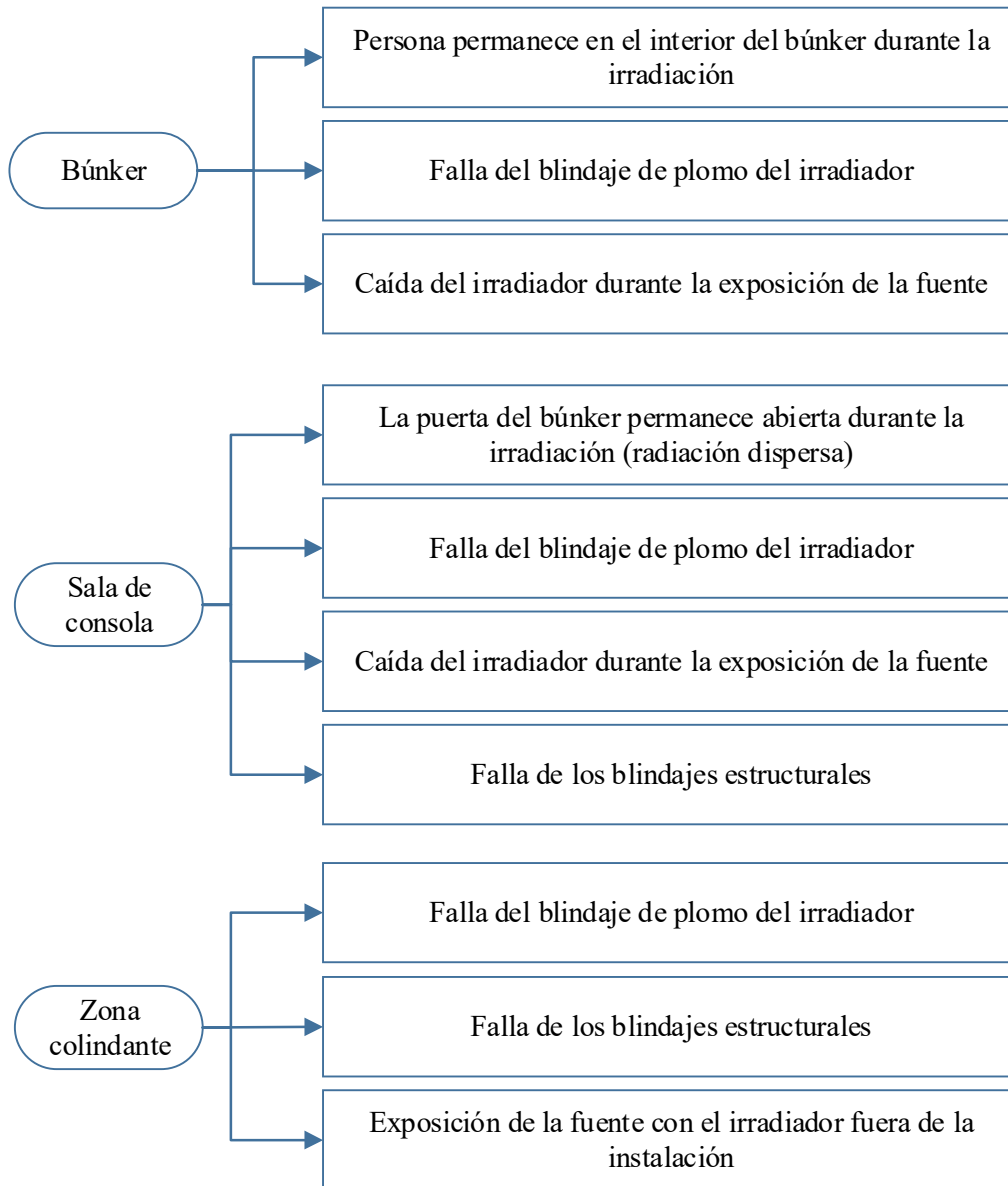
Teniendo en cuenta que la evaluación de seguridad es compatible con la magnitud de los posibles riesgos radiológicos derivados de la ejecución de la práctica, es preciso aplicar el enfoque graduado (OIEA, 2010, p.9). Es así, que el análisis de la seguridad para el irradiador Hopewell Designs modelo G-100 que alberga una fuente de ^{60}Co , a ser instalado en el LSCD-SGC, resulta representativo para la instalación; teniendo en cuenta que corresponde a la fuente de mayor peligrosidad y dado que la mayoría de las disposiciones de protección y seguridad son comunes para las diferentes fuentes utilizadas en la instalación.

3.2.1. Escenarios de exposición potencial

Los escenarios de exposición potencial fueron postulados asumiendo un conjunto de condiciones o eventos. En el contexto de análisis de seguridad, un evento es cualquier error humano (desviación de los procedimientos), falla de equipos o suceso externo que pueda contribuir a la ocurrencia de un escenario de exposición potencial (OIEA, 2019, p.85).

Se realizó un análisis exhaustivo para la identificación de los sucesos iniciadores, es así, que en conjunto con los trabajadores de la instalación se analizó para cada una de las dependencias de la instalación la ocurrencia de ciertos eventos hipotéticos cómo podrían conducir a escenarios de exposición potencial. El resultado obtenido se presenta en el diagrama 1, en el cual se representan los escenarios de exposición potencial discriminados según su lugar de ocurrencia: búnker, sala de consola y zona colindante, esta última entendida como cualquier lugar exterior a la instalación.

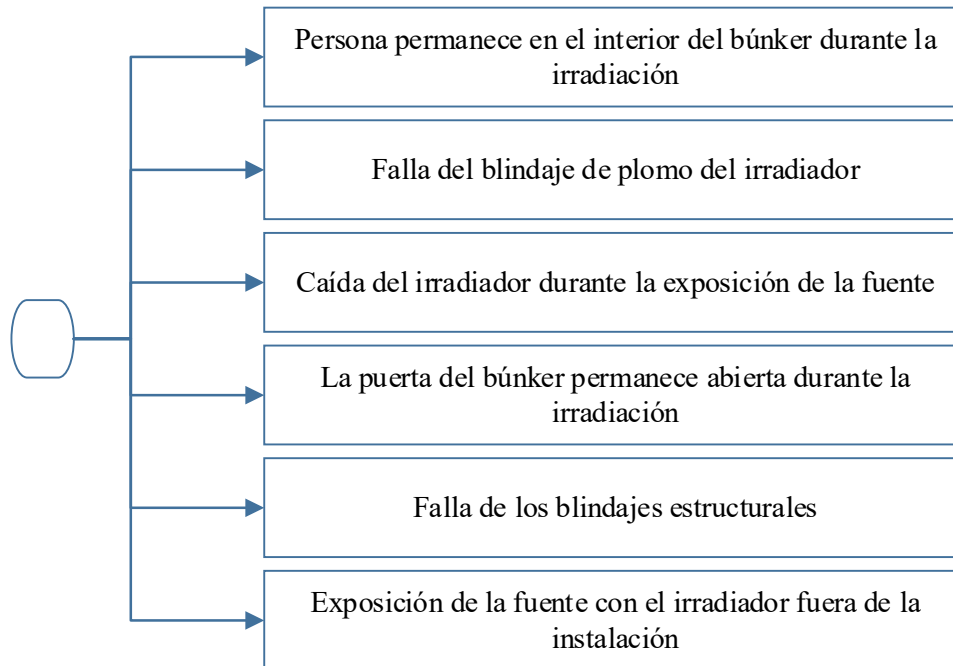
Diagrama 1. Escenarios de exposición potencial por lugar de ocurrencia



Como se puede apreciar en el diagrama 1, existen varios escenarios de exposición potencial que son comunes a los diferentes lugares considerados. Por tanto, para simplificar el análisis de seguridad, en adelante se toman los escenarios de exposición sin importar su

lugar de ocurrencia; es decir, se anulan los escenarios que son comunes a los diferentes lugares considerados. El resultado obtenido es presentado en el diagrama 2.

Diagrama 2. Escenarios de exposición potencial



Un suceso iniciador es un evento que puede conducir a una exposición potencial o no planificada, si fallan las medidas previstas para prevenirla. Como se explica en la metodología, se utilizó el Diagrama Lógico Maestro para determinar los sucesos iniciadores a partir de los escenarios de exposición potencial. El MLD es un diagrama lógico similar a un árbol de fallas, pero sin cálculos asociados; este diagrama puede representar los efectos de una falla en un sistema y ha sido utilizado en la identificación de sucesos iniciadores para plantas de generación de energía nuclear (Purba, J., 2008, p.2). A continuación, se presentan los diagramas obtenidos, mediante la metodología MLD, para cada uno de los escenarios de exposición postulados. En los diagramas se resaltaron los sucesos iniciadores identificados

(ubicados en el extremo izquierdo del diagrama) y se representa de forma figurada el escenario de exposición al final de la secuencia (extremo derecho).

Diagrama 3. MLD para el escenario «Persona permanece en el interior del búnker durante la irradiación»



Diagrama 4. MLD para el escenario «Falla del blindaje de plomo del irradiador»

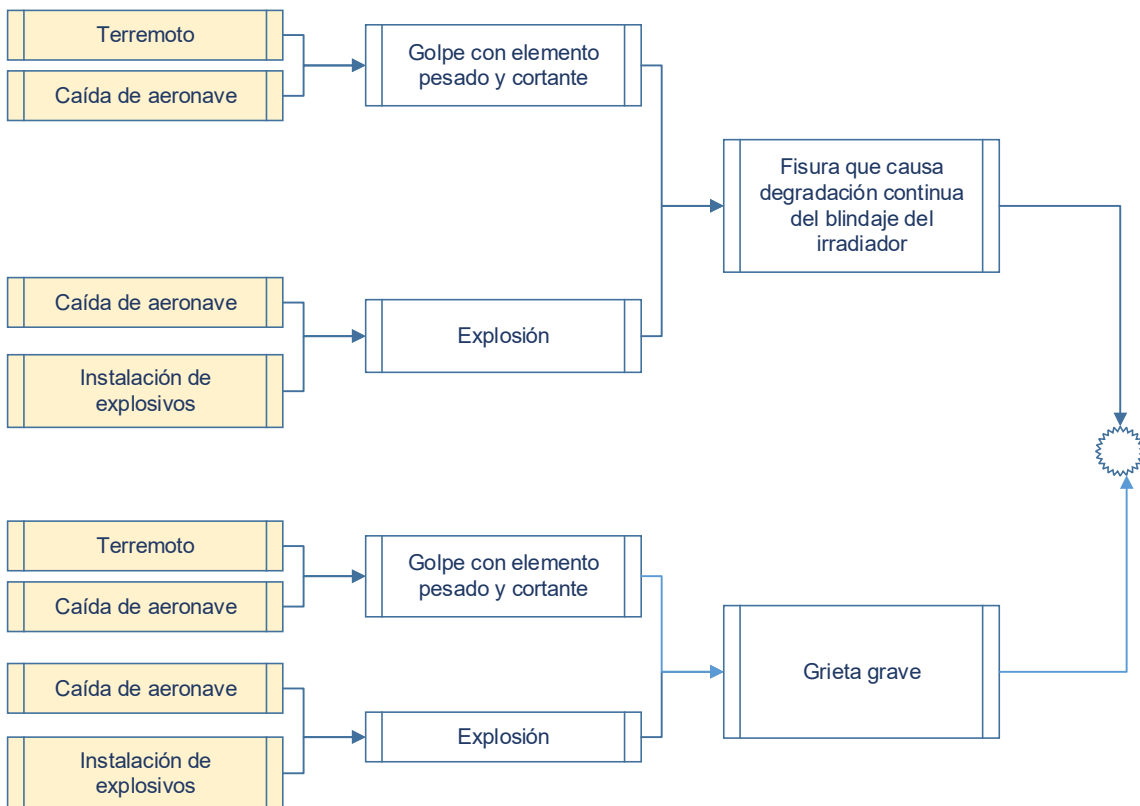


Diagrama 5. MLD para el escenario «Caída del irradiador durante la exposición de la fuente»

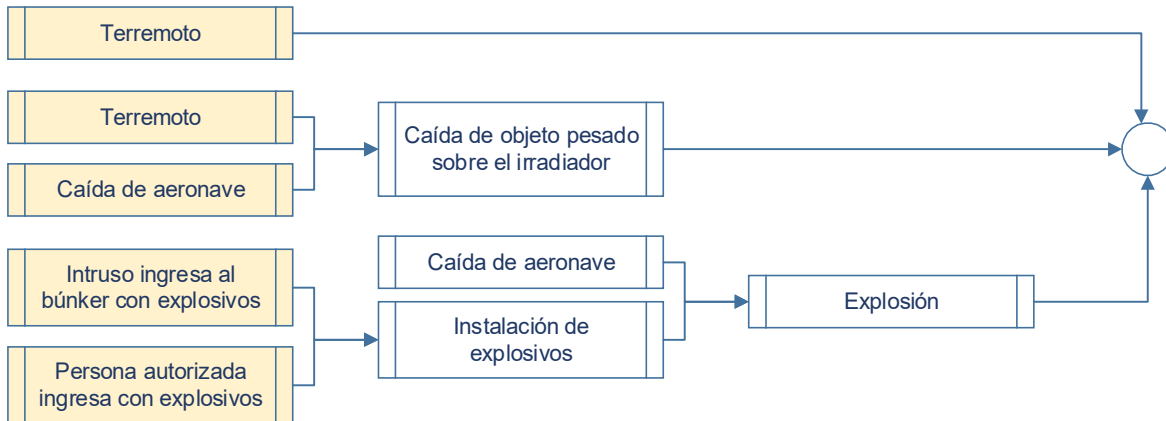


Diagrama 6. MLD para el escenario «La puerta del búnker permanece abierta durante la irradiación»



Diagrama 7. MLD para el escenario «Falla de los blindajes estructurales»

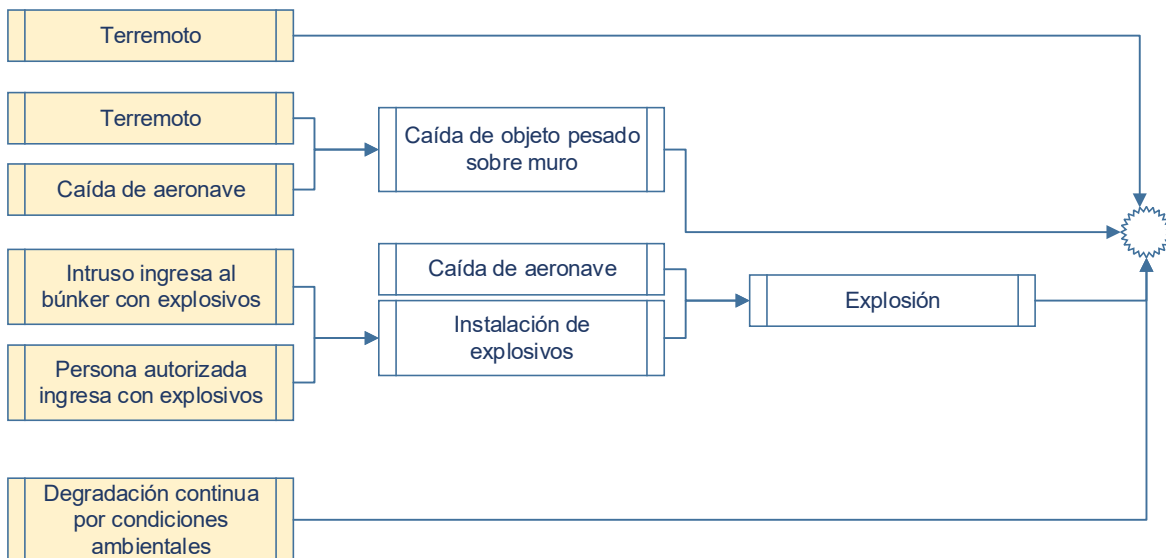


Diagrama 8. MLD para el escenario «Exposición de la fuente con el irradiador fuera de la instalación»



3.2.2. Magnitud de las exposiciones potenciales

Se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones para determinar la magnitud de las exposiciones potenciales:

- El factor de transmisión usado para el escenario de caída del irradiador es tomado del factor de transmisión del muro más delgado reportado en la Memoria Descriptiva de la instalación.
- El tiempo de exposición considerado corresponde con el tiempo estimado de detección del escenario, por lo que no son tenidas en cuenta las contribuciones de dosis debidas a la atención de la emergencia.
- Las tasas de dosis son determinadas despreciando el efecto del decaimiento de la fuente, es decir la correspondiente a la actividad nominal de 185TBq.

Además de las consideraciones listadas, en las tablas 5 y 6 se presenta información requerida para realizar el cálculo. El resultado que se obtuvo de consecuencia por cada escenario de exposición se presenta en la tabla 6.

Tabla 5. Escenarios de exposición potencial y variables de interés

ID	Escenario de exposición	Origen de la radiación	Factor de transmisión*
E-02	Persona permanece en el interior del búnker durante la irradiación	Haz directo (^{60}Co)	1
F-E11	Falla blindaje de plomo del irradiador	Haz directo (^{60}Co)	1
E-03	Caída del irradiador durante la exposición de la fuente	Haz directo (^{60}Co)	$2,35 \times 10^{-2}$
E-04	La puerta del búnker permanece abierta durante la irradiación	Radiación dispersa sobre el maniquí	1
E-36	Persona expuesta sin la protección de los blindajes estructurales	Haz directo (^{60}Co)	1
E-05	Exposición de la fuente con el irradiador fuera de la instalación	Haz directo (^{60}Co)	1

* Factor de transmisión del blindaje interpuesto entre la fuente y el individuo expuesto

Tabla 6. Escenarios de exposición potencial y variables de interés

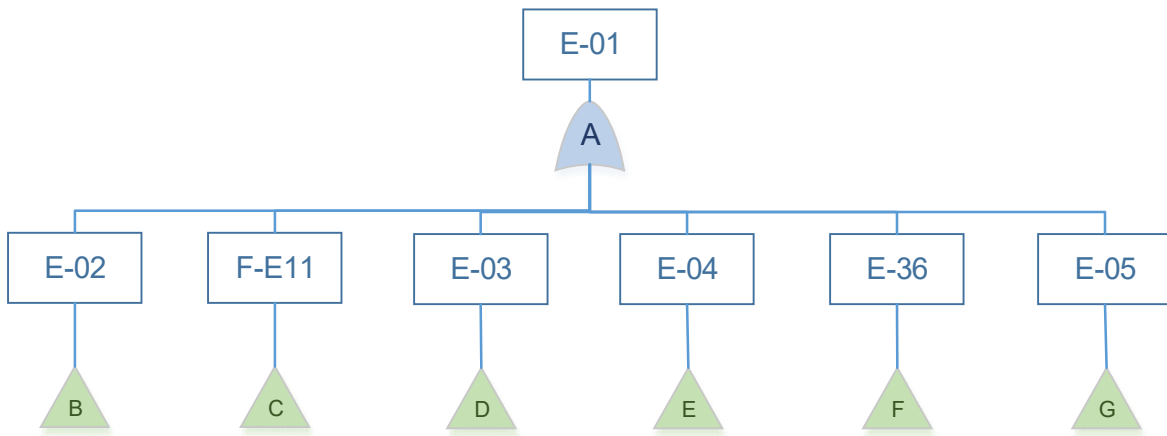
ID	Distancia* (m)	Tiempo de exposición (h)	Tasa de dosis estimada (Sv/h)	Dosis (Sv)	Consecuencia según ecuación 4
E-02	1,5	0,25	28,84	7,210	$9,96 \times 10^{-1}$
F-E11	15	1	0,29	0.288	$1,15 \times 10^{-2}$
E-03	1,5	2	$2,42 \times 10^{-1}$	$4,85 \times 10^{-1}$	$1,94 \times 10^{-2}$
E-04	2,4	0,25	0,003	0,008	$3,20 \times 10^{-5}$
E-36	15	10	0.288	2,884	$2,65 \times 10^{-1}$
E-05	2,0	10	28,84	288,4	$1,00 \times 10^0$

* Distancia entre la fuente y el individuo expuesto

3.3.ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE SEGURIDAD (APS)

A partir de los diagramas lógicos maestros, incluidos en sección de exposiciones potenciales, se construyó el árbol de fallas general, el cual se muestra en el diagrama 9.

Diagrama 9. Árbol de fallas general



En el diagrama anterior se puede apreciar que una exposición potencial, representada como E-01, puede ser debida a uno o más de los escenarios de exposición potencial identificados. Más adelante, una vez identificadas las disposiciones de protección y seguridad se desarrolla el árbol de fallos que corresponde a cada uno de los escenarios de exposición o cabezotes (B, C, D, E, F y G) en el diagrama.

3.3.1. Disposiciones de protección y seguridad

Las disposiciones de protección y seguridad del LSCD-SGC para mitigar el riesgo radiológico asociado a las exposiciones potenciales, que fueron consideradas en el análisis de seguridad se listan en la tabla 6. Por cuestiones de confidencialidad de la información, se presenta una descripción genérica de las mismas.

Tabla 7. Disposiciones de protección y seguridad del LSCD-SGC

ID barrera	Descripción
E01	Control de acceso para exterior
E02	Control de acceso biométrico
E03	Control de acceso biométrico
E04	Control de acceso biométrico
E05	Control de acceso biométrico
E06	Interlock electromecánico
E07	Interlock electromecánico
E08	Interlock óptico
E09	Interlock óptico
E10	Blindaje
E11	Blindaje
E12	Actuador neumático
E13	Sistema de encendido
E14	Sistema de encendido
E15	Diseño sismo resistente
E16	Diseño Robusto del irradiador
A01	CCTV
A02	Sistema de alarma
A03	Señal visual

ID barrera	Descripción
A04	Señal audible
A05	Señal audible
A06	Señal audible
A07	Señal visual
A08	Señal visual
A09	Señalización
A10	Tablero de interlocks
A11	Monitor de radiación fijo
A12	Señal visual
A13	Señal audible
A14	Tablero de alarma
A15	Sistema de video
P01	Divulgación de señales de advertencia
P02	Procedimiento inicio de secuencia LMO
P03	Procedimiento de monitoreo radiológico
P04	Procedimiento de irradiación
P05	Procedimiento de vigilancia
P06	Procedimiento de vigilancia

3.3.2. Eventos

Para la construcción de los árboles de falla, además de eventos asociados a la falla de las diferentes disposiciones de protección y seguridad listadas en la tabla anterior, se consideró la ocurrencia de sucesos externos. Estos sucesos son tipificados, en la construcción de los árboles de falla, como eventos base. Los sucesos externos fueron identificados a partir de los MLD construidos en la sección anterior y se listan en la tabla 8.

Tabla 8. Eventos externos

ID evento	Descripción
E-15	Terremoto
E-16	Caída de aeronave
E-20	Intención o coacción para cometer un acto terrorista por personal con autorización de acceso
E-21	Fuente expuesta
E-27	Degradación continua de la estructura por condiciones ambientales

La condición de fuente expuesta se tuvo en cuenta en el análisis como un evento externo pues corresponde a una condición necesaria para que se presenten exposiciones potenciales en algunas secuencias accidentales.

En la estimación de la probabilidad del evento, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- La frecuencia falla de los elementos electromecánicos es tomada como 0.04 fallos por año, debido a que el fabricante manifiesta que cada componente del irradiador o del sistema de seguridad tiene una vida útil igual o mayor a la vida útil recomendada para el irradiador que es de 25 años. La probabilidad es determinada usando el primer término de la distribución de Poisson.

$$P = 1 - e^{-\rho \cdot t} \quad (6)$$

Donde:

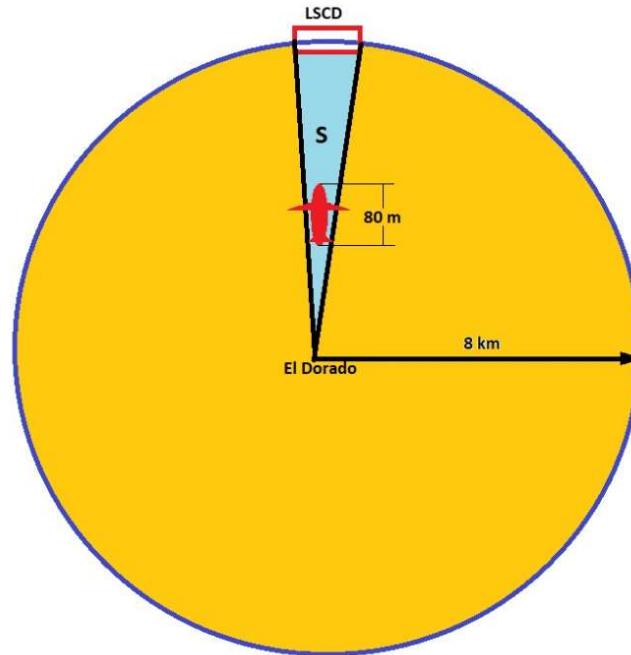
ρ es la tasa de fallos por año

t es el periodo de tiempo estudiado que para este caso de 1 año.

- La frecuencia de la falla de procedimientos, debida a errores humanos, está dada por el producto entre el número de veces que es ejecutado el procedimiento y la probabilidad de error humano, la cual se toma como un valor de 6×10^{-3} , considerando un error de comisión con características de la tarea compleja y bajo estrés (IAEA, 2012, p. 17) y la probabilidad de fallo por año se determina mediante la ecuación 6.
- La frecuencia de ocurrencia de un terremoto, según el Modelo Nacional de Amenaza Sísmica para Colombia, corresponde a 1×10^{-3} eventos al año con magnitud superior a 6,5 en la escala de Richter.
- La frecuencia con la que personal con o sin autorización de acceso cometa un acto terrorista se estima considerando que dicho evento no ha ocurrido en los últimos 35 años, por tanto, se estima en 0.0286 eventos por año.
- Para determinar la frecuencia de que un avión caiga sobre el LSCD-SGC se tuvo en cuenta que en Bogotá ocurren 7,16 accidentes al año, según la información reportada por la Aeronáutica Civil. Asumiendo que todos los accidentes reportados ocurren en el interior de un círculo con radio igual a la distancia entre la instalación y el aeropuerto, distancia de 8 km aproximadamente, la probabilidad de que suceda un accidente en la línea que une el centro del aeropuerto con la instalación se aproxima a la relación entre el área del segmento circular que limita los extremos del laboratorio y el centro del círculo con el área de todo el círculo. Por tanto, la probabilidad, considerando la caída del avión más grande que transita sobre Bogotá puede estimarse como:

$$f = 7.16 \frac{\text{accidentes}}{\text{año}} \cdot \frac{S}{\pi r^2} \cdot \frac{80 \text{ m}}{8000 \text{ m}} = 5.67 \times 10^{-6} \frac{\text{accidentes}}{\text{año}}$$

Ilustración 5. Consideraciones geométricas para la frecuencia de accidente aéreo.



- La probabilidad por año de que la fuente este expuesta, E-21, se determina considerando que la fuente esté en posición de irradiación el 50 % del tiempo de la jornada laboral. Por tanto, se estima en $1,42 \times 10^{-1}$.

$$f = \frac{2000 \frac{h}{\text{año}} \cdot 0.5}{365 \frac{\text{días}}{\text{año}} \cdot 24 \frac{h}{\text{días}}} = 0,142$$

A partir de los arboles de fallo incluidos en el anexo 1 se identificaron los eventos base y con las consideraciones antes mencionadas se estimó la probabilidad de ocurrencia por año para cada uno de ellos. Los resultados son mostrados en la tabla 9.

Tabla 9. Eventos base y su probabilidad de fallo

Evento	Descripción	Probabilidad de ocurrencia por año
E-15	Terremoto	2,00E-03
E-16	Caída de aeronave	5,67E-06
E-20	Intención o coacción para cometer un acto terrorista por parte de personal con autorización de acceso	2,81E-02
E-21	Fuente expuesta	1,14E-01
E-27	Degradación continua de la estructura por condiciones ambientales	0,00E+00
F-A01	CCTV	3,92E-02
F-A02	Sistema de alarma	3,92E-02
F-A03	Señal visual	3,92E-02
F-A04	Señal audible	3,92E-02
F-A05	Señal visual	3,92E-02
F-A06	Señal audible	3,92E-02
F-A07	Señal visual	3,92E-02
F-A08	Señal visual	3,92E-02
F-A09	Señalización	3,92E-02
F-A10	Tablero de interlocks	3,92E-02
F-A11	Señal visual	3,92E-02
F-A12	Señal audible	3,92E-02
F-A13	Señal audible	3,92E-02
F-A14	Tablero de alarmas	3,92E-02
F-A15	Sistema de video	3,92E-02
F-E01	Control de acceso externo	3,92E-02
F-E02	Control de acceso biométrico	3,92E-02
F-E03	Control de acceso biométrico	3,92E-02
F-E04	Control de acceso biométrico	3,92E-02
F-E05	Control de acceso biométrico	3,92E-02
F-E06	Interlock electromecánico	3,92E-02
F-E07	Interlock electromecánico	3,92E-02
F-E08	Interlock óptico	3,92E-02
F-E09	Interlock óptico	3,92E-02
F-E10	Blindajes estructurales	5,81E-03
F-E11	Blindajes del equipo	2,82E-03
F-E12	Actuador	0,00E+00
F-E13	Sistema de activación	3,92E-02

Evento	Descripción	Probabilidad de ocurrencia por año
F-E14	Sistema de encendido	3,92E-02
F-P01	Procedimiento	1,94E-02
F-P02	Procedimiento	1,39E-01
F-P03	Procedimiento	2,59E-01
F-P04	Procedimiento	7,76E-01
F-P05	Procedimiento	5,83E-01
F-P06	Procedimiento	5,83E-01

3.3.3. Secuencias accidentales

Para cada árbol de fallas se determinaron los caminos mínimos, es decir todas las combinaciones mínimas de sucesos básicos que resultan en un escenario de exposición. Que como se explicó anteriormente, los caminos mínimos corresponden o equivalen a las secuencias accidentales. Se identificaron 28 secuencias accidentales cuyos componentes se muestran en presenta en la tabla 10.

Tabla 10. Secuencias accidentales a partir de los caminos mínimos

ID secuencia	ID Cabezone	Camino mínimo					
1	B	F-A03	F-A04	F-A05	F-A06	F-P02	
2	B	F-A03	F-A04	F-P01	F-P02		
3	B	F-P01	F-A05	F-A06	F-P02		
4	B	F-P01	F-E05	F-E06	F-E07	F-E08	F-E09
5	B	F-A07	F-E05	F-E06	F-E07	F-E08	F-E09
6	C	E-15	F-E16				
7	C	E-16	F-E16				
8	C	E-20	F-E01	F-P05	F-E16		
9	C	F-E01	F-E02	F-E03	F-E04	F-E05	F-E16
10	C	E-15	F-E15	F-E16			
11	C	E-15	E-16	F-E15	F-E16		
12	C	E-16	F-E15	F-E16			

ID secuencia	ID Cabezote	Camino mínimo							
13	C	E-20	F-E01	F-P05	F-E15	F-E16			
14	C	F-E01	F-E02	F-A01	F-E15	F-E16			
15	D	E-21	E-16						
16	D	E-21	E-20	F-P05	F-E01				
17	D	E-21	F-E01	F-E02	F-E03	F-A04	F-A05		
18	D	E-21	E-15	E-16					
19	D	E-21	E-15						
20	E	F-A13	F-A14	F-E06	F-E07	F-P04			
21	E	F-P01	F-E05	F-E06	F-E07				
22	E	F-A07	F-E05	F-E06	F-E07				
23	F	E-15	F-E15	F-P03					
24	F	E-15	E-16	F-E15	F-P03				
25	F	E-16	F-E15	F-P03					
26	F	E-20	F-E01	F-P05	F-E15	F-P03			
27	F	F-E01	F-E02	F-A01	F-E15	F-P03			
28	G	F-A01	F-A02	F-E01	F-E02	F-E03	F-E04	F-E05	F-P06

La complejidad de la secuencia accidental está dada por la cantidad de eventos base que la conforman, conocido como el orden de los caminos mínimos. En la tabla 11 se presenta el orden de las secuencias obtenidas. La secuencia más compleja, de orden 8, es la correspondiente a la exposición de la fuente por fuera de las instalaciones cuyo suceso iniciador es el hurto del irradiador.

Tabla 11. Complejidad de las secuencias accidentales

Orden	Cantidad
2	4
3	5
4	8
5	6
6	4
8	1

En la tabla 12 se presenta la probabilidad de ocurrencia por año para cada secuencia accidental obtenida a partir del producto de las probabilidades de los sucesos básicos que la componen.

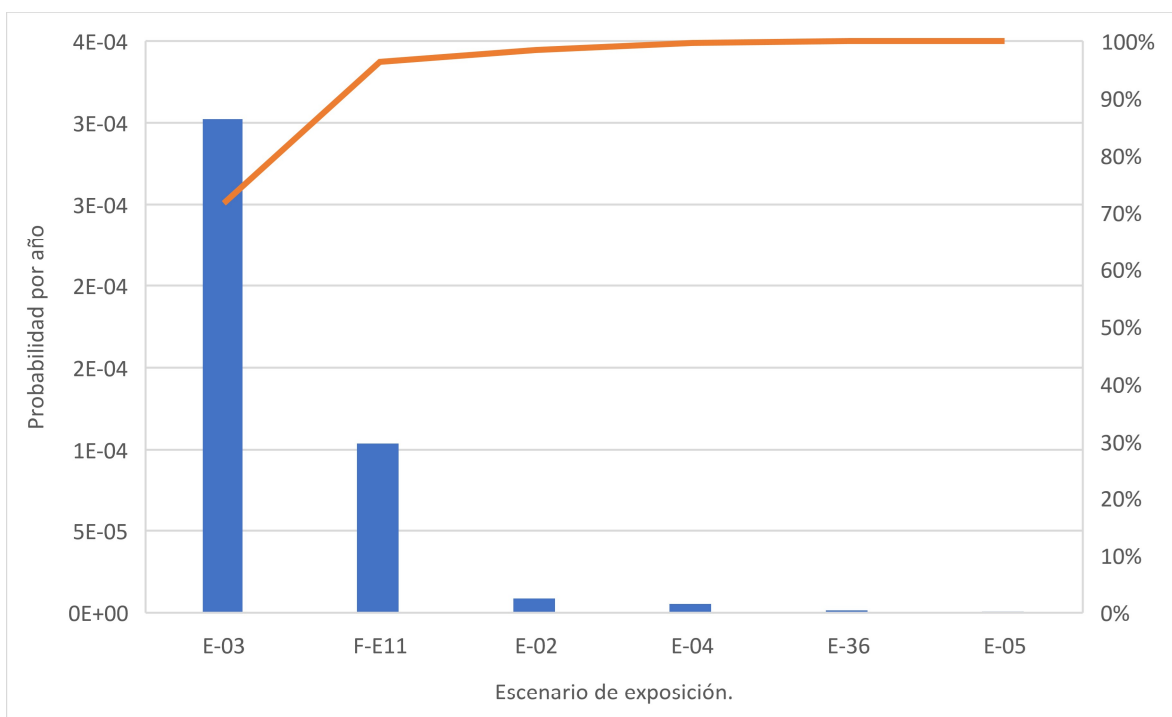
Tabla 12. Probabilidad de ocurrencia por año de las secuencias accidentales

# Secuencia	Cabezote	Probabilidad por de ocurrencia por año
1	B	3,29E-07
2	B	4,16E-06
3	B	4,16E-06
4	B	1,80E-09
5	B	3,63E-09
6	C	7,83E-05
7	C	2,22E-07
8	C	2,53E-05
9	C	3,63E-09
10	C	1,57E-07
11	C	8,87E-13
12	C	4,44E-10
13	C	5,05E-08
14	C	4,72E-09
15	D	6,47E-07
16	D	7,36E-05
17	D	1,06E-08
18	D	1,29E-09
19	D	2,28E-04
20	E	1,84E-06
21	E	1,17E-06
22	E	2,36E-06

# Secuencia	Cabezote	Probabilidad por de ocurrencia por año
23	F	3,99E-06
24	F	2,26E-11
25	F	1,13E-08
26	F	1,29E-06
27	F	1,20E-07
28	G	8,32E-11

En la gráfica 2 se muestra la probabilidad de ocurrencia de cada escenario de exposición, en donde se observa que el escenario más probable corresponde a la caída del irradiador mientras se encuentra expuesta la fuente E-03.

Gráfico 2. probabilidad por año de los escenarios de exposición



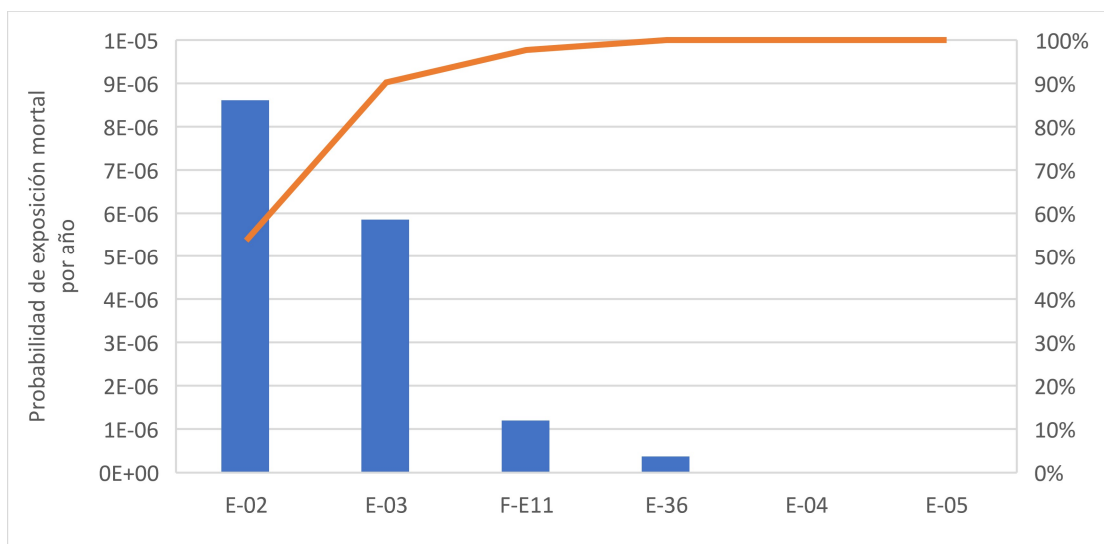
3.3.4. Estimación del riesgo y criterio de aceptabilidad

La probabilidad por año de cada escenario de exposición (cabecero) se calculó sumando la probabilidad de las secuencias que lo provocan por ser eventos independientes. Las variables que se requieren para determinar el riesgo mediante la ecuación 4 se resumen en la tabla 12. Se puede observar que el riesgo total es inferior a la restricción del riesgo de 1.44×10^{-4} .

Tabla 13. Estimación del riesgo

Cabezote	Escenario	Consecuencia (probabilidad de muerte por escenario)	Frecuencia (probabilidad de ocurrencia/año)	Riesgo (probabilidad de exposición mortal/año)
B	E-02	9,96E-01	8,64E-06	8,61E-06
C	F-E11	1,15E-02	1,04E-04	1,20E-06
D	E-03	1,94E-02	3,02E-04	5,86E-06
E	E-04	3,20E-05	5,37E-06	1,72E-10
F	E-36	2,65E-01	1,40E-06	3,71E-07
G	E-05	1,00E+00	8,32E-11	8,32E-11
Riesgo total				1,6E-05

Grafico 3. Riesgo por escenario de exposición



3.3.5. Análisis de importancia Fussel Vesely

Se realizó el análisis de importancia según Fussel Vesely, en el cual se puede apreciar que 3 de las 26 disposiciones de protección y seguridad consideradas son las más relevantes por representar el 80% de la probabilidad de fallo total del sistema, de acuerdo con el Pareto. El resultado se muestra en el gráfico 3.

Gráfico 4. Importancia de las barreras

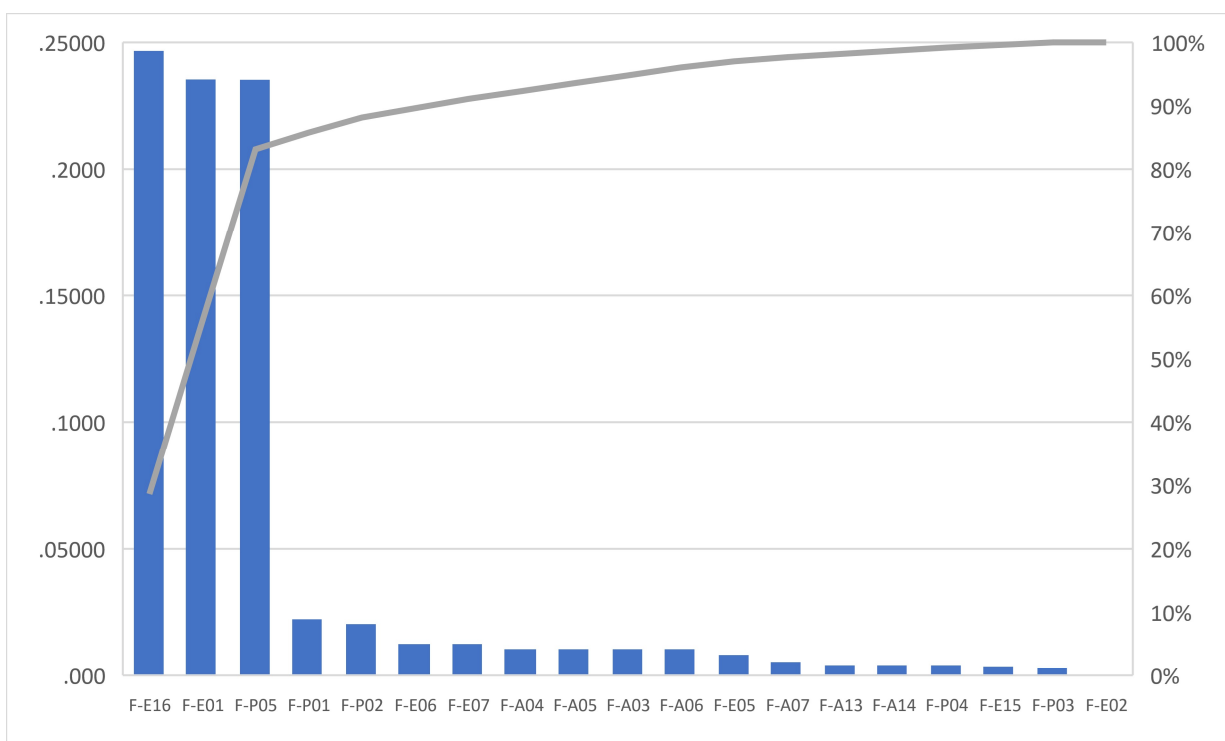


Tabla 14. Fallas más importantes para la probabilidad de ocurrencia de una exposición potencial

ID de la falla	Descripción	Importancia
F-E16	Falla Diseño robusto del irradiador	9,96E-01
F-E01	Falla control de acceso entrada principal de la sede.	1,15E-02
F-P05	Falla procedimiento de verificación de paquetes en la portería principal.	1,94E-02

3.3.6. Medida de incremento del riesgo RAW

La medida de reducción del riesgo representa el valor del riesgo si la falla se presentara con una probabilidad igual a 1, es decir el componente falla siempre o se encuentra indisponible, este valor muestra la sensibilidad del sistema a la falta del componente. En la gráfica 6 se muestra el valor de RAW para cada una de las fallas y se muestra el valor ΔR que es la diferencia entre el valor de restricción de riesgo y el valor del riesgo determinado.

Gráfico 5. Medida de Incremento del riesgo

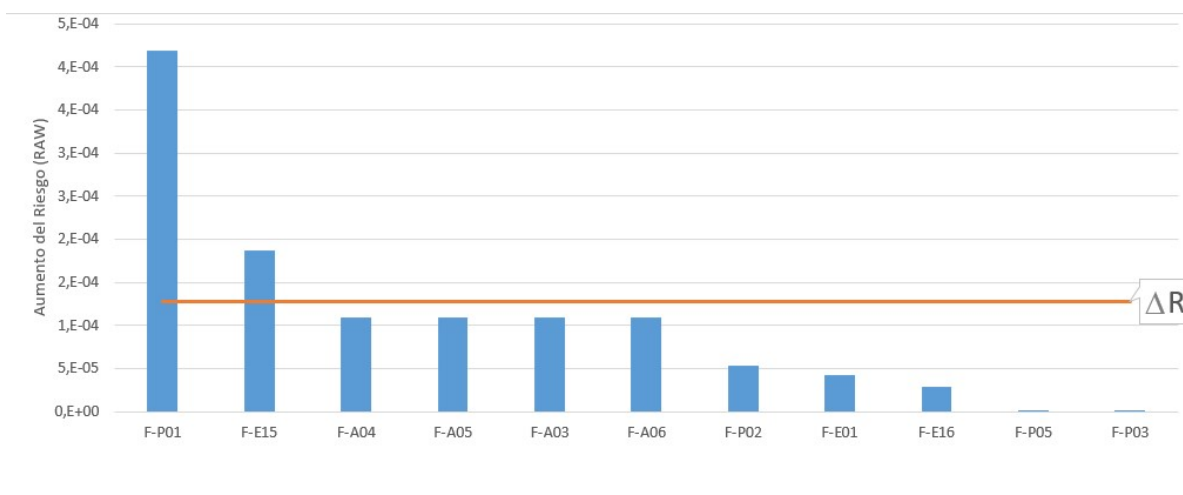


Tabla 15. Fallas con valores de RAW con las cuales se superaría la restricción del riesgo.

ID de la falla	Descripción	RAW
F-P01	Falla divulgación de señales de advertencia	4,2E-04
F-E15	Falla control de acceso entrada principal de la sede.	1,9E-04

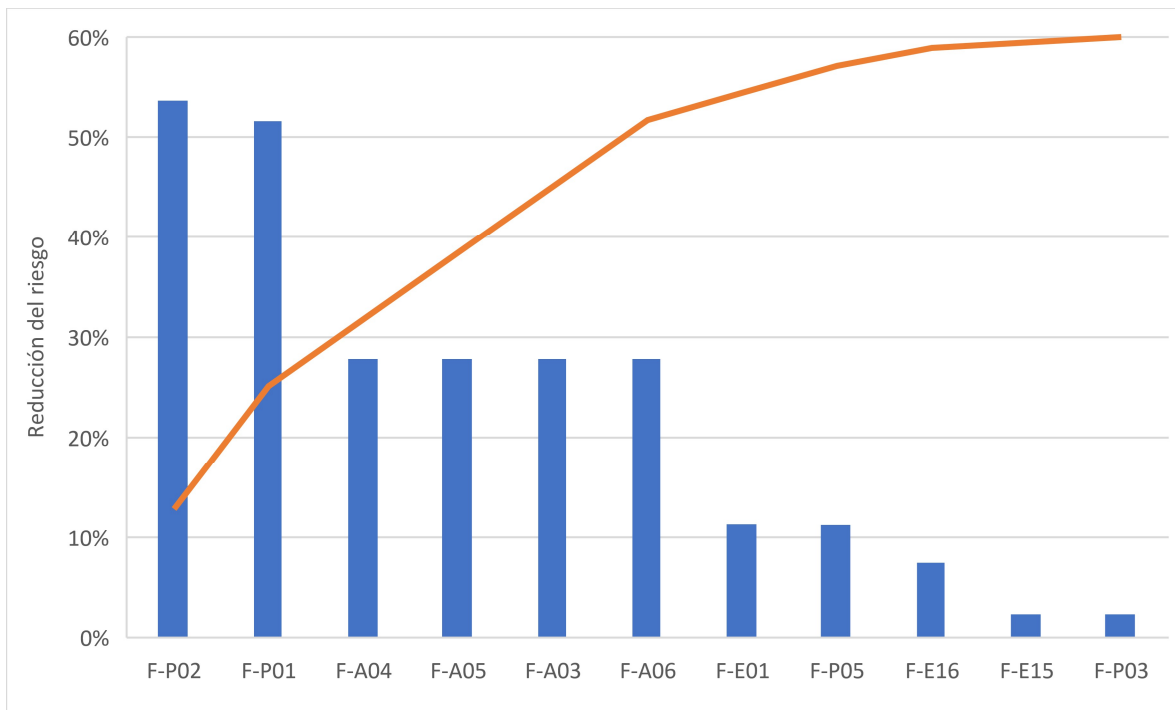
Si el valor RAW es inferior a ΔR implica que se cumple la restricción del riesgo aun si la componente se encuentra indisponible. El valor de RAW es inferior a ΔR para el 92% de los componentes, lo que refleja que el sistema tiene un alto grado de redundancia. Sin embargo,

es necesario mantener cuidadosamente la fiabilidad de los componentes P-01 y E-15 a fin de mantener el riesgo en un valor inferior al criterio de aceptabilidad.

3.3.7. Medida de reducción de riesgo

Esta cantidad representa en que cantidad se reduce el riesgo si se mejora la fiabilidad del componente hasta que su probabilidad de fallo sea cero, es decir que el componente nunca falla, lo que nos ayuda a determinar que componentes son susceptibles de mejora.

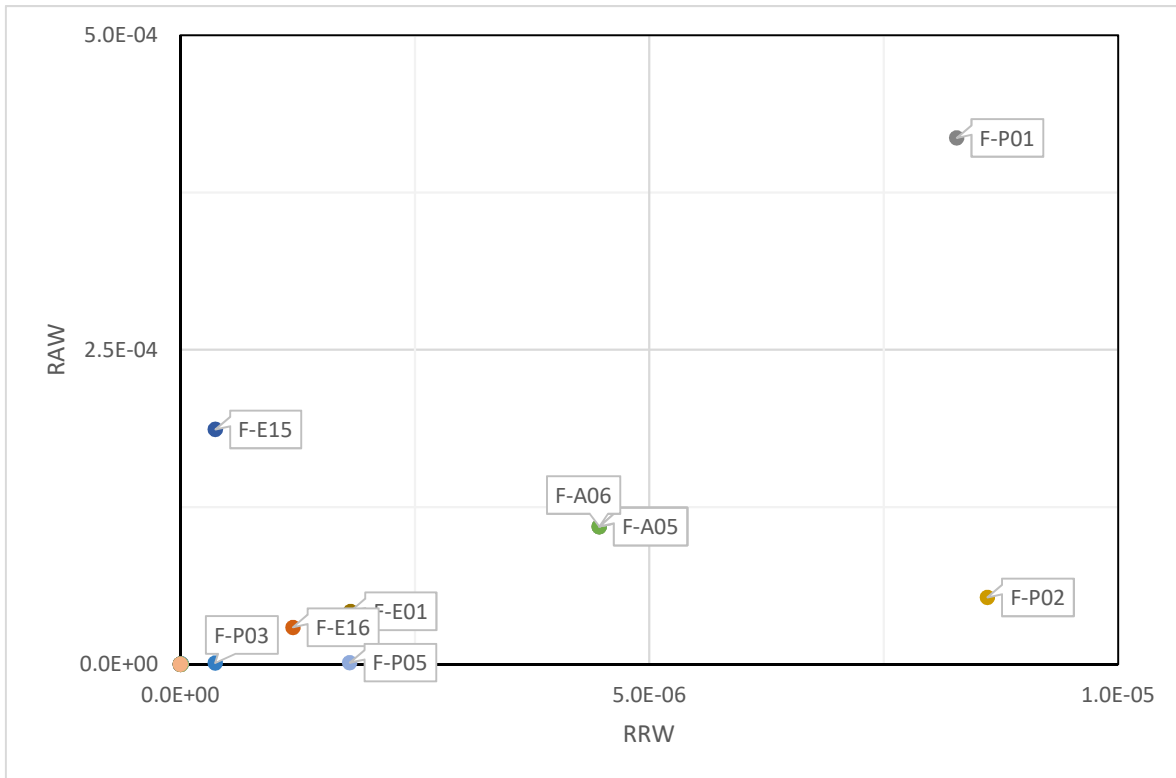
Gráfico 6. Medida de reducción del riesgo



3.3.8. Criticidad de los componentes.

Los valores de RRW y RAW y fueron graficados con el fin de identificar los sucesos básicos más críticos. En el gráfico 6 se puede apreciar los valores críticos, que corresponden a aquellos ubicados en el cuadrante superior derecho y debiesen ser los primeros a ser considerados en procesos de rediseño.

Grafico 7. Criticidad



Nota: En algunos puntos coinciden varias barreras. En el punto denotado a F-A06, coinciden también F-A05, F-A04 y F-A03.

CONCLUSIONES

1. Se estimó el riesgo radiológico con un valor de 1.6×10^{-5} de exposición mortal por año, inferior a la restricción de riesgo establecida de 1.44×10^{-4} .
2. Las fallas críticas son aquellas relacionadas con las señales que advierten el inicio de las secuencias LMO y de irradiación, así como de la capacitación y entrenamiento necesarios para su interpretación. Por lo anterior, es necesario que se promuevan actividades de divulgación del significado de las señales y la pronta notificación de su fallo.
3. El valor de RAW para la falla del procedimiento de divulgación de señales de advertencia F-P01 y falla control de acceso entrada principal de la sede F-E15 reflejan que en su ausencia se supera el valor de aceptabilidad del riesgo, por lo que se debe mantener cuidadosamente su fiabilidad. Sin embargo, es necesario revisar las consideraciones realizadas en la construcción de los árboles de fallo en donde interviene antes de considerar una mejora en el sistema.
4. Dada la importancia observada en las fallas de los controles de acceso, es importante considerar en la actualización de este análisis otras posibles rutas de accesos no autorizados.
5. El escenario de exposición con mayor contribución al riesgo total es la permanencia de una persona en el interior del bunker, por lo que es conveniente realizar actividades tendientes a la sensibilización del personal ocupacionalmente expuesto a este escenario.
6. La metodología puede ser tan precisa como se quiera y la fiabilidad de los resultados depende de la rigurosidad de su implementación, por lo que es muy

importante antes de utilizar los resultados del análisis para la toma de decisiones, realizar una revisión cuidadosa y preferiblemente una validación independiente.

7. La metodología ha mostrado ser útil en la identificación de vulnerabilidades del sistema de protección y seguridad radiológica y permite de forma fácil aumentar su nivel de precisión enfocándose en las disposiciones más críticas y en los escenarios que tienen un mayor aporte al riesgo global de la instalación.

8. Debido a que el riesgo global es determinado por la suma del riesgo de cada secuencia accidental, es posible incluir de forma sencilla escenarios de exposición adicionales, así como nuevas disposiciones de protección radiológica, permitiendo modelar el comportamiento del riesgo a modificaciones en el sistema de protección radiológica o de la realización de la práctica.

REFERENCIAS

- Comisión Internacional de Protección Radiológica. (1997). *ICRP Publicación 76 - Protection from Potential Exposures - Application to Selected Radiation Sources*. Oxford, UK: Pergamon Express.
- Comisión Internacional de Protección Radiológica. (2007). *ICRP Publicación 103 - Las recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*. Madrid, España: Senda Editorial S.A.
- International Atomic Energy Agency. (2004). *Practical Radiation Technical Manual, Health effects and medical surveillance*. IAEA, Viena.
- International Atomic Energy Agency. (2010). *Development and application of level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants - Specific Safety Guide SSG-3*. IAEA, Viena.
- International Atomic Energy Agency. (2012). *Aplicación del método de la matriz de riesgo a la radioterapia, IAEA-TECDOC-1685/S*. IAEA, Viena.
- International Atomic Energy Agency. (2019). *IAEA Safety Glossary, Terminology used in nuclear safety and radiation protection - 2018 Edition*. IAEA, Viena.
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2009). *Clasificación de las fuentes radiactivas, Guía de Seguridad - RS-G-1.9*. OIEA, Viena.

Organismo Internacional de Energía Atómica. (2010). *Evaluación de la seguridad de las instalaciones y actividades, Requisitos de Seguridad Generales - GSR Part 4*. OIEA, Viena.

Organismo Internacional de Energía Atómica. (2012). *Análisis Probabilístico de Seguridad de tratamientos de radioterapia con acelerador lineal, IAEA-TECDOC-1670/S*. OIEA, Viena.

Purba, J. (2019). *Master Logic Diagram: An approach to Identify Initiating Events of HTGRs*. Journal of Physics: Conf. Ser **962** 012036, p. 1-7. doi: 10.1088/1742-6596/962/1/012036.

U.S. Nuclear Regulatory Commission (1975). Reactor Safety Study, Wash 1400.

González, M. (2010). Aprovechamiento Del Análisis Probabilístico De Seguridad En Centrales Nucleares Especialidad: Nuclear.

RAMOS, A., (1990). Procedimiento para la valoración cuantitativa de los riesgos. Métodos de los árboles de fallos, COASHIQ, Madrid.

ANEXOS

Anexo 1. Árbol de fallas

A continuación, se continúa el desarrollo del árbol de fallas presentado anteriormente en el diagrama 9. El desarrollo del árbol de fallas general corresponde al desarrollo de cada uno de los escenarios de exposición o cabeceros en el diagrama.

Diagrama 10. Árbol de fallas correspondiente al escenario E-02

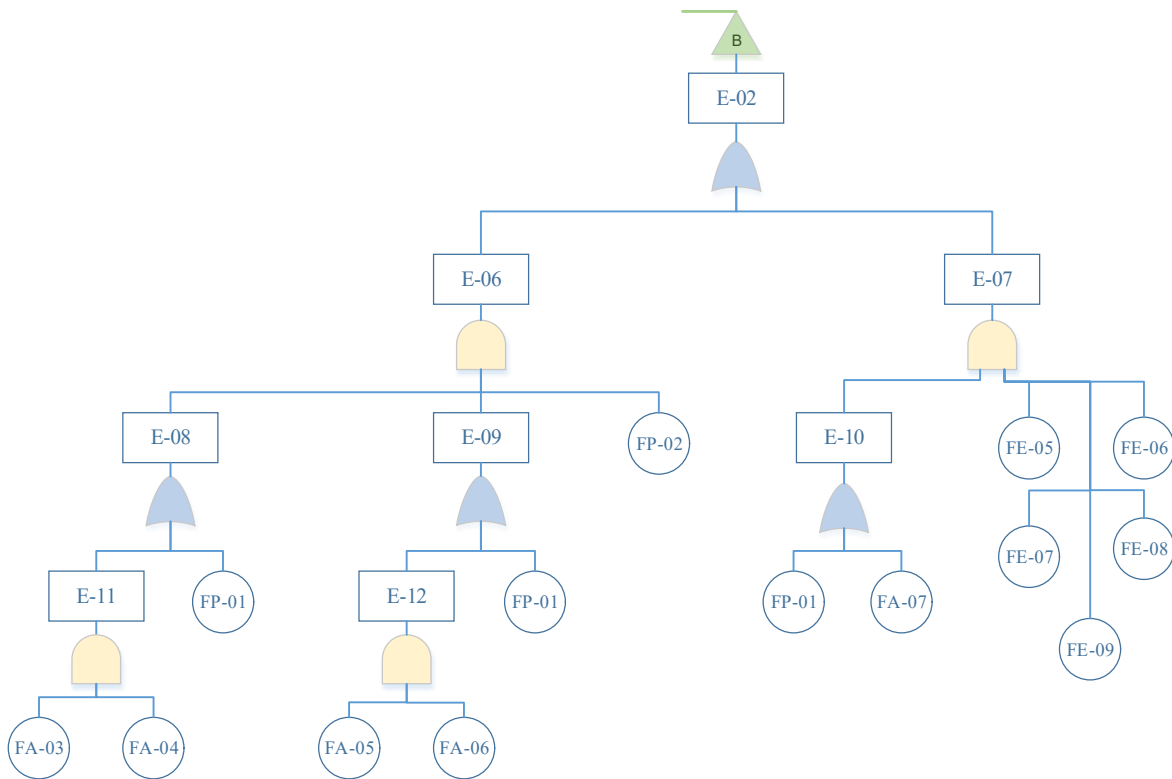


Diagrama 11. Árbol de fallas correspondiente al escenario FE-11

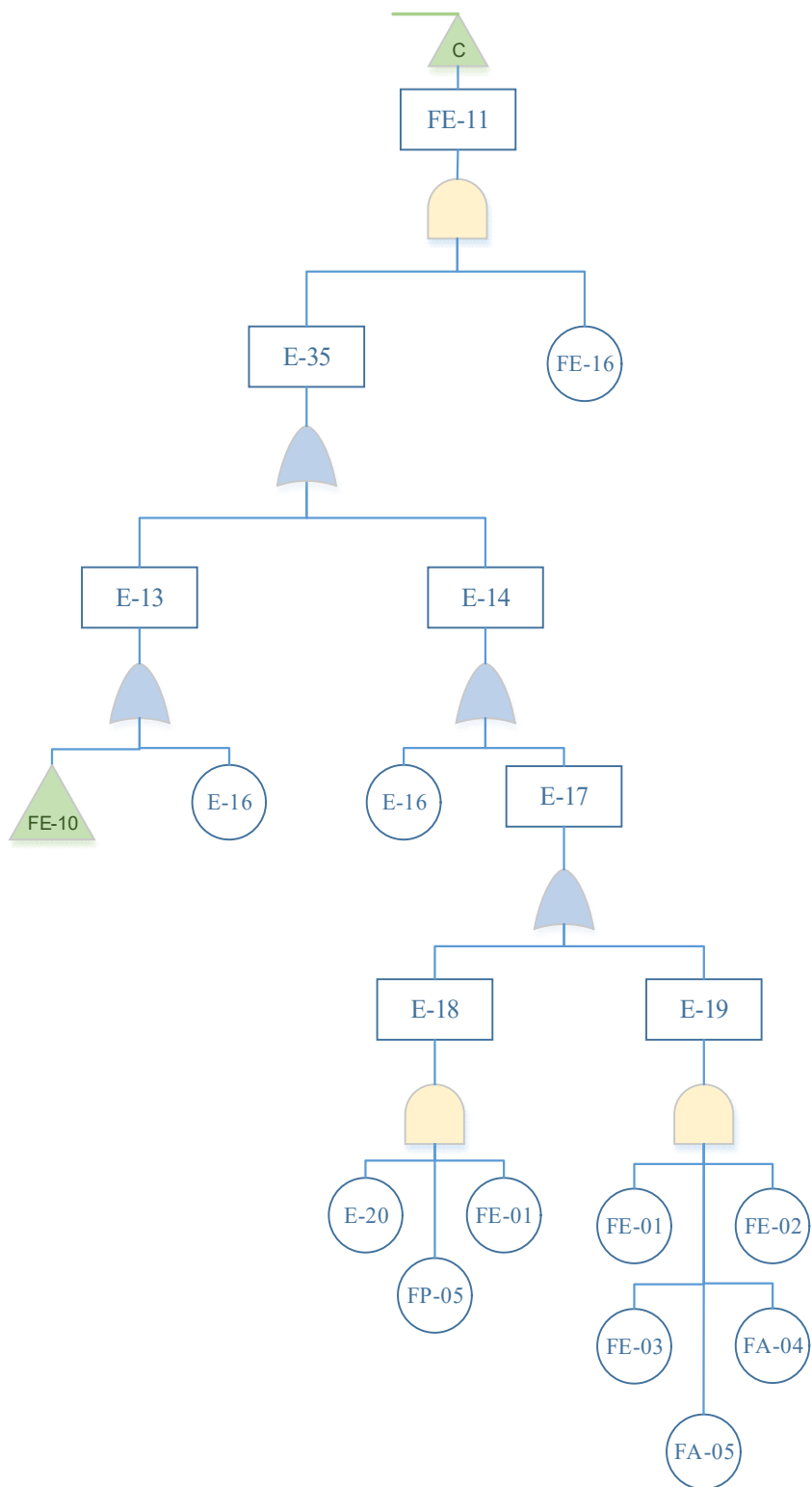


Diagrama 12. Árbol de fallas correspondiente al escenario E-03

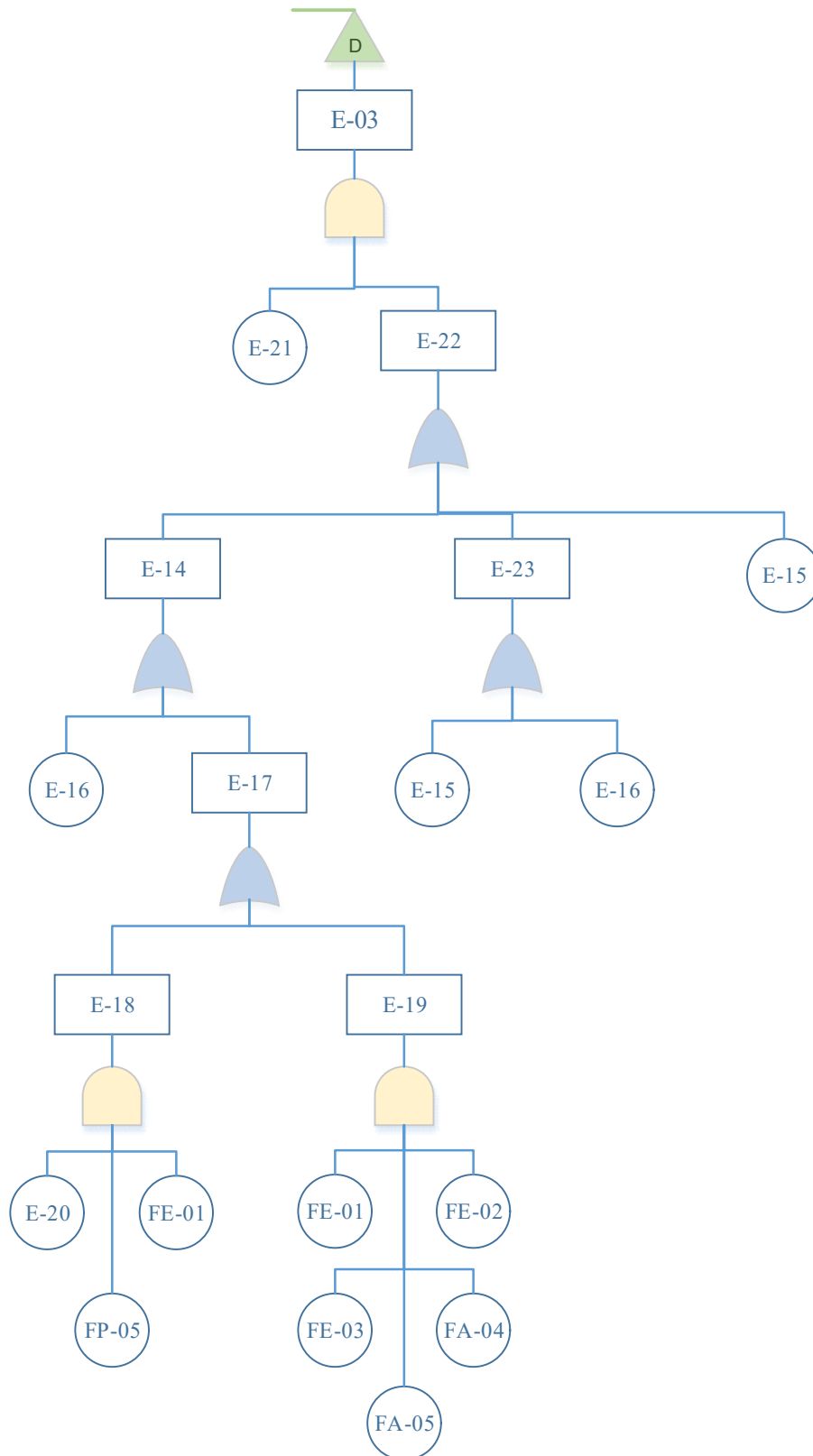


Diagrama 13. Árbol de fallas correspondiente al escenario E-04

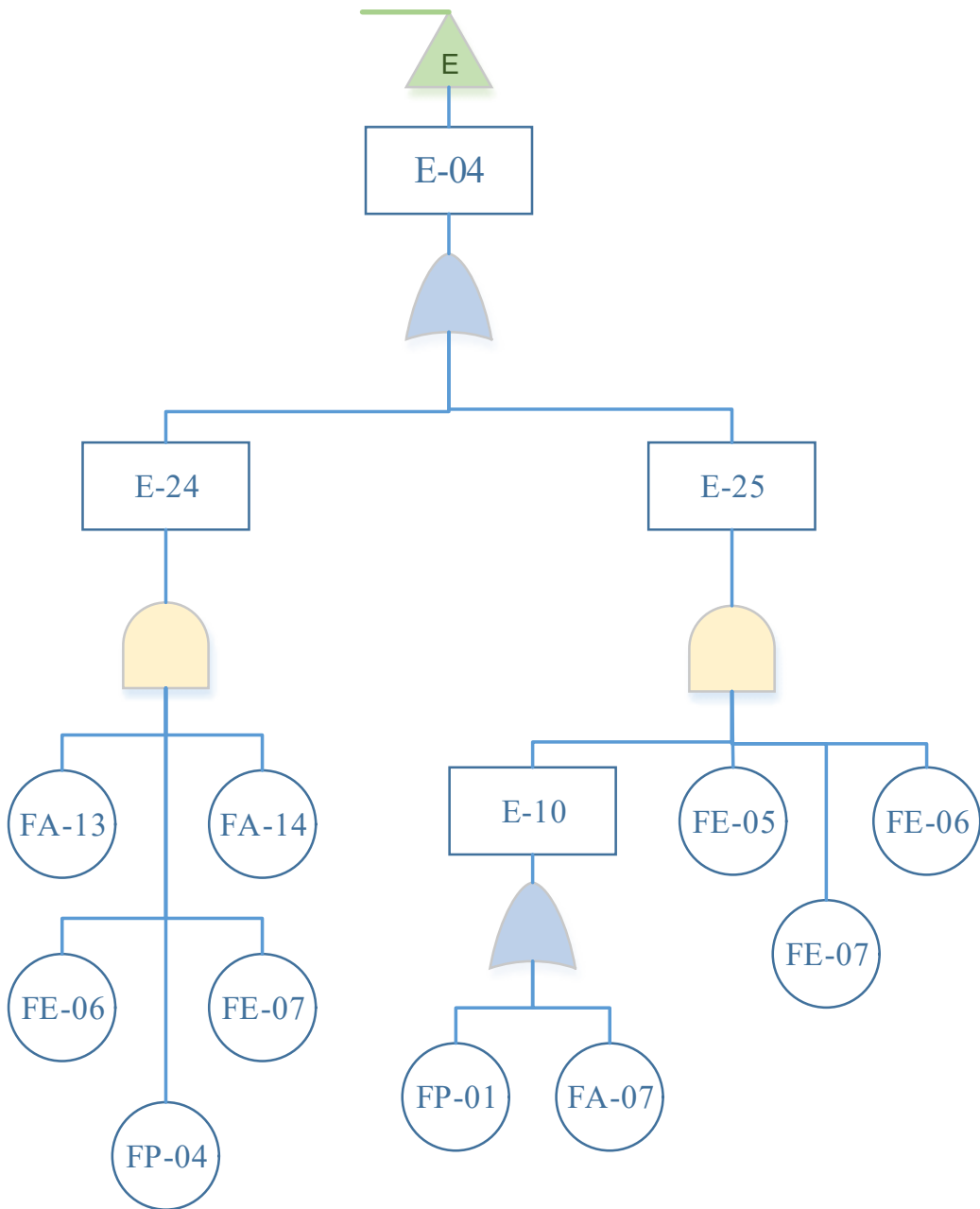


Diagrama 14. Árbol de fallas correspondiente al escenario E-36

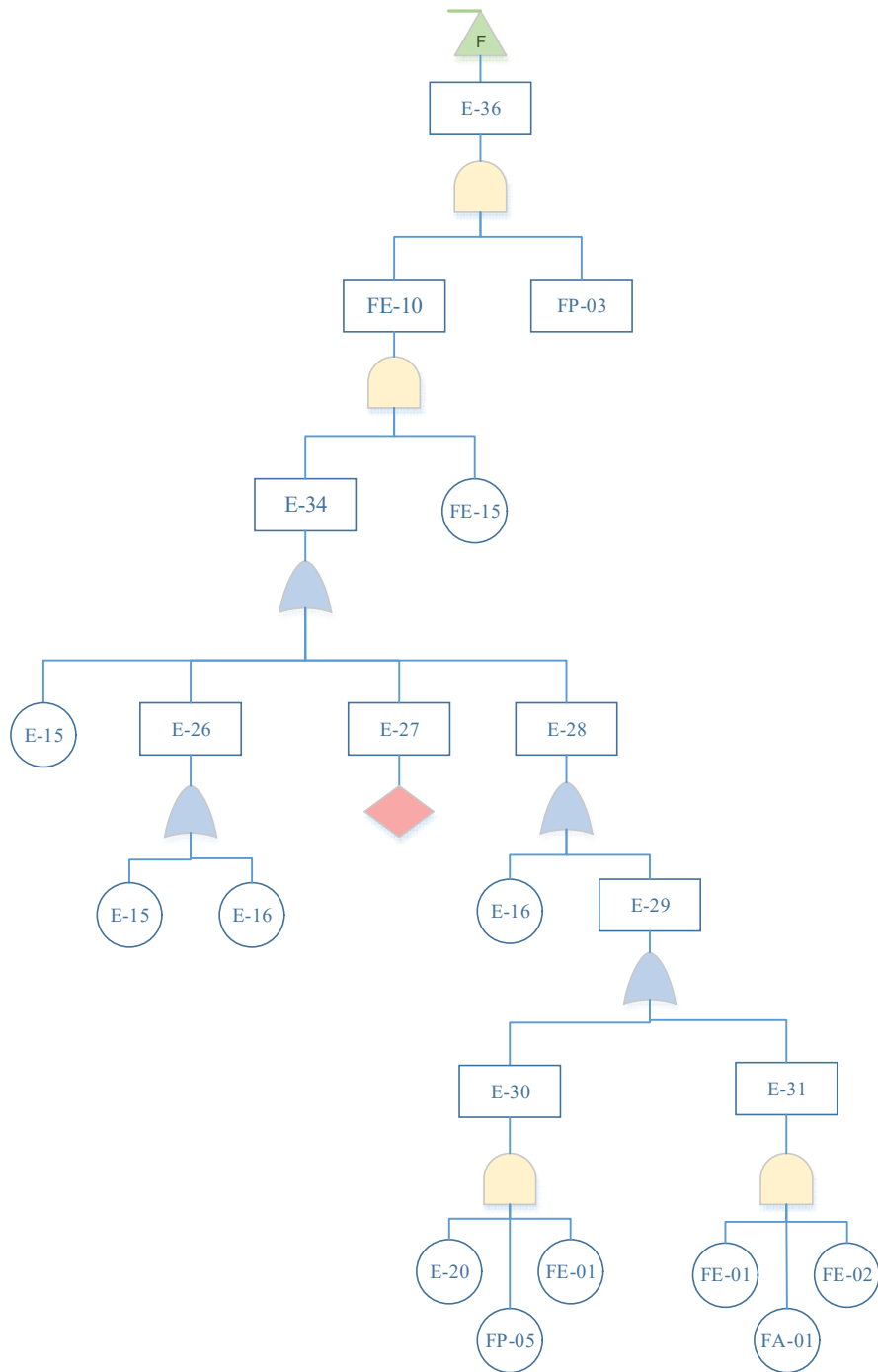


Diagrama 15. Árbol de fallas correspondiente al escenario E-05

