



Aplicación del método de la matriz de riesgo en Radiografía Industrial

Volumen 1: texto principal

Junio 2016

El presente trabajo fue realizado bajo el auspicio y financiación del Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares, FORO.

PREÁMBULO

Los principios fundamentales de seguridad y las normas internacionales básicas de seguridad contra las radiaciones ionizantes publicadas contienen requisitos sobre la protección radiológica del personal sometido a exposiciones a la radiación. En conformidad con estos requisitos y cumpliendo con su responsabilidad de proveer recomendaciones para la aplicación de dichas normas, el Organismo Internacional de Energía Atómica ha venido desarrollando una intensa actividad en la prevención de exposiciones accidentales en los diferentes usos de fuentes de radiación, lo cual se ha materializado en una serie de informes técnicos sobre las lecciones aprendidas de investigaciones realizadas con motivo de sucesos muy graves, y en un material didáctico repartido en cursos regionales y accesibles en la página Web. Estas lecciones aprendidas son necesarias pero no suficientes, ya que se sigue recibiendo información sobre nuevos tipos de exposiciones accidentales y puede haber otros sobre los que no se ha publicado informe alguno.

Se hace necesario un planteamiento más anticipativo que, de manera sistemática, exhaustiva y estructurada, trate de averiguar con antelación qué otros errores se pueden cometer, para poder prevenirlos o detectarlos a tiempo. Entre estos planteamientos se encuentra el método de “Matrices de Riesgo”, que por su relativa sencillez se puede aplicar en todo servicio de Radiografía industrial. Éste ha sido el objeto del presente trabajo desarrollado en el marco del Programa extrapresupuestario de seguridad radiológica, nuclear y física en Iberoamérica.

El Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares (el FORO) aprobó un proyecto sobre análisis de riesgo en Radiografía Industrial con el objetivo de evaluar de forma sistemática, exhaustiva y estructurada la seguridad de esta práctica, aplicando variadas técnicas y herramientas de identificación de riesgos para investigar las principales causas que pueden provocar una exposición accidental.

Hasta la fecha se ha publicado abundante bibliografía sobre las exposiciones accidentales que han ocurrido en la práctica de Radiografía Industrial [1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7]. Todos estos documentos permiten identificar lecciones aprendidas de los accidentes ocurridos y proyectar la implementación de medidas preventivas que pudieran prevenir la ocurrencia de accidentes similares. Sin embargo, estos estudios retrospectivos (a partir de accidentes que ya han ocurrido), aunque necesarios, no son suficientes, porque no contemplan otros posibles accidentes, que o no han ocurrido aún, o no se han dado a conocer.

Se requiere por tanto, una metodología sistemática que se anticipe (con enfoque prospectivo), y que identifique aspectos débiles o vulnerables en el proceso de la práctica de Radiografía Industrial, con vistas a colocar medidas que eviten las exposiciones accidentales. Una forma sistemática de lograrlo es mediante la aplicación de técnicas de análisis de riesgos. En [8] se muestran los resultados derivados de aplicar la técnica de “Análisis Probabilista de Seguridad (APS)” en la práctica de Radioterapia, sin embargo, estos estudios son laboriosos y requieren de un grupo de especialistas que demandan meses, o incluso años para su conclusión lo cual no se corresponde con las necesidades y posibilidades económicas de las pequeñas empresas que habitualmente trabajan en la práctica de Radiografía Industrial. El objeto del presente proyecto es aplicar un método sistemático pero simplificado, que, aunque no cuantifica el riesgo con la exactitud de un APS, representa una forma estructurada para establecer prioridades y se corresponda de forma realista con las posibilidades y objetivos que demandan los análisis de riesgo en la práctica de Radiografía Industrial. En tal sentido se ha seleccionado la metodología de “Matrices de Riesgo” y la misma se ha aplicado a las siguientes técnicas de Radiografía Industrial por ser estas las más usadas en Iberoamérica.

1. Gammagrafía Industrial móvil.
2. Gammagrafía Industrial en Bunker.
3. Radiografía con equipos de Rx móvil.
4. Radiografía con equipos de Rx en Bunker.

En el desarrollo de este proyecto participaron expertos de las Autoridades Reguladoras de Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Cuba, España, México, Perú y Uruguay, así como expertos que trabajan en las siguientes empresas de Radiografía Industrial.

1. Cuba. Empresa de servicios técnicos de defectoscopía y soldadura, CENEX
2. España. Empresa. SGS TECNOS.SA
3. España. Empresa. SCI. Servicios de Control e Inspección. SA
4. México. Empresa. Control Total de Calidad en Procedimientos de Soldaduras. SA de CV.
5. México. Empresa Nuclear Ingeniería. SA de CV.
6. México. Empresa Adiestramiento y Capacitación Nuclear. SA de CV.
7. México. Empresa Radiografías Caballeros. SA de CV.
8. México. Empresa Ingeniería e Inspección en Soldaduras. SA de CV.
9. México. Empresa Supervisión e Inspecciones Técnicas. SA de CV.
10. México. Empresa Peritos en Radiografía y Soldaduras. SA de CV.
11. México. Empresa Radiografías de Campeche. SA de CV.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	9
1.1 Antecedentes	9
1.2 Objetivo del proyecto	10
1.3 Alcance	11
1.4 Estructura del informe	11
2 MÉTODO	11
2.1 Conceptos y definiciones	11
2.1.1 Riesgo	12
2.1.2 Suceso iniciador de accidente	12
2.1.3 Secuencia accidental	13
2.1.4 Consecuencias	13
2.1.5 Barreras de seguridad o defensas	13
2.1.5.1 Clasificación según el tipo de medidas de seguridad	13
2.1.5.2 Clasificación según el momento de actuación en la secuencia accidental	14
2.2 Descripción del método	15
2.2.1 Forma de combinar las variables	16
2.2.2 Criterio para asignar niveles de frecuencia a los sucesos iniciadores	17
2.2.3 Criterio para asignar los niveles de las consecuencias	19
2.2.3.1 Consecuencias para los trabajadores y público	19
2.2.4 Criterio para asignar la probabilidad de fallo al conjunto de barreras	20
2.2.5 Criterio para elaborar el listado de sucesos iniciadores	20
2.2.6 Obtención del nivel de riesgo para cada secuencia accidental	21
2.2.7 Aceptabilidad del riesgo	21
2.2.8 Análisis de resultados del cribado y acciones correctoras	22
2.2.8.1 Barreras directas: ¿son suficientemente robustas las barreras directas existentes como para asignar a la probabilidad de fallo del conjunto de barreras un nivel de P menor que el que corresponde según el criterio establecido en la metodología?	23
2.2.8.2 Robustez de los reductores: ¿Son suficientemente robustos los reductores de frecuencia y de consecuencias como para asignar un nivel de frecuencia f y consecuencias C menor que el que corresponde según el criterio establecido en la metodología?	24
2.2.8.3 Barreras y reductores adicionales; ¿Es posible introducir nuevas barreras o nuevos reductores de frecuencia o de consecuencias?	25

2.2.8.4 Disminución global del riesgo y conclusiones: ¿Qué medidas deben proponerse para disminuir globalmente el riesgo?	25
2.2.9 Análisis de importancia de las defensas (barreras y reductores)	26
2.2.10 Herramienta Informática SEVRRRA (Sistema de Evaluación de Riesgo Radiológicos). Modelación de la Empresa de referencia de Radiografía Industrial en SEVRRRA)	27

3 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA DE RADIOGRAFIA INDUSTRIAL GENÉRICA E HIPOTÉTICA A LA QUE SE APLICÓ EL MÉTODO

3.1 Equipos de radiografía con fuentes de radiación gamma	28
3.2 Equipos de radiografía con generadores de rayos x	30
3.3 La instalación de referencia para efectuar gammagrafía industrial móvil	31
3.4 La gammagrafía fija (en bunker)	35
3.5 La instalación de referencia para efectuar radiografía industrial con Rx	36
3.6 Radiografía industrial con Rx móvil	37
3.7 Radiografía industrial con Rx fija (en bunker)	37
3.8 Aspectos de seguridad que guardan relación con el cliente	38

4 RESULTADOS GENERALES DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MATRICES DE RIESGO EN LA PRÁCTICA DE GAMMAGRAFÍA

5 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO EN LA TÉCNICA DE GAMMAGRAFÍA MÓVIL

5.1 Consideraciones generales sobre los sucesos con consecuencias Muy Altas	40
5.1.1 Accidente radiológico de Yanango, Perú	40
5.1.2 Accidente radiológico de Nueva Aldea, Chile	41
5.2 Consideraciones específicas para sucesos con Consecuencia Muy Alta	41
5.3 Resultados generales sobre la gammagrafía móvil	44
5.3.1 Resumen estadístico	44
5.3.2 Análisis detallado de los sucesos con Riesgo Alto y Consecuencias Muy Altas	46
5.3.3 Análisis detallado de los sucesos con Riesgo Alto y Consecuencias Alta	50
5.3.4 Medidas para reducir el riesgo de los sucesos iniciadores con Riesgo Alto	50
5.3.5 Análisis de importancia de las defensas (barreras y reductores)	52
5.3.5.1 Importancia estructural de las barreras	52
5.3.5.2 Importancia estructural de los reductores de consecuencias	55
5.3.6 Conclusiones específicas para la práctica de gammagrafía móvil	55

6 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO EN LA TÉCNICA DE GAMMAGRAFÍA EN BUNKER	56
6.1 Resultados generales sobre la gammagrafía en bunker	56
6.1.1 Resumen estadístico	56
6.1.2 Análisis detallado del suceso con Riesgo Alto y consecuencias Muy Altas	59
6.1.3 Medidas para reducir el riesgo de los sucesos iniciadores con Riesgo Alto	59
6.1.4 Análisis de importancia de las defensas (barreras y reductores)	60
6.1.4.1 Importancia estructural de las barreras	60
6.1.4.2 Importancia estructural de los reductores de consecuencias	62
6.1.5 Conclusiones específicas para la práctica de gammagrafía en bunker	63
7 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN LA TÉCNICA DE RADIOGRAFÍA CON EQUIPOS DE RX MÓVIL	64
7.1 Resultados generales sobre la radiografía con Rx móvil	64
7.1.1 Resumen estadístico	64
7.1.2 Análisis de importancia de las defensas (barreras y reductores)	65
7.1.3 Análisis de importancia de reductores de consecuencias	68
7.1.4 Conclusiones específicas para la práctica de radiografía con Rx móvil	68
8 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN LA TÉCNICA DE RADIOGRAFÍA CON EQUIPOS DE RX EN BUNKER	68
8.1 Resultados generales sobre la radiografía con Rx en bunker	68
8.1.1 Resumen estadístico	68
8.1.2 Análisis de importancia de las defensas (barreras y reductores)	70
8.1.3 Análisis de importancia de reductores de consecuencias	72
8.1.4 Conclusiones específicas para la práctica de radiografía con Rx en bunker	72
9 CONCLUSIONES	73
9.1 Búsqueda sistemática y anticipativa	73
9.2 Identificación y cribado de lo importante	73
9.3 Sencillez del método y aplicabilidad en la práctica de radiografía	73
9.4 Confirmación del conocimiento existente	74
9.5 Consideraciones finales	74
9.5.1 Para los Usuarios	74

9.5.2	Para los Reguladores	74
10	REFERENCIAS	75
11	LISTA DE PARTICIPANTES	77

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las aplicaciones de las radiaciones ionizantes aportan muchos beneficios a la humanidad: desde la generación de energía hasta los usos en la medicina, la industria y la agricultura. Una de las aplicaciones industriales de las radiaciones de más larga data es el empleo de la radiografía para el ensayo no destructivo de elementos y equipos.

La radiografía industrial es un método de ensayo no destructivo (END), de gran utilidad para el control de calidad en trabajos de soldadura, forja y fundición, ya que pone de relieve defectos que pueden comprometer la utilidad de los productos acabados (recipientes de presión, líneas de tuberías, etc.) o bien limitar su vida en servicio.

Los sectores industriales de aplicación de la radiografía son diversos, comprende todos aquellos en que esté involucrado el empleo de sistemas, accesorios y componentes de materiales metálicos. Ejemplos de sectores en que se aplica: industria energética, aeronáutica, del petróleo, construcción, transporte, etc..

Con el fin de realizar el control de calidad de componentes metálicos o soldaduras, las instalaciones de radiografiado industrial utilizan las radiaciones ionizantes para la obtención de imágenes en forma de placas radiográficas (grafía) o mediante escopia (imagen dinámica obtenida con intensificador de imagen y que se recibe en un monitor de TV), para ello utilizan una máquina eléctrica generadora de radiaciones ionizantes, en particular de rayos X, (Rx) o a partir de un isótopo radiactivo (radionucleido) emisor de radiación gamma. Los Rx y rayos gamma forman parte del espectro de radiaciones electromagnéticas, son fotones, no tienen carga ni masa y se desplazan en línea recta a la velocidad de la luz.

Los Rx o gamma que llegan a la pieza a inspeccionar, sufren una atenuación al interactuar con la materia, según los siguientes mecanismos: Efecto fotoeléctrico, Compton y producción de pares. La atenuación es función de la densidad y masa atómica del material que atraviesa la radiación. Cuanto menor sea la masa atómica del material, más transparente será a esta radiación.

Los Rx y gamma afectan a una emulsión fotográfica del mismo modo que lo hace la luz (fotografía). La película o emulsión fotográfica se ennegrece en función de la energía depositada por la radiación, tras un tiempo determinado de exposición y una vez revelada convenientemente.

La radiografía industrial es responsable por elevadas estadísticas de accidentes radiológicos debidos a fallos de equipos, errores humanos, sucesos externos o combinaciones de ellos, los cuales han originado en ocasiones altas dosis, causando graves consecuencias para la salud, como quemaduras por radiación y, en algunos casos, la muerte de trabajadores ocupacionalmente expuestos y miembros del público. Asimismo, accidentes relacionados con problemas en la fabricación de las fuentes selladas, los efectos de la corrosión y deshermetización de las fuentes han provocado la contaminación de las personas y el medio ambiente.

La gammagrafía industrial, tiene la particularidad de ser la práctica en la que, por lo general, ocurre la mayor cantidad de accidentes radiológicos. No es casual que sea considerada una de las prácticas más riesgosa de las que habitualmente se realizan con el empleo de fuentes de radiación ionizante. Según reportes del Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Ionizantes (UNSCEAR), en alrededor del 40% de los accidentes nucleares o radiológicos ocurridos en todo el mundo, con consecuencias clínicas, estuvo la participación de la radiografía industrial. De 1951 a 2000, de los 211 casos reportados de la

industria no nuclear, 149 (70%) ocurrieron en el ámbito de la radiografía industrial, los cuales en la actualidad continúan ocurriendo [10, 11]. Desafortunadamente, a diferencia de los accidentes ocurridos en el área nuclear, estos sucesos no son conocidos con la misma precisión en la literatura, y es sabido además, que muchos de estos casos no son reportados, sobre todo si no tienen consecuencias para los individuos expuestos. Sin embargo, puede asegurarse que son, precisamente, eventos de este tipo los que suelen presentarse con mayor frecuencia.

Las evaluaciones de seguridad se realizan como medio para verificar el cumplimiento de los requisitos de seguridad (y de esa manera la aplicación de los principios fundamentales de seguridad) en todas las instalaciones y actividades y con el fin de determinar las medidas que serán necesarias adoptar para fortalecer la seguridad [12 y 13]. El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) concede gran importancia al permanente problema que significa para los usuarios y los reguladores en general, garantizar un elevado nivel de seguridad en la utilización de los materiales nucleares y las fuentes de radiaciones ionizantes en todo el mundo.

Existe abundante bibliografía con informes detallados de casos de las exposiciones accidentales más severas [1, 2, 3, 4, 5, 6] así como de una colección de resúmenes de exposiciones accidentales. [7 y 10] Estos informes han dado a conocer las lecciones aprendidas, las causas y factores que contribuyeron, los cuales permiten identificar medidas preventivas, tales como la necesidad de verificaciones redundantes e independientes de los aspectos identificados como críticos.

Estos estudios retrospectivos, aunque necesarios, no son suficientes, porque no contemplan otros accidentes, que no han ocurrido aún o no se han dado a conocer, pero que también son posibles. Se requiere por tanto, una metodología sistemática que se anticipe, y que identifique aspectos débiles o vulnerables en el proceso de radiografía industrial, con vistas a adoptar medidas que eviten las exposiciones accidentales.

Éste es el objeto del presente informe en el que se presenta una herramienta para la autoevaluación de los riesgos en la práctica de Radiografía Industrial, orientada a la prevención de errores o fallos que den lugar a exposiciones accidentales. Para aplicarla es imprescindible que participen las partes interesadas en la práctica de Radiografía (suministradores, operadores, personal de mantenimiento, clientes, etc.).

1.2 Objetivo del proyecto

El proyecto tiene como objetivo implementar técnicas de análisis de riesgos en las prácticas de radiografía industrial sean estas realizadas con fuentes radiactivas o Rx, para prevenir la ocurrencia de accidentes con consecuencias radiológicas adversas para trabajadores y miembros del público, que permitan identificar aquellas barreras o defensas que tienen mayor impacto en la reducción del riesgo, para fortalecer los procedimientos de evaluación e inspección de la autoridad reguladora en estas prácticas.

Objetivos específicos:

1. Disponer del perfil de riesgo de entidades hipotéticas de referencia en la práctica de radiografía industrial, adaptando e implementado el método de Matrices de Riesgo.
2. Adaptar la herramienta informática SEVRRRA, empleada en el análisis de riesgo en radioterapia, para facilitar la utilización a gran escala de este método, en entidades que realicen estas prácticas industriales.
3. Determinar cuáles son las secuencias accidentales de mayor riesgo, así como las barreras y reductores que mayor impacto tienen en la reducción del riesgo en estas prácticas, con el objetivo de proponer mejoras a los procedimientos de inspección y

autorización de la Autoridad Reguladora. [8, 9, 13 y 14]

1.3 Alcance

El proyecto se realiza por etapas, comenzando por la práctica de radiografía industrial que emplea fuentes radiactivas, como la más compleja de las que se abordará, por los riesgos que involucra, teniendo en cuenta la gran cantidad de incidentes y accidentes de tipo radiológico, ocurridos en los últimos tiempos.

La segunda parte del proyecto se extendió a la metodología del uso de generadores de Rx en radiografía industrial in situ, ampliando el número de técnicas involucradas, lo cual permite abarcar las técnicas de radiografía industrial más utilizadas.

Esta parte también incluye la radiografía en recintos blindados, con el uso de generadores de Rx y equipos de gammagrafía industrial.

Se destaca que dentro de las situaciones que se pueden presentar durante el uso de material radiactivo en la radiografía industrial, existen una gran variedad de eventos que pueden llevar a un incidente de tipo radiológico en el almacenamiento, durante el transporte, en la operación normal y en las tareas de mantenimiento, entre otros.

En el caso de empleo de Rx, estos eventos se reducen, al poder eliminar el término fuente de una manera simple, recordando que los riesgos más significativos ocurren principalmente durante la operación. Estas situaciones requieren diferentes análisis y por ende, multiplican las evaluaciones respecto del riesgo intrínseco de cada una de las técnicas empleadas.

1.4 Estructura del informe

En el capítulo 2 se describen los conceptos, definiciones y procesos necesarios para entender el método. En el capítulo 3 se describen las características de la Empresa de referencia de radiografía a la que se aplicó el método, y los resultados de esta aplicación se presentan en el capítulo 4. La discusión, análisis y recomendaciones que se derivan de dicha aplicación, se presenta en los capítulos 5, 6, 7 y 8, involucrando radiografía con fuentes radiactivas y con equipos generadores de Rx. Las conclusiones se presentan en el capítulo 9.

Finalmente en un segundo volumen de este informe se muestra una descripción detallada de la herramienta SEVRRA y los apéndices con las matrices completas de todas las secuencias accidentales analizadas.

2. MÉTODO

2.1 Conceptos y definiciones

En este estudio se aplicó la metodología de matrices de riesgo a una empresa genérica de radiografía industrial tomada como referencia. El método de la matriz de riesgo ha sido aplicado ampliamente en diferentes campos de la industria (química, petrolera, etc.), [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 24, 26] en el sector bancario y crediticio y más recientemente a procesos de diagnóstico y tratamiento en las prácticas radiológicas médicas como son la Radioterapia y la Medicina Nuclear [8, 9, 27, 28, 29]. Se utiliza como una herramienta para establecer prioridades en la gestión del riesgo de una instalación a partir del análisis combinado de la frecuencia de un evento indeseado y sus consecuencias. Este método, aunque no permite cuantificar el riesgo numéricamente, hace posible clasificarlo en niveles, lo cual resulta suficiente para establecer prioridades, sin necesidad de análisis de riesgos más precisos y que son mucho más costosos.

Para explicar el método se necesita definir primero una serie de términos y conceptos que se presentan en los apartados siguientes. Sin embargo, se puede anticipar una breve definición del mismo utilizando solamente el lenguaje común. Esto se hace en el cuadro siguiente.

La matriz de riesgo es un método sistemático, estructurado, simplificado y conservador que se basa en la aplicación de la ecuación del riesgo $R = f * P * C$ y consiste en evaluar la secuencia lógica en la cual ocurren los accidentes, considerando que un determinado error humano o fallo de equipo (suceso iniciador) ocurre con una frecuencia determinada (f); la instalación o actividad dispone de una o varias defensas o barreras (enclavamientos, alarmas o procedimientos) capaces de detectar y controlar el error o falla y actuar para evitar que el suceso iniciador se convierta en un accidente, sin embargo, siempre existe una determinada probabilidad (P) de que estas barreras puedan fallar, y en tal caso ocurrirá el accidente, y este se manifiesta con unas consecuencias determinadas (C). Para evaluar el riesgo, este método prevé subdividir cada una de las variables independiente de la ecuación de riesgo en varios niveles (Ejemplo: Alto, Medio, Bajo y Muy Bajo). En este sentido, la matriz de riesgo es una representación de todas las combinaciones de los niveles de f , P , C y del nivel de riesgo resultante. El nivel de riesgo resultante (R) se obtiene utilizando la combinación lógica de los diferentes niveles de las variables independientes así definidos, es decir, la frecuencia del suceso iniciador (f), la probabilidad de fallo de las defensas previstas (P) y la severidad de las consecuencias (C) que caracteriza a una determinada secuencia de accidente.

Este método no permite calcular numéricamente el riesgo, pero ello no impide utilizar sus resultados para identificar y priorizar medidas que permitan reducir el riesgo hasta niveles aceptables. Tiene la ventaja de que es relativamente fácil de aplicar en instalaciones y actividades con un mínimo de recursos materiales y humanos.

2.1.1 Riesgo

En el lenguaje común, riesgo es la posibilidad de un daño. De manera más cuantitativa y precisa, se define el riesgo mediante una expresión matemática que relaciona la frecuencia de un suceso, con la probabilidad de fallo de las defensas y con las consecuencias (el daño) que pueden producirse:

$$R = f * P * C,$$

en la que f es la frecuencia del suceso iniciador, P es la probabilidad de fallo de las barreras o defensas previstas y C es la severidad de las consecuencias. En mucha bibliografía la ecuación de Riesgo se muestra de forma más simplificada:

$$R = F * C,$$

en la que F es la frecuencia de la secuencia accidental ($F = f * P$) y C es la severidad de las consecuencias.

Pero en cualquier caso ambas ecuaciones son equivalentes.

Según esta definición, para valorar el riesgo asociado a cualquier actividad, hay que cuantificar el daño esperado y la probabilidad de que se produzca, y el producto resultante será el valor de dicho riesgo. El hecho de cuantificar el riesgo, o de clasificarlo en niveles, permite establecer un criterio de aceptabilidad, y poner un valor límite al mismo, por debajo del cual una instalación o un proceso se consideran aceptablemente seguros. Esto significa que aquellos sucesos cuyo daño sea muy grave, deben tener una probabilidad muy baja, a fin de que el riesgo sea aceptable, mientras que en el caso de sucesos cuyo daño sea leve se puede aceptar una probabilidad mayor.

2.1.2 Suceso iniciador de accidente

Se denomina suceso iniciador a todo fallo de equipo, error humano o suceso externo, que puede conducir a una exposición accidental si fallan las medidas previstas para prevenirla.

2.1.3 Secuencia accidental

La secuencia accidental es una cadena de acontecimientos que empieza con el suceso iniciador y puede culminar en un accidente. La secuencia accidental incluye el suceso iniciador, la actuación o fallo de las medidas de seguridad, la exposición accidental y la manifestación de posibles consecuencias. La matriz de riesgo efectúa una evaluación combinada del suceso iniciador, las medidas de seguridad y las consecuencias que conduce a valorar el riesgo que resulta.

2.1.4 Consecuencias

Las consecuencias son los posibles daños que se derivan como resultado del fallo de todas las defensas de seguridad, frente a la ocurrencia de un suceso iniciador. En la clasificación de las consecuencias se tomaron en cuenta la severidad de los efectos y el número de personas afectadas. La severidad puede abarcar desde una simple pérdida de la defensa en profundidad sin efectos negativos para la salud de las personas, hasta la muerte de la persona irradiada.

2.1.5 Barreras de seguridad o defensas

Las defensas son aquellas medidas previstas para evitar, prevenir, detectar, controlar y mitigar las consecuencias de un accidente una vez ocurrido el suceso iniciador. Las defensas pueden ser medidas técnicas u organizativas. Todas las defensas forman parte del principio de defensa en profundidad¹. En el estudio de seguridad es importante conocer y discernir entre las siguientes palabras clave:

Evitar: es impedir o hacer imposible que ocurra el suceso iniciador. Un ejemplo lo constituyen los dispositivos de “fallo seguro”, es decir aquéllos cuyo fallo conduce a una condición intrínsecamente segura. La automatización consistente en sustituir ciertas acciones humanas por control de software, eliminando la posibilidad de todos los sucesos iniciadores derivados de errores humanos.

Prevenir: es hacer que el suceso iniciador sea menos probable. Esta palabra clave se aplica generalmente a los “reductores de frecuencia”, que son aquellas medidas encaminadas a que la aparición del suceso iniciador tenga una frecuencia inferior.

Detectar y controlar: es detectar que el suceso iniciador ha ocurrido y actuar impidiendo que se produzcan las consecuencias no deseadas (exposición accidental). Estas palabras clave se aplican a las barreras directas, que se definen más abajo.

Detectar y mitigar: es identificar que el suceso iniciador ha ocurrido y actuar mitigando las consecuencias no deseadas ya sea disminuyendo la severidad del daño o el número de las personas afectadas. Las barreras destinadas a mitigar las consecuencias se tratan en el presente trabajo como “reductores de consecuencias”.

¹ Se define la defensa en profundidad como una filosofía de diseño y operación que consiste en la implementación de múltiples medidas de protección para prevenir y mitigar accidentes.

2.1.5.1 Clasificación según el tipo de medidas de seguridad

Las medidas de seguridad pueden ser dispositivos asociados al equipo (enclavamientos o bloqueos, o alarmas) o procedimientos que aumentan la fiabilidad de las acciones humanas.

Los enclavamientos son sistemas o dispositivos tecnológicos que cumplen una función de protección y son capaces de detectar automáticamente una condición insegura y actuar automáticamente para restablecer las condiciones de seguridad, (por ejemplo desactivar el haz de radiación, hacer retornar la fuente radiactiva a la posición segura dentro de su blindaje o impedir que la fuente salga de la posición segura). Como enclavamientos típicos podemos citar el enclavamiento de la puerta del bunker en radiografía, el conector del equipo de gammagrafía y el tubo guía, etc.).

Las alarmas son señales sonoras, visuales, etc. que advierten de la presencia de una condición insegura y facilitan la toma de decisiones por parte del operador, pero requieren de la participación humana. Dentro de esta categoría se encuentran los sistemas que alertan sobre una determinada condición de riesgo por ejemplo: lámpara o señal luminosa que alerta de elevados niveles de radiación, dosímetro de área con alarma adecuada a las condiciones de trabajo, etc.

Los procedimientos de trabajo son instrucciones escritas y aceptadas por todos, que describen cómo realizar las tareas del proceso de radiografía industrial, con el fin de evitar errores o desviaciones en las diferentes etapas de dicho proceso. Son ejemplos los protocolos de planificación de trabajos, procedimientos de manipulación de los equipos, procedimientos de delimitación de áreas, y en general una gran parte de las acciones del Sistema de Gestión de Calidad.

En razón de su robustez se clasifican en el siguiente orden, de mayor a menor:

Barreras de tipo 1: enclavamientos o bloqueos.

Barreras de tipo 2: alarmas.

Barreras de tipo 3: procedimientos de trabajo ejecutados por personas diferentes a quienes pueden desencadenar el suceso iniciador.

Barreras de tipo 4: procedimientos de trabajo ejecutados por la misma persona que desencadena el suceso iniciador, pero en etapas o momentos diferentes.

2.1.5.2 Clasificación según el momento de actuación en la secuencia accidental

Las medidas de seguridad se pueden clasificar también en función del momento en que se produce su actuación respecto a la secuencia accidental.

Reductores de frecuencia: son aquellas medidas encaminadas a evitar y prevenir que ocurra un suceso iniciador; por lo tanto actúan antes de que el suceso iniciador haya ocurrido. Su eficacia se manifiesta en una reducción de la frecuencia de dicho suceso. Ejemplo de reductores de frecuencia son: la capacitación de los operadores, mantener la carga de trabajo a un nivel moderado, establecer un ambiente de trabajo propicio a la concentración sin distracciones y el realizar mantenimiento preventivo, entre otros.

Barreras: son aquellas medidas encaminadas a detectar el suceso iniciador e impedir sus consecuencias, tales como una exposición accidental. Por lo tanto, las barreras directas actúan después de que el suceso iniciador haya ocurrido y antes de que tengan lugar sus consecuencias. Ejemplo de barreras directas son: los procedimientos de revisión redundante, el bloqueo del equipo de gammagrafía que impide extraer la fuente, enclavamiento (interruptor) de parada del equipo de radiografía con Rx a la entrada del bunker, entre otras.

Reductores de consecuencias: son aquellas medidas encaminadas a detectar y mitigar las consecuencias de una exposición accidental. Los reductores de consecuencias actúan después de que haya ocurrido el suceso y se hayan comenzado a manifestar las consecuencias. Un ejemplo de reductores de consecuencias es el plan de emergencias.

Observación importante: hay medidas de tipo muy general que refuerzan tanto las barreras directas como los reductores de frecuencia o de consecuencias. Tal es el caso de la medida consistente en “mantener una carga de trabajo a nivel moderado”. Esta medida permite que las acciones humanas sean más cuidadosas y reduce errores humanos, tanto los que constituyen un suceso iniciador, como los errores que causarían el fallo de una barrera directa o la omisión de estas. Según la etapa en que la acción humana se ejecute, el nivel moderado de carga de trabajo habrá contribuido a reforzar una barrera directa o un reductor.

2.2 Descripción del método

Para aplicar el método de la matriz de riesgo es preciso evaluar cada secuencia de eventos que desencadena cada suceso iniciador (secuencia accidental). La figura 1 muestra cómo un determinado error humano o fallo de equipo (suceso iniciador), que ocurre con una frecuencia determinada (f), puede dar lugar a las consecuencias indeseadas postuladas.

Existirán en el equipo, la instalación o en los procedimientos de trabajo una serie de defensas, que pueden consistir en enclavamientos, alarmas o procedimientos, capaces de detectar el problema e impedir que el suceso iniciador se convierta en un accidente [12, 13 y 14]. Sin embargo, cada una de estas barreras puede fallar con una determinada probabilidad (P), en cuyo caso ocurriría el accidente, que se manifestaría en unas consecuencias determinadas (C).

La magnitud que mejor caracteriza finalmente la secuencia accidental es el riesgo (R), que es función de las tres variables independientes, la frecuencia del suceso iniciador, la probabilidad de fallo de las barreras y la severidad de las consecuencias. Esta función se muestra también en la figura 1. En el método de la matriz de riesgo, las variables independientes de la ecuación de riesgo no se cuantifican, sino que se clasifican en 5 niveles que van desde muy bajo hasta muy alto. En este trabajo se seleccionaron cuatro de esos 5 niveles para cada una de las variables independiente con el objetivo de lograr una matriz de 64 combinaciones posibles.

Las variables frecuencia y probabilidad de fallo de barreras tienen los niveles alto (A), medio (M), bajo (B), y muy bajo (MB) mientras que para la variable “consecuencias” se han tomado consideraciones más conservadoras seleccionando los niveles muy alto (MA), alto (A), medio (M) y bajo (B). Los criterios para asignar estos niveles se describen en los apartados comprendidos entre el 2.2.1 y el 2.2.4.

Dichos niveles fueron asignados por un grupo multidisciplinario de expertos, formado por operadores, asistentes, responsables por la seguridad radiológica e ingenieros especialistas en radiografía industrial. Ellos han utilizado los criterios mencionados anteriormente y la experiencia de estas personas ofrece una mayor objetividad al proceso.

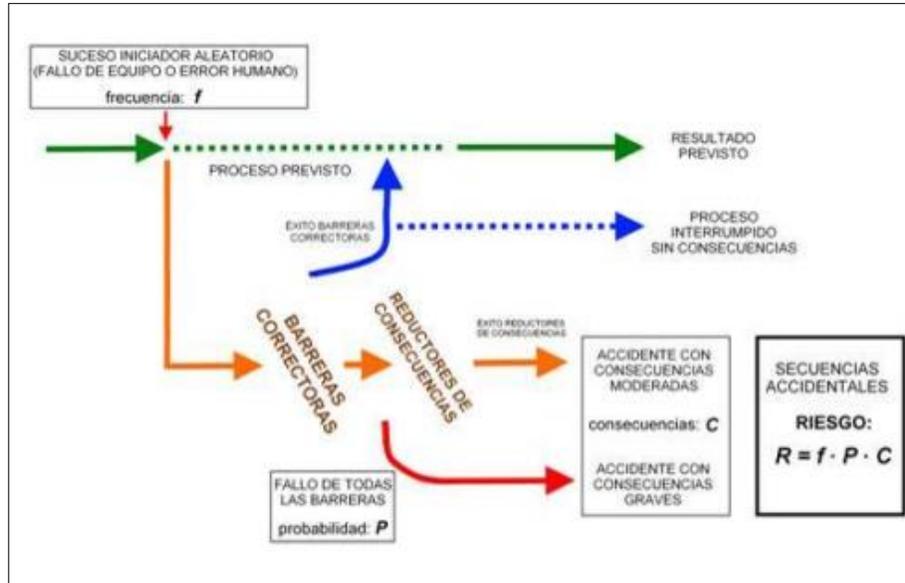


Figura 1. Secuencia típica de las exposiciones accidentales.

2.2.1 Forma de combinar las variables

La matriz de riesgo es una representación de todas las combinaciones de los niveles de f , P y C , y del nivel resultante de riesgo. El nivel de riesgo (R) se obtiene combinando los diferentes niveles de las variables independientes, es decir la frecuencia del suceso iniciador (f), la probabilidad de fallo de las defensas previstas (P) y la severidad de las consecuencias (C), de acuerdo con el siguiente método para efectuar las combinaciones:

Primero se combinan dos variables independientes (f y P) y el resultado se combina a su vez con la tercera variable C , dando así el nivel de la variable dependiente, es decir el nivel de riesgo R .

Si se combinan variables del mismo nivel, por ejemplo, “Alto”, la combinación resultante tendrá el mismo nivel, es decir, “Alto”.

Si se combinan variables, de dos niveles diferentes contiguos, por ejemplo “Medio” y “Alto”, el nivel resultante será el nivel más conservador, por ejemplo, en este caso “Alto”.

Si se combinan variables de dos niveles distinto no contiguos, por ejemplo “Bajo” y “Alto”, el nivel resultante será el nivel intermedio entre ambos. Por ejemplo, en este caso, “Medio”.

Cuando las variables que se combinan tienen entre sí más de un nivel intermedio, se plantea la necesidad de decidir entre ambos. Estudiemos, por ejemplo la combinación de $f_B * P_B * C_{MA}$. El nivel de $f * P$ es B y entre éste y el nivel de las consecuencias, MA , existen dos intermedios, el M y el A . En este tipo de casos la decisión se basa en dar mayor peso al nivel de la variable probabilidad. Éste es B en este ejemplo, y según se verá más adelante, ello quiere decir que existen tres barreras, que en general son suficientes para que el riesgo de esta secuencia no sea alto.

El número de combinaciones de las tres variables y cuatro niveles en cada una es de 64 combinaciones diferentes, y se representan en forma de matriz en la tabla 1 (la matriz de riesgo). Los cuatro niveles de riesgo definidos en este estudio son:

R_{MA} : Riesgo posiblemente “muy alto”.

R_A : Riesgo posiblemente “alto”.

R_M : Riesgo “medio”.

R_B : Riesgo “bajo”.

Se introdujo la expresión “posiblemente”, debido a que, como se acaba de ver, la matriz es conservadora, y el nivel de riesgo que resulta de aplicar la matriz (primer cribado) no es el definitivo, es decir, el riesgo real puede ser inferior al asignado por la matriz y por tanto la expresión “posiblemente” es necesaria para R_{MA} y R_A . En cambio, no es necesario decir “posiblemente” para los dos niveles inferiores, porque, si a pesar de ser conservadora la matriz, el riesgo asignado no es alto, con certeza el riesgo real no lo será.

TABLA 1. MATRIZ DE RIESGO

f_A	P_A	C_{MA}	R_{MA}
f_M	P_A	C_{MA}	R_{MA}
f_B	P_A	C_{MA}	R_A
f_{MB}	P_A	C_{MA}	R_A
f_A	P_M	C_{MA}	R_{MA}
f_M	P_M	C_{MA}	R_A
f_B	P_M	C_{MA}	R_A
f_{MB}	P_M	C_{MA}	R_A
f_A	P_B	C_{MA}	R_A
f_M	P_B	C_{MA}	R_A
f_B	P_B	C_{MA}	R_M
f_{MB}	P_B	C_{MA}	R_M
f_A	P_{MB}	C_{MA}	R_A
f_M	P_{MB}	C_{MA}	R_M
f_B	P_{MB}	C_{MA}	R_M
f_{MB}	P_{MB}	C_{MA}	R_M
f_A	P_A	C_A	R_{MA}
f_M	P_A	C_A	R_A
f_B	P_A	C_A	R_A
f_{MB}	P_A	C_A	R_A
f_A	P_M	C_A	R_A
f_M	P_M	C_A	R_A
f_B	P_M	C_A	R_A
f_{MB}	P_M	C_A	R_M
f_A	P_B	C_A	R_A
f_M	P_B	C_A	R_A
f_B	P_B	C_A	R_M
f_{MB}	P_B	C_A	R_M
f_A	P_{MB}	C_A	R_M
f_M	P_{MB}	C_A	R_M
f_B	P_{MB}	C_A	R_B
f_{MB}	P_{MB}	C_A	R_B
f_A	P_A	C_M	R_A
f_M	P_A	C_M	R_A
f_B	P_A	C_M	R_M
f_{MB}	P_A	C_M	R_M
f_A	P_M	C_M	R_A
f_M	P_M	C_M	R_M
f_B	P_M	C_M	R_M
f_{MB}	P_M	C_M	R_M
f_A	P_B	C_M	R_M
f_M	P_B	C_M	R_M
f_B	P_B	C_M	R_M
f_{MB}	P_B	C_M	R_M
f_A	P_{MB}	C_M	R_M
f_M	P_{MB}	C_M	R_M
f_B	P_{MB}	C_M	R_B
f_{MB}	P_{MB}	C_M	R_B
f_A	P_A	C_B	R_M
f_M	P_A	C_B	R_M
f_B	P_A	C_B	R_M
f_{MB}	P_A	C_B	R_M
f_A	P_M	C_B	R_M
f_M	P_M	C_B	R_M
f_B	P_M	C_B	R_B
f_{MB}	P_M	C_B	R_B
f_A	P_B	C_B	R_B
f_M	P_B	C_B	R_B
f_B	P_B	C_B	R_B
f_{MB}	P_B	C_B	R_B
f_A	P_{MB}	C_B	R_B
f_M	P_{MB}	C_B	R_B
f_B	P_{MB}	C_B	R_B
f_{MB}	P_{MB}	C_B	R_B

2.2.2 Criterio para asignar niveles de frecuencia a los sucesos iniciadores

En los estudios de riesgo se asume que los sucesos iniciadores ocurren de forma aleatoria en el tiempo con una frecuencia constante (modelo Poisson). Los registros de incidentes o accidentes pueden ser la aproximación más objetiva para la estimación de la frecuencia de un determinado suceso, siempre que se tome el número de errores humanos o fallos de equipos ocurridos y se promedie en un año. Sin embargo, lamentablemente los registros existentes no son suficientemente fiables como para tomarlos como base de la estimación de la frecuencia.

Es por este motivo que, aunque no es imprescindible hacer estimaciones numéricas para dar una clasificación orientativa, cuando se desea reducir la subjetividad de los expertos, se puede efectuar una valoración semicuantitativa de esta magnitud basada en valores de tasa de fallo y probabilidades de errores humanos publicados en la bibliografía [25, 26 y 27].

Para determinar la frecuencia (f) de los iniciadores provocados por fallo de equipo puede utilizarse la siguiente ecuación:

$$f = \frac{2n + 1}{2T} \quad [4]$$

Donde:

n : es el número de fallos

T : intervalo de tiempo en el que ocurren los n fallos (expresado en años).

Cuando los iniciadores son originados por errores humanos, la frecuencia puede calcularse utilizando la siguiente ecuación:

$$f = P_{EH} f_T \quad [5]$$

Donde:

P_{EH} : probabilidad de error humano por tarea

f_T : frecuencia anual con que se realiza la tarea

En dicha bibliografía se pueden encontrar valores de tasa de fallo para los diferentes tipos de fallos de equipos y probabilidades de errores humanos que, aunque no son específicos para el proceso la práctica de la Radiografía Industrial, pueden ser utilizados con una buena aproximación para la finalidad de este trabajo.

En la tabla 7 se muestran valores típicos de P_{EH} según las características de la actividad que se realiza.

En la metodología aplicada en este estudio, los valores de frecuencia del suceso iniciador se clasifican desde Muy Baja hasta alta del siguiente modo:

- Frecuencia Alta (f_A): El suceso ocurre frecuentemente.
- Frecuencia Media (f_M): El suceso ocurre ocasionalmente.
- Frecuencia Baja (f_B): Es poco usual o raro que ocurra el suceso iniciador, aunque se presupone que ha ocurrido.
- Frecuencia Muy Baja (f_{MB}): Es muy raro que ocurra el suceso iniciador. No se tiene conocimiento de que haya ocurrido, pero se considera remotamente posible.

Para facilitar la asignación de niveles y reducir la subjetividad se utilizaron los criterios semicuantitativos siguientes:

TABLA 2. CRITERIOS PARA LA ASIGNACIÓN DE LOS NIVELES DE FRECUENCIA

Frecuencia cualitativa	Acrónimo	Probabilidad de ocurrencia del iniciador	Número de sucesos por año (considerando una carga de trabajo de 1000 radiografías por año)
Alta	f_A	$P \geq 1/10$	Más de 50 por año $F \geq 50$
Media	f_M	$1/1000 < P < 1/10$	Entre 1 y 50 por año $1 \leq F < 50$
Baja	f_B	$1/100000 < P < 1/1000$	Entre 1 por año y 1 cada 100 años $0.01 \leq F < 1$
Muy Baja	f_{MB}	$P < 1/100000$	Menos de 1 cada 100 años $F < 0.01$

Al establecer los valores de frecuencia de los sucesos iniciadores se tomó en cuenta la experiencia internacional [6, 7, 10 y 11] y particularmente la experiencia de los países participantes.

2.2.3 Criterio para asignar los niveles de las consecuencias

Para asignar los niveles de consecuencias (C) se parte de suponer que ya ha ocurrido el suceso iniciador y coincidentemente han fallado todas las barreras. Los sucesos iniciadores identificados pueden tener consecuencias para trabajadores y público, aunque con diferente impacto en el caso de los trabajadores, ya que éstos pueden recibir dosis considerablemente más altas. Por esto en muchos casos un mismo suceso iniciador se desdobra en 2 secuencias accidentales una para evaluar el riesgo de ese suceso en los trabajadores y otra para evaluar el riesgo de ese suceso en el público.

En el presente estudio se define una sola escala de consecuencias para trabajadores y públicos atendiendo a que las condiciones en que ocurren los accidentes y basados en [6, 7, 10 y 11].

2.2.3.1 Consecuencias para los trabajadores y público

- 1- *Muy altas, catastróficas o muy graves (C_{MA}):* Son aquéllas que provocan efectos deterministas severos, siendo mortales o causantes de un daño permanente que reduce la calidad de vida de las personas afectadas.
- 2- *Altas o Graves (C_A):* Son aquéllas que provocan efectos deterministas, pero que no representan un peligro para la vida y no producen daños permanentes a la calidad de vida.
- 3- *Medias o moderadas (C_M):* Son aquéllas que provocan exposiciones anómalas (o no previstas como normales, es decir, superan las restricciones de dosis o el límite de dosis establecidos en las regulaciones) que están por debajo de los umbrales de los efectos deterministas. Sólo representan un aumento de la probabilidad de ocurrencia de efectos estocásticos.
- 4- *Bajas (C_B):* No se producen efectos sobre los trabajadores y público, pero se degradan las medidas de seguridad.

2.2.4 Criterio para asignar la probabilidad de fallo al conjunto de barreras

El análisis de las defensas existentes consiste en identificar qué reductores de frecuencia del suceso iniciador, barreras directas y reductores de consecuencias existen para prevenir, controlar y mitigar cada secuencia accidental analizada. En el método de la matriz de riesgo se asigna un nivel a la probabilidad de fallo del conjunto de barreras, que, como se ha mencionado en 2.1.4.2, sirven para detectar un determinado suceso iniciador e impedir que ocurra el accidente.

La probabilidad de fallo del conjunto de barreras está dada por el producto de la probabilidad de fallo de cada una de las barreras existentes ($p = p_1 * p_2 * p_3 * p_n$), suponiendo que las barreras sean independientes entre sí. Una importante simplificación del método consiste en que todas las barreras son independientes y con igual probabilidad de fallo. Puesto que cada uno de los p_i es menor que la unidad, el producto, es decir, la probabilidad total, es tanto menor cuanto mayor sea el número de barreras. Por tanto, se pueden establecer los niveles decrecientes de “ p ” en función del número creciente de barreras directas tal y como se muestra a continuación:

Alta (P_A): No hay ninguna barrera de seguridad.

Media (P_M): Hay una o dos barreras de seguridad.

Baja (P_B): Hay tres barreras de seguridad.

Muy Baja (P_{MB}): Hay cuatro o más barreras de seguridad.

2.2.5 Criterio para elaborar el listado de sucesos iniciadores

Son muchas las metodologías para identificar los peligros potenciales asociados a una actividad. Las principales diferencias entre unas y otras radican habitualmente en el mayor o menor rigor y precisión de las técnicas y herramientas con las que trabajan, la información de partida que precisan, y como consecuencia de todo ello, el nivel de detalle de los resultados que se obtengan.

Los tres métodos de identificación de sucesos iniciadores más reconocidos, sistemáticos y estructurados son el Análisis de Modos y *Efectos de Fallo (FMEA)*, el *Análisis de peligros y operatividad (HAZOP)*, así como el análisis “¿*Qué pasaría si ...?*”. La identificación de peligros debe realizarse para el proceso completo, cuestionando sistemáticamente cada parte del mismo, con el objetivo de determinar cualquier peligro posible y sus causas.

Se identifican dos tipos de peligros o sucesos:

- Sucesos que desencadenan o inician un accidente: requieren ser interceptados por las defensas previstas para prevenir o mitigar las consecuencias indeseadas.
- Sucesos que hacen fallar alguna de las medidas de seguridad existentes: degradan la calidad de dichas medidas que se interponen a la evolución del suceso iniciador hacia un accidente.

En el análisis de riesgo conviene separar los sucesos iniciadores de los fallos de las defensas, para que la evaluación pueda centrarse en el análisis de las secuencias accidentales desencadenadas por sucesos iniciadores. Por otra parte, a menudo el volumen de detalle que se obtiene de la aplicación de la técnica de identificación de peligros es muy grande y los sucesos iniciadores se agrupan para reducirlos a un número que resulte manejable, sin que se pierda ninguna información significativa.

Los listados de sucesos iniciadores presentados en los Apéndices I al IV de este documento se basaron en los resultados de FMEA realizados a una empresa hipotética que realiza las técnicas de Gammagrafía Móvil, Gammagrafía en Bunker, Radiografía con equipos de Rx

Móvil y Radiografía con Rx en Bunker. En todos los casos los listados genéricos que se elaboraron fueron complementados con la información siguiente²:

- Sucesos iniciadores ocurridos en otras instalaciones, publicados en [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10 y 11].
- Experiencia de los expertos participantes sobre sucesos ocurridos en los países participantes, aun cuando dichos sucesos no hayan acabado en accidente, gracias a la actuación de los dispositivos y medidas de seguridad.

2.2.6 Obtención del nivel de riesgo para cada secuencia accidental

Una vez evaluadas las variables independientes de la ecuación del riesgo, f , p y C y asignados sus correspondientes niveles, se las introduce en la matriz de riesgo y se toma la lectura del riesgo resultante directamente de la tabla 1, a partir de la combinación de los niveles de dichas variables independientes. Este proceso se realiza para cada suceso iniciador identificado y se obtiene así la lista de niveles de riesgo resultante para todas las secuencias accidentales.

A todas las secuencias cuyo riesgo inicial resulte ser alto o muy alto se las selecciona para su análisis posterior, obteniéndose así la primera fase del cribado mencionado anteriormente. Los métodos para efectuar el análisis posterior (segundo cribado), junto con los criterios de aceptabilidad del riesgo se establecen en los apartados 2.2.7 y 2.2.8. Es preciso puntualizar que mediante la metodología se facilita la clasificación de las secuencias accidentales en niveles de riesgo, pero no proporciona valores de riesgo. Esto significa que el hecho de que dos secuencias accidentales caigan en un mismo intervalo de riesgo no quiere decir que sean de igual riesgo.

2.2.7 Aceptabilidad del riesgo

Hasta aquí la aplicación de la metodología de la matriz de riesgo es conservadora, no sólo porque lo son, las reglas para combinar los niveles de las variables independientes, sino también porque como se ha descrito en 2.2.4, la asignación del nivel de probabilidad de fallo al conjunto de las barreras se basa sólo en su número y no en su calidad y robustez.

El nivel de riesgo obtenido por medio de la matriz podría ser, por tanto, superior al real. Esto tiene la finalidad de no dejar sin análisis posterior a ninguna de las secuencias que posiblemente lo requieran. Este enfoque conservador quedará en parte corregido por el posterior estudio de la robustez de las barreras, reductores de frecuencia y consecuencias. Una vez efectuado el primer cribado y el análisis es preciso contar con criterios de aceptabilidad del riesgo, requiriéndose reforzar las medidas de seguridad para las secuencias que no cumplen con los criterios de aceptabilidad.

La primera prioridad se asigna a la adopción de medidas adicionales para aquellas secuencias accidentales, cuyo riesgo resulta ser “Muy Alto” y “Alto”. La segunda prioridad la tiene el análisis de los sucesos cuyo nivel de riesgo sea “Medio”, en especial los de consecuencias altas y muy altas, lo cual representa una mejora continua, parte de un proceso de optimización, llevando a la seguridad a un grado mayor que el estrictamente imprescindible.

²Esta lista es aplicable a una empresa referencia e hipotética definida en este estudio. Por lo tanto, debe ser adaptada al proceso propio de radiografía industrial que se analiza, añadiendo más iniciadores si fuera necesario o eliminando aquellos que no sean aplicables a dicho proceso.

TABLA 3. CRITERIOS DE ACEPTABILIDAD DEL RIESGO Y ACCIONES CORRECTORAS

Intervalo de Riesgo	Tolerabilidad del Riesgo	Acciones
R_{MA}	Inaceptable	Se requiere paralizar la práctica y que se tomen las medidas necesarias para reducir el riesgo antes del reinicio de los trabajos.
R_A	Inaceptable si las consecuencias son altas o muy altas	Se requieren medidas inmediatas para reducir el riesgo o tendrá que paralizarse la práctica.
	Inaceptable, tolerable temporalmente bajo determinadas condiciones si las consecuencias son medias	Se requieren medidas para reducir el riesgo en un plazo apropiado de tiempo.
R_M	Tolerable según análisis costo/beneficio	Deben introducirse las mejoras o medidas que reduzcan el riesgo lo más bajo posible considerando criterios de costo/beneficio.
R_B	Despreciable	No se requerirán acciones o medidas adicionales de seguridad.

2.2.8 Análisis de resultados del cribado y acciones correctoras

Como se acaba de explicar, el primer paso del análisis de resultados es el de reevaluar el nivel de riesgo de aquellas secuencias accidentales que no cumplen con los criterios de aceptabilidad del riesgo (R_{MA} y R_A) y su vez analizar aquellas secuencias accidentales que tienen nivel de riesgo tolerable (R_M) pero que pudieran pasar a un nivel de Riesgo Bajo considerando la calidad o robustez de las barreras y de los reductores de frecuencia y de consecuencias.

La finalidad sería lograr identificar aquellas medidas de seguridad que se requieren implementar para que todas las secuencias cumplan el criterio de aceptabilidad de riesgo, y a su vez reducir el mismo hasta niveles despreciables atendiendo a criterios de costo-beneficio.

Para realizar este análisis de una manera sistemática la metodología incluye un conjunto de preguntas clave que se presentan en el siguiente cuadro:

PREGUNTAS A RESPONDER EN EL ANÁLISIS DE LAS SECUENCIAS DE NIVEL DE RIESGO INACEPTABLE

1. ¿Son suficientemente robustas las barreras directas existentes como para asignar a la probabilidad de fallo del conjunto de barreras un nivel de P menor que el que corresponde según el criterio establecido en la metodología?
2. ¿Son suficientemente robustos los reductores de frecuencia y de consecuencias como para asignar un nivel de frecuencia f y consecuencias C menor que el que

corresponde según el criterio establecido en la metodología?

3. ¿Es posible introducir nuevas barreras o reductores de frecuencia o consecuencias?

4. ¿Qué medidas deben proponerse para disminuir globalmente el riesgo?

2.2.8.1 Pregunta primera. Barreras directas: ¿son suficientemente robustas las barreras directas existentes como para asignar a la probabilidad de fallo del conjunto de barreras un nivel de P menor que el que corresponde según el criterio establecido en la metodología?

Esta primera pregunta del análisis tiene como objetivo hacer más realista la evaluación de esta variable p de la ecuación de riesgo ya que la probabilidad de fallo del conjunto de barreras depende fuertemente del tipo de barrera que actúa en la secuencia accidental que se analiza.

Los enclavamientos son el tipo de barreras más robusto, seguidos por las alarmas y después los procedimientos. Otros elementos importantes al evaluar la robustez de las barreras son los principios de independencia y diversidad.

Por ejemplo, un grupo de barreras basadas en procedimientos es más robusto si las acciones detalladas en dichos procedimientos son realizadas por personas diferentes o si los mismos se ejecutan en etapas o momentos diferentes.

En la tabla 4 se muestra un procedimiento alternativo que incluye unos factores para evaluar la robustez del conjunto de barreras y puede servir como referencia para auxiliar a los expertos durante la evaluación de la pregunta primera.

La aplicación de estos factores de robustez de las barreras permite establecer criterios para discernir si el conjunto de barreras es suficientemente robusto. Estos criterios pueden ser los siguientes:

TABLA 4. CRITERIOS PARA EVALUAR LA ROBUSTEZ DEL CONJUNTO DE BARRERAS. METODOLOGÍA DE LA MATRIZ DE RIESGO.

No	Tipo de Barrera	Robustez expresada en puntos
1	Barreras tipo 1: Enclavamientos o bloqueos	32
2	Barreras tipo 2: Alarmas	16
3	Barreras tipo 3: Procedimiento de trabajo que se ejecuta por personas diferentes	8
4	Barreras tipo 4: Procedimiento de trabajo que ejecuta la misma persona, pero en etapas o momentos diferentes	4

Para probabilidad de fallo p_M :

- Se considera robusto el conjunto de barreras si $p_1 * p_2 \geq 32$ puntos. Ello permite reclasificar la probabilidad desde p_M hasta p_B .
- Se considera que el conjunto de barreras es muy robusto si $p_1 * p_2 > 64$ puntos. Ello permite reclasificar la probabilidad desde p_M hasta p_{MB} .

Para probabilidad de fallo p_B :

- Se considera robusto el conjunto de barreras si $p_1 * p_2 * p_3 > 64$ puntos. Ello permite reducir la probabilidad desde p_B hasta p_{MB} .

2.2.8.2 Pregunta segunda. Robustez de los reductores: ¿Son suficientemente robustos los reductores de frecuencia y de consecuencias como para asignar un nivel de frecuencia f y consecuencias C menor que el que corresponde según el criterio establecido en la metodología?

Este análisis tiene como objetivo tomar en consideración los reductores de frecuencia y de consecuencias que forman parte del principio de defensa en profundidad.

Aunque dichos reductores no fueron tenidos en cuenta al asignar niveles a las variables f y C , toda reducción en los niveles de f y C implica una reducción del riesgo resultante.

Reductores de frecuencia

Para evaluar la influencia de la robustez del conjunto de reductores de frecuencia hay que considerar que no todos los reductores de frecuencia tienen la misma robustez.

En la tabla 5 se muestra un procedimiento alternativo que incluye unos factores para evaluar la robustez del conjunto de reductores de frecuencia y puede servir como referencia para auxiliar a los expertos durante la evaluación de la segunda pregunta.

La aplicación de estos factores de robustez de los reductores de frecuencia permite establecer criterios para discernir si el conjunto de estos reductores es suficientemente robusto. Estos criterios pueden ser los siguientes:

- Si la multiplicación de la robustez de los reductores de Frecuencia es mayor o igual que 32 Puntos ($R_1 * R_2 * R_3 * \dots * R_n \geq 32$) es posible reducir un nivel de Frecuencia, es decir: por ejemplo, de FA pasa a FM.
- Si la multiplicación de la robustez de los reductores de Frecuencia es mayor que 64 Puntos ($R_1 * R_2 * R_3 * \dots * R_n > 64$) es posible reducir dos niveles de Frecuencia, es decir: por ejemplo, de FA pasa a FB.

En ambos casos no se permite alcanzar el nivel de frecuencia más bajo (FMB) para el caso de sucesos derivados de errores humanos.

TABLA 5. CRITERIOS PARA EVALUAR LA ROBUSTEZ DEL CONJUNTO DE REDUCTORES DE FRECUENCIA. METODOLOGÍA DE LA MATRIZ DE RIESGO.

Descripción general RF	Robustez	Peso
Mejoras tecnológicas	Muy Robusta	32
Señales	Robusta	16
Protocolos y carga de trabajo	Normal	8
Formación	Blanda	4

Reductores de consecuencias

Para evaluar la influencia de la robustez del conjunto de reductores de consecuencia hay que considerar que no todos los reductores de frecuencia tienen la misma robustez.

En la tabla 6 se muestra un procedimiento alternativo que incluye unos factores para evaluar la robustez del conjunto de reductores de consecuencias y puede servir como referencia para auxiliar a los expertos durante la evaluación de la segunda pregunta.

La aplicación de estos factores de robustez de los reductores de consecuencia permite establecer criterios para discernir si el conjunto de estos reductores es suficientemente robusto. Estos criterios pueden ser los siguientes:

Si la multiplicación de la robustez de los reductores de Consecuencia es mayor que 64 Puntos ($R_1 * R_2 * R_3 * \dots * R_n > 64$) es posible reducir un nivel de Consecuencia, es decir: por ejemplo, de CMA pasa a CA. No se permite la reducción del nivel de consecuencias de CM hasta CB ya que, por definición, las Consecuencias Bajas no pueden obtenerse por vía de los reductores de consecuencia.

TABLA 6. CRITERIOS PARA EVALUAR LA ROBUSTEZ DEL CONJUNTO DE REDUCTORES DE CONSECUENCIAS. METODOLOGÍA DE LA MATRIZ DE RIESGO.

Descripción general RC	Robustez	Peso
Enclavamientos	Muy Robusta	32
Alarmas	Robusta	16
Protocolos y procedimientos	Normal	8
Planes de Emergencias	Blanda	4

2.2.8.3 Pregunta tercera. Barreras y reductores adicionales ¿Es posible introducir nuevas barreras o nuevos reductores de frecuencia o de consecuencias?

Este análisis tiene por objetivo proponer nuevas medidas de seguridad para reducir el riesgo de la secuencia accidental analizada. La inclusión de estas nuevas medidas debe sugerirse a partir de la experiencia de las buenas prácticas internacionales y sobre la base de un criterio costo-beneficio.

Toda nueva medida que se introduzca implica un costo para la empresa y es por ello, que antes de implementarla, debemos responder las dos primeras preguntas. Además, es preciso que cualquier nueva medida de seguridad esté armonizada con el resto de las medidas y con el proceso de radiografía industrial en sí.

2.2.8.4 Pregunta cuarta. Disminución global del riesgo y conclusiones: ¿Qué medidas deben proponerse para disminuir globalmente el riesgo?

La respuesta a esta pregunta permite definir sobre qué variable independiente de la ecuación de riesgo (f, p, C) se debe actuar en cada secuencia accidental para reducir el riesgo hasta un nivel de seguridad aceptable con el menor gasto de recursos.

TABLA 7. VALORES TÍPICOS DE PROBABILIDAD DE ERRORES HUMANOS

Tipo de error	Tipo de Comportamiento	Características de la tarea	Probabilidad de error humano
1	Errores extraordinarios: que no se espera que puedan ocurrir, si el operador trabaja sin estrés.		10E-5 (1 en 100,000)
2	Errores en tareas simples realizadas regularmente en lugares habituales, con mínimo estrés.		10E-4 (1 en 10,000)
3	Errores de comisión: tales como la operación del botón erróneo o la lectura de la pantalla errónea. Tarea más compleja, menos tiempo disponible, son necesarios algunos indicios.	Sencilla bajo estrés	10E-3 (1 en 1,000)
		Compleja libre de estrés	3*10E-3 (3 en 1,000)
		Compleja y bajo estrés	6*10E-3 (6 en 1,000)
		Monótona	9*10E-3 (9 en 1,000)
4	Error de omisión: en los que existen dependencia de indicios y memoria circunstanciales. Tarea compleja, no familiar, con poca retroalimentación y algunas distracciones.	Sencilla bajo estrés	10E-2 (1 en 100)
		Compleja libre de estrés	3*10E-2 (3 en 100)
		Compleja y bajo estrés	6*10E-2 (6 en 100)
		Monótona	9*10E-2 (9 en 100)
5	Tareas muy complejas, estrés considerable, poco tiempo para su ejecución.		10E-1 (1 en 10)
6	Procesos que involucran pensamiento creativo: operación compleja y no familiar en las que el tiempo es corto y el estrés es elevado.		10E-1 to 1

(*) Estos valores genéricos en función del tipo de tareas, están tomados de: "Human error probability" de la Annual Conference of Major Risk Facilities, Australia, 2008.

2.2.9 Análisis de importancia de las defensas (barreras y reductores).

En los apartados anteriores se han comentado las secuencias accidentales de mayor riesgo, lo cual es útil para conocer el perfil de riesgo de la instalación, pero existen otros aspectos destacables en la reducción del riesgo, tales como la importancia estructural. Se define el índice de importancia estructural como el cociente entre el número de secuencias en las que interviene una defensa y el número total de secuencias. Este indicador se considera muy útil ya que al identificar las barreras y reductores que participan en un mayor número de iniciadores, se puede

valorar la utilidad de mantenerlas operativas. Enfocando los esfuerzos en una determinada defensa se estaría actuando sobre la reducción del riesgo de muchos iniciadores.

2.2.10 Herramienta Informática SEVRRRA (Sistema de Evaluación de Riesgo Radiológicos). Modelación de la Empresa de referencia de Radiografía Industrial en SEVRRRA).

La herramienta SEVRRRA (registrada por la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias de México) surgió, en un principio, para facilitar a los usuarios aplicar la metodología de matrices de riesgo en la práctica de Radioterapia y permitió que expertos del FORO modelaran en dicha herramienta un servicio de radioterapia de referencia que refleja el análisis publicado por el FORO y el OIEA en [28, 29]. Atendiendo a la aceptación que ha tenido la herramienta SEVRRRA entre los usuarios de la práctica de Radioterapia el proyecto “Aplicación del método de Matrices de Riesgo en Radiografía Industrial” fue diseñado para contemplar la adaptación de la metodología de matrices de riesgo en esta práctica, la aplicación de la metodología a la “Empresa de referencia” y la modelación de esta empresa en SEVRRRA.

SEVRRRA permite al usuario añadir una, varias o todas las técnicas de Radiografía Industrial y realizar el análisis detallado de cada uno de los sucesos iniciadores propuestos en cada etapa del proceso de la práctica, seleccionando aquellas barreras y reductores existentes en su empresa. Al finalizar el análisis se puede obtener un reporte con la información necesaria para poder elaborar un plan de acción que le permita reducir el riesgo.

Esta herramienta permite añadir nuevos sucesos, barreras y reductores no contemplados en la empresa de referencia de manera tal, que se puede modelar también las particularidades de trabajo del usuario para obtener su perfil real de riesgo.

SEVRRRA ofrece la posibilidad de realizar el primero y segundo cribado de la metodología, descritos en el capítulo 2 en un solo paso, a la vez que permite hacer un análisis de sensibilidad, para valorar el índice de importancia estructural de las defensas que potencialmente tienen mayor impacto en la reducción del riesgo.

3. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA DE RADIOGRAFIA INDUSTRIAL GENÉRICA E HIPOTÉTICA A LA QUE SE APLICÓ EL MÉTODO.

Una vez establecida la metodología, se aplicó a un caso concreto, para lo cual se concibió una empresa de radiografía industrial genérica con unas características tales que se puedan encontrar en la región de Iberoamérica, aunque dicha empresa no sea una empresa real, la misma representa el estándar de seguridad más alto que cabe esperar. Esta empresa incluiría los siguientes elementos:

Cuenta con un servicio de ensayos no destructivos mediante la radiografía industrial utilizando equipos e instalaciones siguientes:

- Gammagrafía con fuentes radiactivas (emisoras de radiación gamma) que se utilizan en campo (operación móvil).
- Equipos generadores de rayos X que se utilizan en campo (operación móvil).
- Gammagrafía con fuentes radiactivas (emisoras de radiación gamma) que se utilizan en Bunker (operación fija), y

- Equipos generadores de rayos X que se utilizan en Bunker (operación fija).

3.1 Equipos de radiografía con fuentes de radiación gamma

Los equipos de gammagrafía que se incluirán en este estudio son panorámicos, cuentan básicamente con los elementos y las características siguientes:

Una fuente radiactiva encapsulada acoplada a un cable denominado portafuente. La misma cumple con lo especificado en la norma internacional ISO 2919. [30]

Las fuentes que se utilizan habitualmente son encapsuladas en forma especial con una actividad, en función del isótopo de que se trate, que no supera los valores siguientes:

- Ir-192 : 5 TBq (135 Ci), la más utilizada.
- Se-75 : 2,6 TBq (80 Ci).
- Co-60: 3,7 TBq (100 Ci)

El portafuentes es un cable que lleva acoplada la fuente (Fig. 2) y el mecanismo conector para ensamblarlo con el telemando. Los diseños de portafuentes que se utilizan son de dos tipos:

- Cable flexible que lleva acoplado en un extremo la fuente radiactiva encapsulada y en el otro el mecanismo conector (“conexión hembra”). Estos portafuentes suelen cambiarse en cada cambio de fuente.
- Articulados, que lleva acoplado en un extremo el mecanismo conector y la fuente radiactiva va ensamblada bien en una posición central del portafuentes o en el otro extremo. Los eslabones que lo forman son reutilizables.



Figura 2: Fuentes y portafuentes utilizados en gammagrafía industrial

El equipo de gammagrafía industrial es un contenedor blindado donde se aloja el portafuente (Fig. 3). Estos contenedores suelen disponer de unos dispositivos de seguridad de tipo mecánico que permiten bloquear el portafuente en el interior del contenedor, evitándose la exposición accidental del portafuente al exterior. La mayoría de los contenedores de exposición también cumplen los requisitos para un bulto de transporte del Tipo B(U) estipulados en el Reglamento de transporte seguro de materiales radiactivos del OIEA.



Figura 3: Ejemplos de equipos de gammagrafía industrial

El contenedor se diseña de acero inoxidable por fuera para protegerlo de los choques mecánicos, internamente tiene uranio empobrecido que actúa como blindaje para la radiación ionizante, el uranio es muy denso y de alto poder de atenuación. Este contenedor posee internamente alrededor del uranio empobrecido, un canal donde se aloja el portafuente. Ese canal, puede ser de acero inoxidable, titanio o zirconio y puede tener forma recta o en forma de S.

La fuente radiactiva se encuentra en un contenedor de trabajo blindado y cerrado herméticamente y tiene que salir de este contenedor para radiografiar un objeto determinado. La fuente radiactiva es extraída del contenedor por la parte delantera y conducida por el cable impulsor hasta el terminal de exposición a través de un tubo guía, para ello el operador utiliza un sistema de control remoto o telemando tipo manivela. De esta forma el operador queda alejado de la fuente radiactiva para que no se exponga a altas dosis de radiación. La fuente radiactiva queda expuesta en su tránsito y en el terminal de exposición, que en algunos casos se utiliza el colimador para reducir y enfocar el haz de radiación en algunas direcciones.

Una vez terminada la exposición radiográfica, la fuente regresa al contenedor, a la posición de seguridad o de máximo blindaje, por el mismo sistema.

El telemando es un dispositivo auxiliar que permite, a distancia, posicionar la fuente en el punto de trabajo. Se trata de un cable flexible recubierto por una manguera o tubo. En uno de los extremos dispone de un mecanismo para accionarlo, bien manualmente (manivela), bien de forma automática, con motor, accionamiento hidráulico, y en el otro extremo del cable flexible lleva ensamblado el mecanismo conector (“conector macho”) para unirlo con el portafuente. Esta pieza es un componente de seguridad del equipo, ya que un defecto en el conector puede suponer el desenganche del portafuente. Además el telemando dispone de un sistema de conexión entre la manguera del mismo con el contenedor gammagráfico, que también forma parte de los sistemas de seguridad de estos equipos.

Se disponen telemandos de varias longitudes, y la elección de una longitud u otra viene marcada por temas de operatividad y protección radiológica. Cada modelo de equipos dispone de sus propios telemandos, dado que varía el diseño de conexión de unos equipos a otros. Los telemandos automáticos cuentan con un motor para impulsar el portafuente, e incorporan dispositivos programables que permiten:

- Fijar el tiempo de exposición, de forma que una vez transcurrido ese tiempo el portafuente retorna automáticamente a la posición de seguridad.
- Fijar un tiempo de retardo para que se inicie la proyección del portafuente, que permita que el operador se proteja de la radiación.

Estos telemandos automáticos disponen de señalización activa luminosa y acústica. Incorporan también mecanismos de retorno manual del portafuente.

Las mangueras o tubos guía es otro dispositivo auxiliar (Fig. 4) que se acoplan en la salida del contenedor previo a empujar el portafuente hacia el exterior del mismo. Estas mangueras o tubos guías son de plástico, y pueden ser rígidas o flexibles. Se fabrican en varias longitudes para permitir un posicionamiento más adecuado de la fuente durante la operación. Según la posición que ocupe puede ser intermedias o puntales. Las puntales vienen cerradas en uno de sus extremos, donde se sitúa la fuente radiactiva, y las intermedias, abiertas por ambos extremos, se sitúan entre el contenedor y el tubo guía.

Los colimadores se sitúan en el terminal del tubo guía, en la posición de trabajo de la fuente. Direccionan la radiación hacia el objeto a radiografiar, blindando el resto de las direcciones. Se fabrican de metales pesados, que blindan la radiación. Suelen ser de Plomo o Tungsteno.

Existen también colimadores para realizar radiografías panorámicas. Estos colimadores tienen una franja de material más ligero que es por donde se emite radiación.

Las reglas de funcionamiento mínimas de los elementos auxiliares que se acoplan al contenedor de trabajo figuran en la norma ISO 3999 [31]. Los elementos auxiliares deberían satisfacer los requisitos de esta norma o una norma nacional equivalente.

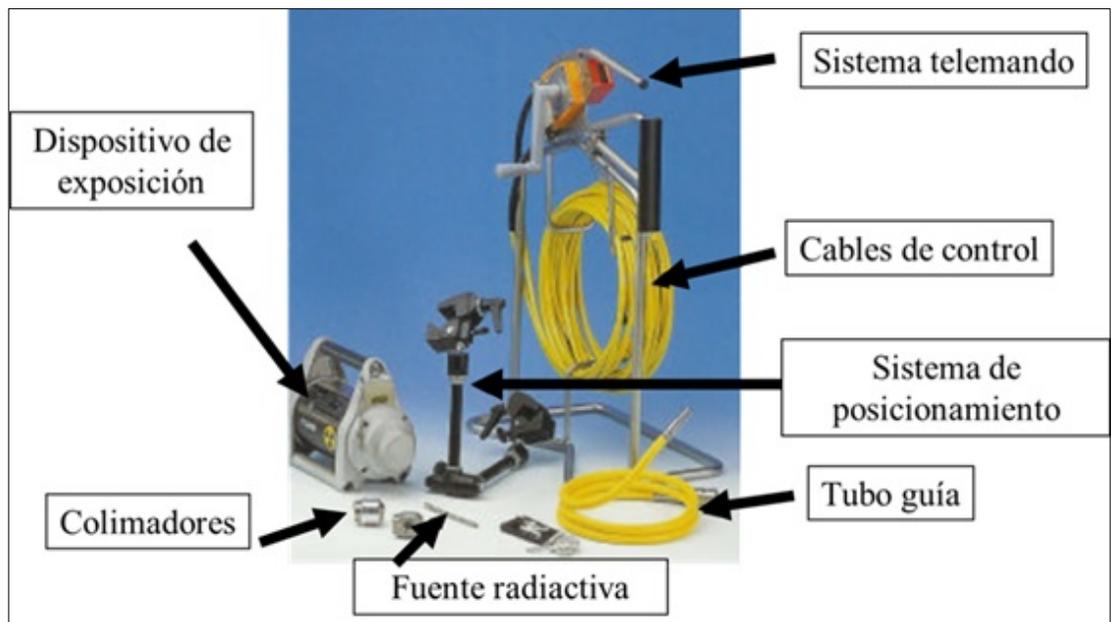


Figura 4: Componentes de un equipo de gammagrafía móvil

3.2 Equipos de radiografía con generadores de Rx

Los equipos generadores de rayos x que se utilizan en radiografía industrial pueden ser panorámicos (haz radial) o direccionales, tienen un voltaje entre 120 a 450 kV y amperaje entre 20 a 200 mA. Estos equipos pueden alcanzar tasas de exposición en aire de 2 Gy/minuto a 1 m.

Un equipo de Rx, consta, básicamente de una unidad en cuyo interior se encuentra protegido un tubo de Rx y un panel de mando que permite establecer y controlar los parámetros necesarios con la calidad deseada (Fig. 5). El panel de control dispone de llave para prevenir el uso no autorizado, luz que avisa cuando está preparado, otra luz independiente que avisa cuando está emitiendo, elementos para controlar la duración temporal de la exposición, indicadores de voltaje y amperaje y un pulsador de emergencia para desactivar inmediatamente la emisión. Ambos elementos, la unidad de generación de Rx y el panel de mando, se conectan a través del cable de energía. La distancia entre la unidad generadora y el panel de control debe ser tal que el operador este protegido en el momento de la operación, siguiendo las normas básicas de seguridad. Para cumplir con esto, los fabricantes de equipos de Rx suministran cables especiales

de alta tensión, con longitudes de 20 a 30 metros dependiendo de la potencia máxima del tubo generador. En el panel de control están alojados todos los controles, indicadores, llaves y medidores, se hacen los ajustes de voltaje y amperaje y se controla la operación.

La ventana de salida de la radiación cuenta con una cubierta blindada que obtura la salida cuando el tubo está en calentamiento previo a efectuar la radiografía.

Las principales características técnicas de un equipo de Rx son: voltaje y amperaje, tamaño del punto focal y tipo de flujo de radiación

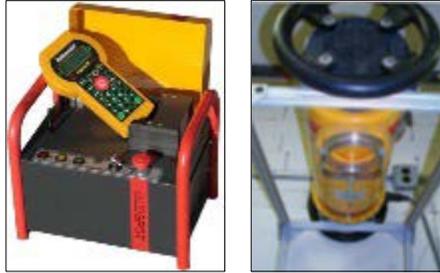


Figura 5: Equipo de radiografía industrial generador de Rx, modelo CERAM

3.3 La instalación de referencia para efectuar gammagrafía industrial móvil

En la empresa esta implementado un Programa de Protección y Seguridad Radiológica para la práctica de radiografía industrial con procedimientos escritos y registros, el cual incluye la vigilancia médica ocupacional, que forma parte del Sistema de Gestión, este es revisado y auditado periódicamente, además la entidad cuenta con una Licencia de Operación vigente para el desarrollo de la práctica.

La instalación tiene suficientes operadores, responsables de protección radiológica y supervisores autorizados.

Los equipos con los que cuentan son contenedores de categoría II (panorámicos) y disponen de los elementos auxiliares específicos compatibles con los contenedores con los que opera. Los equipos y elementos auxiliares cumplen la norma ISO 3999 ó similar.

Los portafuentes y fuentes radiactivas que incorporan los equipos son adecuados según diseño para cada equipo. Son fuentes de Ir-192, Co-60 y Se-75 y no superan la actividad de diseño del equipo. Las fuentes radiactivas cumplen la clasificación según ISO 2919 ó similar para la actividad de gammagrafía industrial.

Los manuales de los equipos están en español y en conformidad con las normas aplicables de la CEI o ISO relativas a la documentación acompañante, las especificaciones técnicas y las instrucciones de manejo y mantenimiento, incluidas instrucciones de protección y seguridad traducidas.

Existen directrices del titular de la autorización en cuanto a garantizar la capacitación adecuada de los operadores, responsables de protección radiológica y supervisores. Además de la formación en los aspectos profesionales, se incluyen prácticas y experiencia, una capacitación específica en los equipos que se utilizan, y de las lecciones aprendidas de las exposiciones accidentales.

Existen directrices del titular de la autorización de mantener la carga de trabajo moderada y crear condiciones que faciliten el trabajo consciente, con atención y sin distracciones.

Se cuenta con una organización definida en donde se establecen claramente las funciones y responsabilidades que correspondan.

Se cuenta con procedimientos para la adquisición de equipos y fuentes, y para su gestión.

La entidad cuenta con equipamiento de emergencias (telepinzas, contenedores de rescate, blindajes, herramientas, medios de comunicación, entre otros).

La entidad realiza la inspección y mantenimiento en correspondencia con las especificaciones del fabricante de equipos y elementos auxiliares, tiene establecido los servicios técnicos que se realizan en la instalación disponiendo de procedimientos para efectuarlos. Se dispone de calibradores “pasa no pasa” para comprobar el estado de las conexiones de seguridad.

Se dispone de intercambiadores de fuentes proporcionados por el fabricante para realizar el intercambio seguro de fuentes de radiografía presentes en los equipos.

Se disponen de monitores portátiles de radiación apropiados a las características de la radiación a medir y los operadores usan dosímetros personales con lectura directa y alarmas adecuadas a las condiciones de trabajo.

La empresa organiza sus actividades y recursos de acuerdo a las etapas de procesos siguientes:

Adquisición

Cuenta con un proceso de adquisiciones de fuentes, equipos y accesorios originales que garantiza el suministro de bienes y servicios con empresas autorizadas que proveen certificados de cumplimiento.

Almacenamiento fijo

El almacén de la empresa cuenta con las medidas de organización, seguridad física y seguridad radiológica que permite mantener en buen estado equipos, fuentes y accesorios.

El blindaje es el suficiente para que la dosis que recibe el POE (personal ocupacionalmente expuesto) y el público, sea la establecida en la regulación nacional, la instalación cuenta con un monitor de área fijo de radiación para el control radiológico.

El almacén cuenta con las barreras de seguridad que impiden el acceso de personal no autorizado, tales como cerca perimetral, alarma de seguridad, cerraduras en las puertas, circuito cerrado de televisión, vigilancia por custodios, entre otras.

EL almacén se encuentra ubicado en un lugar en el que se han contemplado posibles factores adversos como eventos naturales, externos y sociales que pudieran poner en riesgo la seguridad del material radiactivo y se tienen previstas las medidas para atender un caso de emergencia.

Almacenamiento temporal (In situ)

Para la ubicación del almacén se cuenta con el apoyo del cliente en cuanto a garantizar la seguridad radiológica y física en el almacenamiento de los equipos y fuentes.

Cuenta con el apoyo y acuerdo del cliente en caso de tener la necesidad de ejecutar el Plan de Emergencia Radiológica.

Preparación de los trabajos

La empresa cuenta con los procedimientos que señalan que antes de realizar los trabajos se prevén los elementos que el cliente tiene que proporcionar tales como andamios, iluminación, condiciones seguridad, entre otros.

Los equipos y accesorios, equipamiento de seguridad radiológica, transporte y almacenamiento son revisados antes del inicio de los trabajos.

La empresa realiza el acordonamiento y delimitación de la zona controlada, se señala y se coloca la alarma luminosa y acústica de advertencia de la ejecución de los trabajos de exposición radiográfica.

Transporte de material radiactivo

La empresa cumple con las regulaciones para el transporte seguro de material radiactivo (señalización, etiquetado de los bultos, medios de comunicación, medios de sujeción, equipo “kit” de emergencia, rutas planificadas, entre otros) establecidas por la autoridad reguladora.

Operación

Durante la operación se cumplen todos los procedimientos operacionales y de seguridad radiológica, establecidos para desarrollar los trabajos de forma segura y satisfacer los requisitos del cliente.

Los procedimientos operacionales y de seguridad radiológica aplicados garantizan que en todo momento se cumpla el principio ALARA.

Se cuenta con los elementos y dispositivos para actuar en caso de una emergencia radiológica y sus procedimientos que siempre se encuentran disponibles en la zona de trabajo, durante la realización de la práctica. Se hacen simulacros periódicos de los procedimientos de emergencias para garantizar la efectividad de la respuesta.

Mantenimiento de los equipos y accesorios

La empresa realiza mantenimiento periódico de los equipos y accesorios siguiendo procedimientos establecidos por el fabricante, utilizando accesorios originales y un servicio técnico autorizado.

El recambio de fuente lo realiza personal y servicio técnico autorizado siguiendo procedimientos preestablecidos y aprobados por el órgano regulador.

La empresa realiza la gestión de las fuentes en desuso de acuerdo a las regulaciones establecidas por la autoridad reguladora (se retornan las fuentes en desuso al suministrador o se gestionan como fuentes radiactivas en desuso).

Existen directrices escritas de no hacer modificaciones al equipo y a los accesorios y de no dejar sin efecto enclavamientos de seguridad, así como de no emplear el equipo para situaciones no previstas en el momento de la compra y puesta en servicio.

Se realizan pruebas de hermeticidad a las fuentes, por una empresa autorizada, se toman las frotis siguiendo procedimientos establecidos y con una frecuencia que se corresponden con las exigencias de la regulación nacional.

Control de dosimetría

La empresa analiza el comportamiento de la dosimetría del POE con el propósito de establecer el cumplimiento de las restricciones de dosis.

Sistema de Registros

- Documentación técnica, en idioma español, de los equipos y fuentes de radiografía industrial brindada por los suministradores o fabricantes de los mismos.
- Copias de las autorizaciones otorgadas y de los informes de las inspecciones realizadas por la autoridad reguladora; así como de la documentación técnica presentada en el marco del proceso de autorización de la práctica.
- Listado del personal ocupacionalmente expuesto (POE) y expediente radiológico de cada uno que incluya:
 - a) registro de exposición ocupacional (historial dosimétrico);
 - b) resultados de la capacitación recibida (resultados de los exámenes y programa de capacitación y entrenamiento);
 - c) autorizaciones otorgadas (certificación de la entidad y cuando proceda, licencia individual); y
 - d) resultados de los exámenes médicos.
- Resultados de la comprobación de los dispositivos de seguridad en particular del detector fijo de radiación.
- Resultados de la verificación y de la calibración de los equipos de monitoreo;
- Documentación de las modificaciones a la instalación;
- Documentación técnica suministrada por el fabricante (“documentación adicional”).
- Resultados de la verificación completa de los equipos;
- Recepción de fuentes de radiaciones ionizantes, que contenga: radioisótopo contenido en la fuente; modelo y número de serie de las fuentes recibidas; fecha de recepción; nombre del proveedor y del fabricante; número de serie utilizado por el fabricante; actividad de la fuente informada al ser recibida, fecha de calibración; y la condición de los contenedores anotando los niveles de radiación del bulto.
- Resultados de las pruebas de hermeticidad de las fuentes;
- Resultados de la vigilancia radiológica de zonas y puestos de trabajos. Se debe indicar la fecha de realización de la medición, los puntos donde se realizan las mediciones, los resultados de las mediciones realizadas en cada punto y los datos personales del trabajador que realizó la medición.
- Resultados de las auditorías sobre el programa de protección y seguridad radiológica.

- Copia de los informes de investigación de incidentes y accidentes.
- Resultados de los trabajos de reparación y mantenimiento realizados, indicándose el tipo de mantenimiento, la fecha en que fue realizado, las actividades ejecutadas y nombre y firma de la persona que la realizó.
- Resultados, según los correspondientes certificados o informes, de las calibraciones realizadas a los equipos.
- Carga de trabajo de cada operador, entrada y salida de los equipos del almacén y transportaciones.
- Control de las llaves de los equipos y de las instalaciones.
- Análisis de las dosis operacionales recibidas por el POE según las lecturas de su dosímetro de lectura directa de acuerdo a la planificación efectuada, comparada con las restricciones de dosis operacionales establecidas en la instalación.
- Auditorías internas.

3.4 La gammagrafía fija (en bunker)

Debe disponer de recintos donde efectuar las operaciones en su interior con las características: espacio cerrado y blindado de manera que se cumplan las restricciones de dosis establecidas.

Además, dispondrá de barreras de protección y dispositivos de seguridad; señales con la leyenda: “Peligro. Zona de Radiación”; alarmas externas (acústica y luminosa) que se activen durante la operación del equipo y enclavamientos de seguridad para el control de acceso al recinto, cuando se encuentre en operación. El puesto de control del operador estará situado en el exterior del recinto blindado.

En el diseño de los sistemas de seguridad del recinto tener en cuenta los criterios siguientes:

Enclavamientos que impidan la apertura de puertas o accesos durante la exposición o que garanticen que al ser abiertos la fuente retorna a la posición de seguridad, en el caso de utilizar un telemando automático. En ese caso, la exposición no podrá ser reiniciada simplemente por el cierre de la puerta, sino que deberá efectuarse desde la unidad de control.

Al menos una puerta podrá ser abierta desde el interior. Además, en el caso de utilizar un telemando automático, existirá en el interior un interruptor de emergencia, que haga retornar a la fuente a su posición de seguridad. Este interruptor estará colocado fuera del haz directo.

La unidad de control estará colocada en una posición desde la que se vea fácilmente la puerta de acceso.

Existirá una señal luminosa roja de advertencia, en el exterior de la puerta de acceso, que se mantendrá encendida desde el comienzo de la irradiación con la fuente, hasta su recogida. Junto a la señal se situará un cartel que explique su significado.

El sistema de enclavamiento y la luz de advertencia deberán ser independientes, de manera que el fallo de uno no implique el del otro.

En el caso de recintos blindados de gran tamaño se instalará una señal sonora que avise que va a comenzar la exposición, así como la instalación de pulsadores para efectuar una ronda de seguridad o incluso la instalación de cámaras de TV.

Deberá existir un detector de radiación de área (fijo) en el interior del recinto blindado.

Los enclavamientos y señalizaciones luminosas de emergencia estarán conectados a este detector.

Se dispone de procedimientos para la operación en recinto blindado y emergencias.

Se dispone de monitores de radiación adecuados para situar en el interior de los recintos blindados, con los que efectuar el enclavamiento en los accesos, y monitores portátiles que se utilizan para acceder a los recintos.

Sistema de Registros:

- Verificación de los enclavamientos de seguridad y alarmas de los recintos blindados.
- Verificación de la señalización de zonas y de los letreros de avisos.
- De operación: fecha, parámetros, identificación de equipos y fuentes.

3.5 La instalación de referencia para efectuar radiografía industrial con Rx

La instalación tiene suficientes operadores autorizados, responsables de protección radiológica y supervisores.

Tienen implantado un Sistema de Gestión de Calidad y Seguridad, con procedimientos escritos y registros.

Los manuales de los equipos están en español y en conformidad con las normas aplicables de la CEI o la ISO relativas a documentación acompañante, las especificaciones técnicas de operación y de mantenimiento, incluidas instrucciones de protección y seguridad traducidas.

Existen directrices del titular de la autorización en cuanto a garantizar la capacitación adecuada de los operadores, responsables de protección radiológica y/o supervisores. Además de la formación en los aspectos profesionales, se incluyen prácticas y experiencia, y una capacitación específica en los equipos que se utilizan, y de las lecciones aprendidas de las exposiciones accidentales.

Existen directrices del titular de la autorización de mantener moderada la carga de trabajo y crear condiciones que faciliten el trabajo consciente, con atención y sin distracciones.

Se dispone con una clara definición de las funciones y responsabilidades que correspondan a cada uno de los niveles organizativos de la empresa.

Se dispone con procedimientos para la adquisición de equipos.

Se realiza la inspección y mantenimiento de equipos en correspondencia de las especificaciones del fabricante, se tiene establecido las que realizan en la instalación disponiendo de procedimientos para efectuarlas y las que efectúa la empresa de asistencia técnica.

Se dispone de monitores de radiación apropiados a las características de la radiación a medir.

Sistema de Registros:

- La adquisición y retirada de equipos.
- Incidentes.
- Control radiológico periódico de las zonas definidas en las distintas dependencias de la instalación radiactiva (recintos de almacenamiento o búnkeres de radiografiado).
- Dosimetría personal (de todos los medios usados).
- Mantenimiento y verificación de equipos (acorde al respectivo manual de mantenimiento).
- Mantenimiento y verificación y/o calibración de monitores de radiación y detectores (acorde al manual de mantenimiento).

- Certificado de equipos.
- Auditorías internas.

3.6 Radiografía industrial con Rx móvil

Se cuenta con una cantidad apropiada de monitores de radiación y de dosímetros de lectura directa, en atención a la cantidad de equipos y operadores.

Se utilizan equipos de rayos X convencionales

Se cuenta con sistema señalización y delimitadores de área.

Se cuenta con un almacén con acceso controlado para el depósito de equipos en la instalación autorizada y en los lugares donde se realicen las prácticas.

Se cuenta con procedimientos para: la planificación del trabajo de campo, operación, uso de los diferentes modelos de detectores de radiación y dosímetros de lectura directa y el procedimiento a seguir para la verificación de su correcto funcionamiento, realizar los cálculos de protección radiológica en las operaciones a realizar y emergencias.

Sistema de Registro:

- Control radiológico de zona.
- En la operación (carga de trabajo, condiciones del trabajo, fecha, parámetros e identificación de equipos).
- Acuerdos concertados con el cliente en donde se garantice un medio de trabajo seguro para la radiografía industrial y los riesgos convencionales existentes en las instalaciones del cliente.

3.7 Radiografía industrial con Rx fija (en bunker)

Dispone de recintos donde efectuar las operaciones en su interior con las siguientes características: espacio cerrado y blindado de manera que se cumplan los límites y restricciones de dosis establecidos. Además, dispondrá de barreras de protección y dispositivos de seguridad; señales con la leyenda: “Peligro. Zona de Radiación”; alarmas externas, (acústica y luminosa) que se activan durante la operación del equipo y enclavamientos de seguridad para el control de acceso al recinto cuando se encuentre en operación. El puesto de control estará situado en el exterior del recinto blindado.

En el diseño de los sistemas de seguridad del recinto se tiene en cuenta los criterios:

- Enclavamientos que impidan la apertura de puertas o accesos durante la exposición o que garanticen que al ser abiertos se detiene la emisión de Rx. En ese caso, la exposición no podrá ser reiniciada simplemente por el cierre de la puerta, sino que deberá efectuarse desde la unidad de control.
- Al menos una puerta podrá ser abierta desde el interior. Además, existirá en el interior un interruptor de emergencia que corte la emisión de Rx. Este interruptor estará colocado fuera del haz directo.
- La unidad de control estará colocada en una posición desde la que se vea fácilmente la puerta de acceso.
- Existirá una señal luminosa roja de advertencia, en el exterior de la puerta de acceso, que se mantendrá encendida desde el comienzo de la emisión hasta que finalice. Junto a la señal se situará un cartel que explique su significado.
- El sistema de enclavamiento y la luz de advertencia deberán ser independientes, de manera que el fallo de uno no implique el del otro.
- En el caso de recintos blindados de gran tamaño se instalará una señal sonora que avise que va a comenzar la exposición, así como la instalación de pulsadores para efectuar una ronda de seguridad o incluso la instalación de cámaras de TV.

- Deberá existir un detector de radiación fijo en el interior del recinto blindado.
- Se cuenta con procedimientos para la operación en recinto blindado y emergencias.
- Se cuenta con monitores de radiación adecuados para situar en el interior de los recintos blindados, con los que efectuar el enclavamiento en los accesos, y monitores portátiles para utilizar al acceder a los recintos.

Sistema de Registros:

- Inspección y mantenimiento de los enclavamientos de seguridad y alarmas de los recintos blindados.
- Verificación de la señalización de zonas y de los letreros y señales de avisos.
- De operación: fecha, parámetros e identificación de equipos.
- En el caso de disponer de un servicio que comprenda diferentes combinaciones de las características indicadas anteriormente, se deberá realizar el análisis de seguridad para cada una de las combinaciones posibles.

3.8 Aspectos de seguridad que guardan relación con el cliente.

La industria moderna emplea diferentes equipos y técnicas para realizar el diagnóstico de tuberías, soldaduras, estructuras, etc., a través de ensayos no destructivos, entre los cuales se encuentra la radiografía industrial y el empleo de diferentes medios de emisión de radiaciones ionizantes.

Esto requiere, en muchos casos un servicio contratado o subcontratado en predios o instalaciones de terceros, para realizar estas actividades.

En estos sitios, una figura de gran importancia que contribuye en gran medida para el desarrollo de la seguridad, durante las tareas que implican el uso de radiaciones ionizantes, es el cliente o la entidad que contrata los servicios de una determinada empresa, para realizar ensayos no destructivos que involucran radiaciones ionizantes, en cualquiera de sus modalidades de trabajo.

Esto se traduce en una simbiosis cliente-empresa de radiografía industrial, buscando privilegiar las medidas preventivas orientadas a incrementar los niveles de seguridad, durante la ejecución de las tareas.

El cliente en su compromiso con la seguridad, debe realizar todo aquello que sea necesario, verificando que se cumplen los procedimientos, tanto propios como los de la empresa contratada, de manera de acompañar el proceso de radiografía industrial, colaborando en lo que le corresponda, en el normal desarrollo de las actividades.

El cliente solo debe solicitar los servicios de usuarios autorizados que se encuentren dentro de la legislación local.

Para que el operador pueda realizar sus evaluaciones de seguridad de manera de realizar su tarea con el menor riesgo posible, el cliente debe otorgar a la empresa contratada, los tiempos necesarios para el desarrollo de sus actividades y permitir de esa forma que cumpla con las medidas de seguridad radiológica, exigida por el sistema de regulación nacional.

El cliente debe evaluar con suficiente antelación en la medida de lo posible, las actividades involucradas en cada servicio y lo requerido o necesario para desarrollar las tareas sin inconvenientes.

Esto implica:

- La evaluación de la seguridad y el análisis del riesgo que plantea la operación, desde el punto de vista de la instalación, y sus posibles interferencias con otros procesos vinculados o asociados.
- Informar a los operadores de radiografía sobre los riesgos generales y particulares o especiales, que ofrece la instalación.
- Capacitar sobre situaciones específicas o riesgos que podrían ocurrir durante el transcurso de las actividades, en particular, los servicios o mecanismos de respuesta ante una emergencia en general.
- Procedimentar todas aquellas actividades especiales o de mayor riesgo. (ejemplo: construcción de andamios, plataformas y/o estructuras que pueden ser requeridas en ciertos trabajos en altura, empleo de puentes grúa, o similar).
- Disponer de la iluminación adecuada.
- Verificar las condiciones de seguridad en sitios confinados, en lo referido a riesgos asociados a la salud.
- Definir los criterios comunes con referencia a las áreas donde se almacenarán temporalmente, en caso de corresponder, el material radiactivo y/o los equipos generadores de Rx.
- Las medidas de seguridad radiológica y física relacionadas con el punto anterior, deben ser establecidas privilegiando la seguridad.
- El cliente debe contribuir a la disminución del riesgo, aportando sus experiencias anteriores y organizando a su propio personal para mejorar las condiciones de seguridad, mientras se desarrollen las tareas de radiografía industrial.
- En virtud de la experiencia internacional relacionada con accidentes radiológicos es recomendable que el cliente conozca el plan de respuesta de la empresa contratada, y viceversa, (procedimientos y elementos de emergencia) ante un evento radiológico, y como debe colaborar para mitigar en lo que le corresponde, las consecuencias de lo sucedido.

Ante la importancia de la reducción del riesgo en este tipo de aplicaciones industriales, tanto para el operador contratado para las tareas de radiografía industrial como para su cliente, se hace necesaria la mención específica de los puntos enunciados precedentemente en la relación contractual, que debe ser aprobada y cumplida por ambas partes

4. RESULTADOS GENERALES DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MATRICES DE RIESGO EN LA PRÁCTICA DE GAMMAGRAFÍA.

La aplicación del método de la matriz de riesgo a la Empresa de referencia ha permitido identificar los principales error humanos, fallos de equipos y eventos externos que pudieran conducir a un accidente. Al mismo tiempo se han identificado las principales defensas (barreras y reductores) que permitirían reducir el riesgo de potenciales accidentes a los niveles aceptables. A continuación se muestra una tabla resumen del alcance del trabajo realizado, donde se incluyen los capítulos.

Práctica	Cantidad de sucesos iniciadores	Con consecuencias para el trabajador.	Con consecuencias para el público	Errores humanos	Fallos de equipos	Eventos externos	Capítulo del Reporte
Gammagrafía Móvil	76	38	38	41	13	22	5
Gammagrafía en bunker	70	55	15	42	12	16	6
Radiografía con Rx móvil	20	7	14	10	2	8	7
Radiografía con Rx en bunker	10	5	5	8	1	1	8

5. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO EN LA TÉCNICA DE GAMMAGRAFÍA INDUSTRIAL MÓVIL

1.1. Consideraciones generales sobre los sucesos con consecuencias muy altas.

La aplicación del método de la matriz de riesgo a la Empresa de referencia puso de manifiesto que en la misma los sucesos con consecuencias catastróficas (CMA) se relacionan con aquellos escenarios donde la fuente radiactiva llega al dominio público sin ningún control de seguridad.

Existe información suficiente que confirma esta consideración tal y como se ha publicado en los accidentes siguientes:

1.1.1. Accidente radiológico de Yanango, Perú.

El 20 de febrero de 1999 ocurrió un serio accidente radiológico en la Planta Hidroeléctrica Yanango de Perú, cuando un trabajador no ocupacionalmente expuesto (soldador) se llevó una fuente de ^{192}Ir de radiografía industrial colocándola en su bolsillo, donde permaneció unas horas. Esto produjo que este trabajador recibiera una alta dosis de radiación.

Un soldador y su asistente realizaban la reparación de una soldadura en una tubería de 2 m de diámetro. El dispositivo de exposición involucrado en el accidente no contaba con la licencia de operación de la compañía y no fue autorizado por el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN). Entró a Perú desde Ecuador el 15 de enero del 1999 sin que mediara comunicación al IPEN. Este tenía un peso de 35 Kg, poseía uranio empobrecido como blindaje y fue diseñado para alojar una fuente de ^{192}Ir de hasta un máximo de 7,4 TBq.

El objetivo de trabajo consistía en realizarle radiografía a la sección de tubería tan pronto como fuera posible porque el contratista principal exigía urgentemente la realización de la prueba hidráulica de la tubería. El plan era realizar la radiografía al medio día cuando los otros trabajadores se retiraran del área para almorzar, pero como la reparación no fue terminada, la radiografía no se ejecutó. El dispositivo de exposición fue dejado sin supervisión, con llave pasada y el cable de control conectado, aunque el tubo guía no fue conectado. En algún momento

durante el día la fuente fue sacada del dispositivo de exposición. Cerca de las 16:00 horas el soldador recoge la fuente de ^{192}Ir con su mano derecha y la coloca en el bolsillo trasero de la derecha. La investigación no estableció como la fuente salió del dispositivo de exposición [1].

Equipo de gammagrafía Modelo: SPEC T-2

Actividad. Máx.: 3.7 TBq

Radionúclido: ^{192}Ir

Actividad: 1.37 TBq (37 Ci) (en la fecha del accidente)

El soldador sintió dolor en la parte trasera de su muslo derecho. Deja el trabajo y toma un minibús hacia su casa, se recuerda de la fuente en el bolsillo del overall, la toma con su mano derecha y la lleva al cuarto de baño el cual está a unos 4 metros fuera de la casa, el 21 de febrero un operador radiógrafo de la compañía llega a la casa del soldador y le pregunta si él ha visto la fuente.

El soldador va al cuarto de baño y toma la fuente con sus manos hasta la puerta. El radiógrafo le dice que lance la fuente hacia la calle, y después comienzan las acciones de recuperación. Como consecuencia de la irradiación aguda sufre amputación de pierna e infección severa y muere posteriormente. Las dosis de las partes más cercanas del cuerpo donde se colocó la fuente se estimaron en el rango de 25 a 30 Gy. [1]

1.1.2. Accidente radiológico de Nueva Aldea, Chile

El 14 de diciembre del 2005 entre las 20 y 21.15 horas, operadores tomaban radiografías a 22,5 metros de altura, al desconectar el tubo guía del dispositivo de exposición, la fuente de ^{192}Ir se desenganchó y cayó sobre una plataforma, el equipo fue bajado sin desconectar el cable de control del telemando.

Cronología de los hechos y estimación de las dosis recibidas :

Paciente A, muestra la fuente en la mano y se la entrega a B, este le muestra la fuente a C y la toma en sus manos, A y C entran a una oficina y allí, un trabajador con dosímetro personal de lectura directa informa la presencia de radiación y se identifica la fuente radiactiva.

Seguimiento:

- Dosimetría biológica a todos los trabajadores con dosis estimadas, por reconstrucción física de dosis, sobre 100 mGy.
- Se hizo dosimetría biológica a 37 personas, por el laboratorio de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) y la colaboración de los laboratorios de Argentina, Brasil y México.
- Sólo 1 trabajador recibió 0,17 Gy, el resto recibió valores de dosis < 0,10 Gy. [2]

1.2. Consideraciones específicas para sucesos con Consecuencias Muy Altas

El presente trabajo ha permitido identificar las etapas del proceso de Radiografía Industrial donde encontramos sucesos iniciadores que conducen a estas consecuencias catastróficas.

En la tabla 8 se muestra la cantidad de sucesos con consecuencias catastróficas en las diferentes etapas del proceso atendiendo a las 4 técnicas de Radiografía Industrial utilizadas.

TABLA 8 CANTIDAD DE SUCESOS CON CONSECUENCIAS MUY ALTAS EN CADA UNA DE LAS ETAPAS DEL PROCESO.

Técnica de Radiografía	Etapas del Proceso	Cantidad de sucesos con Consecuencias Muy Altas	Cantidad de Secuencias con Consecuencias Muy Altas y Riesgo alto.
Gammagrafía Industrial Móvil	Adquisición	1	1
	Almacenamiento	2	
	Almacenamiento temporal	2	1
	Transporte	9	5
	Preparación del Trabajo	2	
	Operación	7	3
	Mantenimiento	1	

Llama la atención que del total de 24 sucesos iniciadores que pueden conducir a consecuencias catastróficas 16 sucesos se producen durante las etapas de operación y transporte lo cual demuestra que estas son etapas donde hay que prestar mucha atención en aplicar todas las defensas previstas para evitar este tipo de accidentes con consecuencias muy altas.

Por otra parte, es importante resaltar que las 10 secuencias accidentales evaluadas con riesgo alto (RA) en la Empresa de referencia, son precisamente secuencias que tienen consecuencias catastróficas lo cual se corresponde perfectamente con la experiencia de los accidentes que lamentablemente han ocurrido en esta práctica.

Estos resultados demuestran que todavía son insuficientes los esfuerzos que se han realizado para prevenir que estos accidentes sigan ocurriendo, particularmente en las etapas de transporte, operación y almacenamiento temporal de las fuentes.

En tal sentido toma gran relevancia resaltar algunas medidas de seguridad que deben ser consideradas para evitar estos tipos de accidentes. Entre estas medidas se incluyen las siguientes:

Barreras:

1. *Utilizar portacontenedor con cierre anclado al vehículo.*
2. *Utilizar vehículos cerrados para la transportación.*
3. *Supervisar la fijación del bulto en el vehículo antes del transporte.*
4. *Instrucción que establece que el vehículo nunca puede quedar solo durante las paradas.*
5. *Puerta con candado o bloqueo en el almacén.*
6. *Candado o bloqueo en la tapa de la fosa o nicho donde se almacenan las fuentes*
7. *Uso de monitor portátil con alarma.*
8. *Uso de dosímetro de lectura directa con alarma.*
9. *Indicador visual en el equipo de que alerta que la fuente no ha retornado a la posición de seguridad.*
10. *Odómetro en el telemando que indica que la fuente no ha regresado al equipo proyector.*
11. *Enclavamiento del telemando que no permite desengancharlo del equipo hasta que la fuente se encuentre en la posición de seguridad.*
12. *Procedimiento de delimitación de zonas (acordonamiento de áreas).*
13. *Advertencia por altoparlante para no entrar al área de trabajo.*
14. *Señales lumínicas de advertencia (torreta, baliza, etc.)*

Reductores de Frecuencia

1. *Capacitación del personal*
2. *Evaluación de las rutas para realizar la transportación.*
3. *Minimizar paradas durante el transporte.*
4. *Utilizar aparcamientos vigilados para paradas necesarias*
5. *Clara señalización de los equipos (símbolo de peligro, material radiactivo y letreros de peligro por radiación).*
6. *Carga de trabajo moderada.*
7. *Trabajo en condiciones adecuadas sin distracciones.*
8. *Revisión y mantenimiento periódico de los accesorios.*
9. *Planificación anticipada de los trabajos.*
10. *Realizar acuerdos de coordinación de los trabajos con el cliente*

Reductores de Consecuencias.

1. *Dispositivo de rastreo online (GPS convenientemente ubicado en el equipo)*
2. *Disponibilidad de medios de comunicación para reportar el suceso durante todo el tiempo de transportación.*
3. *Ejecución del plan de emergencia*
4. *Comunicación oficial al público sobre la pérdida de la fuente. (uso de medios masivos de comunicación como la radio y la TV)*

El hecho de que todos los sucesos de riesgo alto sean sucesos con consecuencias catastróficas demuestra la justificada preocupación existente en la comunidad internacional respecto a la prevención de accidentes en la práctica de Radiografía Industrial y se corresponde perfectamente con la lamentable experiencia de los accidentes que han ocurrido. En cualquier

caso es importante señalar que estos resultados se han obtenido al evaluar una Empresa de referencia que muestra el nivel de seguridad más alto que podemos esperar en nuestra región lo que nos demuestra que el perfil de riesgo de la mayorías de las empresas que operan actualmente es más alto que lo que se ha obtenido en este estudio y puede empeorar en la medida que no existan o se degraden las defensas enunciadas en el cuadro anterior.

1.3. Resultados generales sobre la gammagrafía móvil

En este apartado se presentan los principales resultados de la aplicación del método de matrices de riesgo al proceso de la práctica de gammagrafía móvil. La matriz completa se muestra en el Apéndice 1. Utilizando la herramienta SEVRRRA se realizó el análisis de la Empresa de referencia y se obtuvo el perfil de riesgo que se muestra a continuación.

1.3.1. Resumen estadístico

La tabla 9 muestra un resumen estadístico de la aplicación del método de matriz de riesgo en la empresa de referencia, que realiza la práctica de gammagrafía móvil.

TABLA 9 RESUMEN DE RESULTADOS DE LA MATRIZ DE RIESGO EN GAMMAGRAFÍA MÓVIL

Número de Sucesos Analizados	76	
Con consecuencias sobre el trabajador ocupacional	38	50 %
Con consecuencias sobre miembros del público	38	50 %
Con Consecuencias Muy altas	24	31,6 %
Con Consecuencias Altas	29	38,2 %
Con Consecuencias Moderadas	23	30,2 %
Número de barreras analizadas	77	
Número de reductores de frecuencia analizados	64	
Número de reductores de consecuencias analizados	10	
	Resultados	
Secuencias con Riesgo Muy Alto	0	
Secuencias con Riesgo Alto	10	13 %
Con riesgo Alto y Consecuencias Muy Altas	10	13 %
Con riesgo Alto y Consecuencias Altas	0	0 %
Con riesgo Alto y Consecuencias Moderadas	0	0 %
Secuencias con Riesgo Medio	32	42 %
Con riesgo Medio y Consecuencias Muy Altas	14	18,4 %
Con riesgo Medio y consecuencias Altas	3	4 %
Con riesgo Medio y Consecuencias Moderadas	14	18,7 %
Secuencias con riesgo Bajo	34	45 %

En la figura 6 se muestra la secuencia de etapas del programa SEVRRRA, con los sucesos descritos por cada etapa y en la figura 7 se resumen estos mismos resultados de manera gráfica, y puede observarse la distribución de los riesgos Altos, Medios y Bajos en las diferentes etapas del proceso de Gammagrafía móvil.

Núm.	Etapa	Riesgo Muy Alto (RMA)	Riesgo Alto (RA)	Riesgo Medio (RM)	Riesgo Bajo (RB)	No Aplica (NA)	Analizados	Total por Etapa	Completo
1	ADQUISICIÓN	0	1	2	6	0	9	9	✓
2	ALMACENAMIENTO	0	0	7	5	0	12	12	✓
3	ALMACENTEMPORAL	0	1	4	1	0	6	6	✓
4	TRANSPORTE	0	5	3	4	0	12	12	✓
5	PRETRABAJO	0	0	4	4	0	8	8	✓
6	OPERACIÓN	0	3	10	12	0	25	25	✓
7	MANTENIMIENTO	0	0	2	2	0	4	4	✓
Total		0	10	32	34	0	76	76	7

Figura 6. Secuencia de etapas del programa SEVRRRA

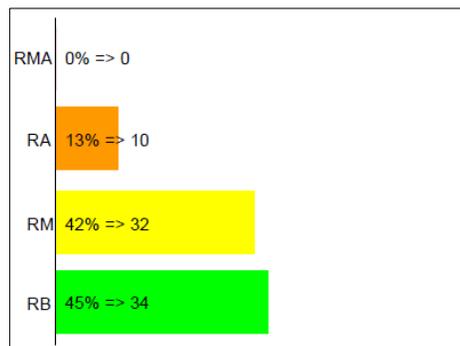


Figura 7. Resumen de resultados de la aplicación de la matriz de riesgo en gammagrafía móvil.

Se generó una lista de 76 posibles sucesos iniciadores que pudieran provocar exposiciones accidentales. Estos sucesos pudieran producirse tanto en alguna de las etapas del proceso de Gammagrafía móvil, considerando desde la etapa de pedido de las fuentes y equipos hasta la etapa de operación propiamente. De estos 76 sucesos, el 50 % tendrían consecuencias para los trabajadores ocupacionales y el 50 % para miembros del público. De estos 76 sucesos iniciadores analizados: 41 de ellos (53,9 %) son derivados de errores humanos, otros 13 (17,2%) son fallos de equipos y los restantes 22 (28,9 %) son eventos externos. (Fig. 8)

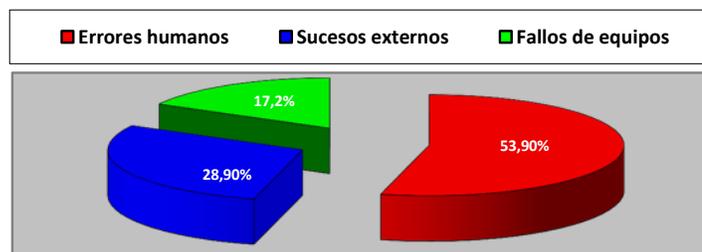


Figura 8. Distribución de los sucesos iniciadores para las diferentes etapas de gammagrafía móvil

Asimismo, se analizaron 76 barreras directas, 64 elementos que contribuyen a reducir la frecuencia de los sucesos iniciadores de accidente (reductores de frecuencia) y 10 que podrían disminuir la severidad de las potenciales consecuencias (reductores de consecuencias).

Ha quedado comprobado que no hay secuencias de riesgo muy alto en la empresa de referencia, lo que significa que esta empresa no está amenazada por un riesgo inminente de accidentes. Sin embargo, el hecho de que existan 10 secuencias accidentales de Riesgo Alto significa que esta “empresa de referencia” está obligada a elaborar un Plan de Acción para reducir esos riesgos.

1.3.2. Análisis detallado de los sucesos con Riesgo Alto y consecuencias Muy Altas.

De los 24 sucesos con consecuencias catastróficas identificados en el estudio, 10 se evalúan con Riesgo Alto lo cual, según los criterios de aceptabilidad del riesgo establecidos en la metodología (epígrafe 2.2.7), es un riesgo inaceptable.

Es importante destacar que, entre las 10 secuencias accidentales de riesgo alto, 8 se corresponden con eventos externos a la organización (percances naturales, tecnológicos y sociales) y solo 1 se corresponde con errores humanos del personal que trabaja en la organización. Ninguna de las secuencias accidentales evaluadas con Riesgo Alto se deriva de fallos de equipos, quedando claro que, al estado del arte (considerando el cumplimiento de la normativa internacional aplicable), la tecnología usada en gammagrafía industrial es segura.

Es importante resaltar que todas las secuencias de riesgo alto tienen consecuencias para el público lo cual es muy preocupante por el efecto adverso que esta realidad puede causar en la opinión pública. En tal sentido, en la tabla 10 se incluyen las 10 secuencias accidentales evaluadas como Riesgo Alto, y seguidamente se realiza el análisis detallado de cada una.

TABLA 10 SUCESOS INICIADORES DE CONSECUENCIAS MUY ALTAS QUE SE EVALUAN CON RIESGO ALTO.

Código SI	Suceso Iniciador	Riesgo de Referencia	Riesgo Obtenido	Barreras y Reductores Faltantes
AD-PUB1.9	PÉRDIDA DE LA FUENTE EN EL PROCESO DE ENVÍO /DEVOLUCIÓN ENTRE EL REMITENTE Y EL DESTINATARIO	RA	RA	Ninguna
ALT-PUB3.4	Eventos naturales que afecten la instalación con la consecuente pérdida de control de la fuente y equipos.	RA	RA	Ninguna
TR-PUB4.4	Hurto del vehículo que ocasiona que la fuente caiga en el dominio público	RA	RA	Ninguna
TR-PUB4.5	Robo con violencia del vehículo que ocasiona que la fuente caiga en el dominio público	RA	RA	Ninguna
TR-PUB4.7	Robo con violencias del equipo (proyector) que ocasiona que caiga en el dominio público	RA	RA	Ninguna
TR-PUB4.9	Accidente en un transporte no autorizado que ocasiona que el equipo (proyector) caiga en el dominio público	RA	RA	Ninguna
TR-PUB4.10	Hurto del equipo (proyector) durante el traslado en transporte no autorizado que ocasiona que caiga en el dominio público	RA	RA	Ninguna
OP-PUB6.13	Intento de hurto del equipo (proyector) durante los trabajos	RA	RA	Ninguna
OP-PUB6.14	Robo con violencia del equipo (proyector) durante los trabajos	RA	RA	Ninguna
OP-PUB6.25	Errores durante la ejecución del plan de emergencia que afecta la efectividad de las respuestas planificadas	RA	RA	Ninguna

- *Suceso iniciador AD-PUB 1.9: Pérdida de la fuente en el proceso de envío/devolución entre el remitente y el destinatario.*

Este suceso puede ocurrir durante la etapa de adquisición y sus consecuencias, en caso de no corregirse, serían muy altas, ya que pudiera implicar que la fuente radiactiva llegue al dominio público sin control, ocasionando muerte o daños limitantes a uno o varios miembros del público. La frecuencia del suceso iniciador se clasifica como “baja”, es decir, es muy poco frecuente,

aunque se conoce que este tipo de evento ya ha ocurrido. Se identifican 4 reductores de frecuencia, sin embargo, resulta insuficiente para reducir su frecuencia hasta niveles muy bajos. Para detectar y evitar que el suceso iniciador progrese hacia un accidente, se ha identificado solo una barrera en la empresa de referencia, la cual es de tipo de procedimiento (para evacuación de equipos y fuentes) y que solo garantiza rebajar la probabilidad de falla hasta “Probabilidad Media”. Por otra parte la empresa de referencia cuenta con 4 reductores de consecuencias que permiten reducir las consecuencias desde muy altas, hasta “Consecuencias Altas”. En estas condiciones la matriz de riesgo evalúa esta secuencia como “Riesgo Alto”.

Se hace por tanto imprescindible implementar, al menos, otra barrera u otro reductor de frecuencia, que nos permita reducir el riesgo hasta “Riesgo Medio”.

- *Suceso iniciador ALT-PUB 3.4: Eventos naturales que afecten la instalación con la consecuente pérdida de control de la fuente radiactiva y equipos.*

Este suceso puede ocurrir durante la etapa de Almacenamiento temporal y sus consecuencias, en caso de no corregirse, serían muy altas ya que pudiera implicar que la fuente caiga incontroladamente en el dominio público ocasionando muerte o daños limitantes a uno o varios miembros del público. La frecuencia del suceso iniciador se clasifica como “Baja”, es decir, es muy poco frecuente, aunque se conoce que este tipo de evento ya ha ocurrido. Se identifica un reductor de frecuencia (selección adecuada del emplazamiento) sin embargo, resulta insuficiente para reducir su frecuencia hasta niveles de muy baja. Para detectar y evitar que el suceso iniciador progrese hacia un accidente se ha identificado solo una barrera en la empresa de referencia, la cual es de tipo de procedimiento (para evacuación de equipos y fuentes) y que solo garantiza rebajar la probabilidad de falla hasta “Probabilidad media”. Por otra parte la empresa de referencia cuenta con 3 reductores de consecuencias que permiten rebajar las consecuencias desde muy altas, hasta “Consecuencias Altas”. En estas condiciones la matriz de riesgo evalúa esta secuencia con “Riesgo Alto”.

Se hace por tanto imprescindible implementar, al menos, otra barrera u otro reductor de frecuencia, que nos permita reducir el Riesgo hasta “Riesgo Medio”.

- *Suceso iniciador TR-PUB 4.4: Hurto del vehículo que ocasiona que la fuente caiga en el dominio público.*

Este suceso puede ocurrir durante la etapa de transportación y sus consecuencias, en caso de no corregirse, serían muy altas ya que pudiera implicar que la fuente caiga incontroladamente en el dominio público ocasionando muerte o daños limitantes a uno o varios miembros del público. La frecuencia del suceso iniciador se clasifica como “baja”, ya que aunque es muy poco frecuente se conoce que este tipo de eventos ya ha ocurrido. Se identifican 4 reductores de frecuencia que resultan suficientes para reducir esta hasta niveles de Frecuencia “muy baja”. Para detectar y controlar que el iniciador progrese hacia un accidente, se han identificado una barrera en la empresa de referencia, por lo que la probabilidad se evalúa como “Probabilidad Media”. Por otra parte la Empresa de referencia cuenta con 3 reductores de consecuencia que permiten rebajar las consecuencias hasta “Consecuencias altas”. En estas condiciones la matriz de riesgo evalúa esta secuencia con “Riesgo Alto”.

Se hace por tanto imprescindible implementar, al menos, una barrera, que nos permita reducir el Riesgo hasta “Riesgo Medio”.

- *Suceso iniciador TR-PUB 4.5: Robo con violencia del vehículo que ocasiona que la fuente caiga en el dominio público.*

Este suceso puede ocurrir durante la etapa de Transporte y sus consecuencias, en caso de no corregirse, serían muy altas ya que pudiera implicar que la fuente caiga incontroladamente en

el dominio público ocasionando muerte o daños limitantes a uno o varios miembros del público. La frecuencia del suceso iniciador se clasifica como “Baja”, ya que aunque es muy poco frecuente se conoce que este tipo de eventos ya ha ocurrido. Se identifica 4 reductores de frecuencia que resultan suficientes para reducir esta hasta niveles de Frecuencia “Muy Baja”. Para detectar y controlar que el iniciador progrese hacia un accidente, no se han identificado barreras en la Empresa de referencia, por lo que la probabilidad se evalúa como “Probabilidad Alta”. Por otra parte la Empresa de referencia cuenta con 4 reductores de consecuencia que permiten rebajar las consecuencias hasta “Consecuencias Altas”. En estas condiciones la matriz de riesgo evalúa esta secuencia con “Riesgo Alto”.

Se hace por tanto imprescindible implementar, al menos, una barrera, que nos permita reducir el Riesgo hasta “Riesgo Medio”.

- *Suceso iniciador TR-PUB 4.7: Robo con violencias del equipo (proyector) que ocasiona que caiga en el dominio público.*

Este suceso puede ocurrir durante la etapa de Transporte y sus consecuencias, en caso de no corregirse, serían muy altas ya que pudiera implicar que la fuente caiga incontroladamente en el dominio público ocasionando muerte o daños limitantes a uno o varios miembros del público. La frecuencia del suceso iniciador se clasifica como “Baja”, ya que, aunque es muy poco frecuente se conoce que este tipo de eventos ya ha ocurrido. Se identifican 4 reductores de frecuencia que resultan suficientes para reducir esta hasta niveles de Frecuencia “Muy Baja”. Para detectar y controlar que el iniciador progrese hacia un accidente, no se han identificado barreras en la Empresa de referencia, por lo que la probabilidad se evalúa como “Probabilidad Alta”. Por otra parte la Empresa de referencia cuenta con 3 reductores de consecuencia que permiten rebajar las consecuencias hasta “Consecuencias altas”. En estas condiciones la matriz de riesgo evalúa esta secuencia con “Riesgo Alto”.

Se hace por tanto imprescindible implementar, al menos, una barrera, que nos permita reducir el Riesgo hasta “Riesgo Medio”.

- *Suceso iniciador TR-PUB 4.9: Accidente en un transporte no autorizado que ocasiona que el equipo (proyector) caiga en el dominio público.*

Este suceso puede ocurrir durante la etapa de Transporte y sus consecuencias, en caso de no corregirse, serían muy altas ya que pudiera implicar que la fuente caiga incontroladamente en el dominio público ocasionando muerte o daños limitantes a uno o varios miembros del público. La frecuencia del suceso iniciador se clasifica como “Baja”, ya que, aunque es muy poco frecuente se conoce que este tipo de eventos ya ha ocurrido. No se identifican reductores de frecuencia ya que el uso de un transporte no autorizado demuestra que se trata de una operación de transporte violatoria de las normas. Para detectar y controlar que el iniciador progrese hacia un accidente no se han identificado barreras en la Empresa de referencia, ya que el vehículo no está preparado para este tipo de transporte, por lo que la probabilidad se evalúa como “Probabilidad Alta”. Por otra parte, la Empresa de referencia cuenta con 3 reductores de consecuencia que permiten reducir las consecuencias hasta “Consecuencias Altas”. En estas condiciones la matriz de riesgo evalúa esta secuencia con “Riesgo Alto”.

En el caso de esta secuencia accidental es imposible reducir el riesgo y la única medida posible es que se prohíba explícitamente la transportación en estas condiciones.

- *Suceso iniciador TR-PUB 4.10: Hurto del equipo (proyector) durante el traslado en transporte no autorizado que ocasiona que caiga en el dominio público.*

Este suceso puede ocurrir durante la etapa de transportación y sus consecuencias, en caso de no corregirse, serían muy altas ya que pudiera implicar que la fuente caiga incontroladamente

en el dominio público ocasionando muerte o daños limitantes a uno o varios miembros del público. La frecuencia del suceso iniciador se clasifica como “Baja”, ya que, aunque es muy poco frecuente se conoce que este tipo de eventos ya ha ocurrido. Se identifica un reductor de frecuencia, pero este es insuficiente para reducir esta hasta niveles de Frecuencia “Muy Baja”. Para detectar y controlar que el iniciador progrese hacia un accidente no se han identificado barreras en la Empresa de referencia, ya que el vehículo no está preparado para este tipo de transporte, por lo que la probabilidad se evalúa como “Probabilidad Alta”. Por otra parte, la Empresa de referencia cuenta con 3 reductores de consecuencia que permiten reducir las consecuencias hasta “Consecuencias Altas”. En estas condiciones la matriz de riesgo evalúa esta secuencia con “Riesgo Alto”.

En el caso de esta secuencia accidental es imposible reducir el riesgo y la única medida posible es que se prohíba explícitamente la transportación en estas condiciones.

– *Suceso iniciador OP-PUB 6.13: Intento de hurto del equipo (proyector) durante los trabajos.*

Este suceso puede ocurrir durante la etapa de operación y sus consecuencias, en caso de no corregirse, serían muy altas ya que pudiera implicar que la fuente caiga incontroladamente en el dominio público, ocasionando muerte o daños limitantes a uno o varios miembros del público. La frecuencia del suceso iniciador se clasifica como “Baja”, ya que, aunque es muy poco frecuente se conoce que este tipo de eventos ya ha ocurrido. Se identifican 2 reductores de frecuencia en la Empresa de referencia, por lo que no es posible reducir la frecuencia. Para detectar y controlar que el iniciador progrese hacia un accidente se ha identificado una barrera en la empresa de referencia, por lo que la probabilidad se evalúa como “Probabilidad Media”. Por otra parte, la empresa cuenta con 3 reductores de consecuencia que permiten rebajar las consecuencias hasta “Consecuencias Altas”. En estas condiciones la matriz de riesgo evalúa esta secuencia con “Riesgo Alto”.

Se hace por tanto imprescindible implementar, al menos, una barrera y un reductor de frecuencia, que nos permita reducir el Riesgo hasta “Riesgo Medio”.

– *Suceso iniciador OP-PUB 6.14: Robo con violencia del equipo (proyector) durante los trabajos, que ocasiona que caiga en el dominio público.*

Este suceso puede ocurrir durante la etapa de operación y sus consecuencias, en caso de no corregirse, serían muy altas ya que pudiera implicar que la fuente caiga incontroladamente en el dominio público, ocasionando muerte o daños limitantes a uno o varios miembros del público. La frecuencia del suceso iniciador se clasifica como “Baja”, ya que, aunque es muy poco frecuente se conoce que este tipo de eventos ya ha ocurrido. Se identifica solo un reductor de frecuencia en la Empresa de referencia, por lo que no es posible reducir la frecuencia. Para detectar y controlar que el iniciador progrese hacia un accidente no se han identificado barreras en la empresa de referencia, por lo que la probabilidad se evalúa como “Probabilidad Alta”. Por otra parte, la empresa cuenta con 3 reductores de consecuencia que permiten rebajar las consecuencias hasta “Consecuencias Altas”. En estas condiciones la matriz de riesgo evalúa esta secuencia con “Riesgo Alto”.

Se hace por tanto imprescindible implementar, al menos, una barrera y un reductor de frecuencia, que nos permita reducir el Riesgo hasta “Riesgo Medio”.

– *Suceso iniciador OP-PUB 6.25: Errores durante la ejecución del plan de emergencia que afecta la efectividad de las respuestas planificadas.*

Este suceso puede ocurrir durante la etapa de operación y sus consecuencias, en caso de no corregirse, serían muy altas ya que pudiera implicar que la fuente caiga incontroladamente en el dominio público ocasionando muerte o daños limitantes a uno o varios miembros del público.

La frecuencia del suceso iniciador se clasifica como “Baja”, ya que, aunque es muy poco frecuente se conoce que este tipo de eventos ya ha ocurrido. Se identifican 3 reductores de frecuencia en la Empresa de referencia, pero al ser una secuencia accidental derivada de un error humano no es posible reducir la frecuencia hasta “Frecuencia Muy Baja”. Para detectar y controlar que el iniciador progrese hacia un accidente se ha identificado una barrera en la Empresa de referencia, por lo que la probabilidad se evalúa como “Probabilidad Media”. Por otra parte, la Empresa cuenta con 3 reductores de consecuencia que permiten rebajar las consecuencias hasta “Consecuencias Altas”. En estas condiciones la matriz de riesgo evalúa esta secuencia con “Riesgo Alto”.

Se hace por tanto imprescindible implementar, al menos, una barrera que nos permita reducir el Riesgo hasta “Riesgo Medio”.

1.3.3. Análisis detallado de los sucesos con Riesgo Alto y Consecuencias Altas

El estudio de la matriz de riesgo pone a la luz secuencias accidentales que pueden tener consecuencias Altas pero que sin embargo tienen un nivel de riesgo tolerable (Riesgo Medio) dado que tienen un grupo de defensas (barreras y reductores) suficientes como para reducir su probabilidad de ocurrencia significativamente. Ésta es una aportación característica de los estudios de riesgo, en los que no sólo se estudian los sucesos de consecuencias más Altas, sino que, además de éstas también se toman en consideración las probabilidades de que estos sucesos puedan convertirse en un accidente.

En el caso de la “Empresa de referencia”, no se identificaron secuencias accidentales de Riesgo Alto con Consecuencias Altas, pero si las defensas que se han previsto para reducir el riesgo en estas secuencias de Consecuencias Altas se degradan, no será difícil comprender que muchas de las secuencias de riesgo medio y consecuencias altas pueden pasar a tener Riesgo Alto alterando significativamente el perfil de riesgo de esta Empresa.

1.3.4. Medidas para reducir el riesgo de los sucesos iniciadores con Riesgo Alto

En la tabla 11 se proponen ejemplos de algunas medidas que contribuirían a reducir el riesgo de los iniciadores comentados en el apartado 5.3.2. Primero se apuntan posibles barreras de seguridad adicional a las existentes actualmente y en los casos en que éstas sean insuficientes se toman en consideración reductores de frecuencia del suceso iniciador o de sus consecuencias, que permitan disminuir el nivel de riesgo resultante.

TABLA 11 MEDIDAS PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE SUCESOS INICIADORES CON RIESGO ALTO

Nº	Suceso iniciador	Recomendaciones
1	<i>AD-PUB 1.9: Pérdida de la fuente en el proceso de envío/devolución entre el remitente y el destinatario.</i>	Barrera: Colocar un letrero visible en el bulto que alerte sobre el peligro del contenido, con instrucciones de cómo actuar en caso encontrar el bulto extraviado.
2	<i>ALT-PUB 3.4: Eventos naturales que afecten la instalación con la consecuente pérdida de control de la fuente y equipos.</i>	Barrera: Establecer un acuerdo con el cliente donde se contemplen medidas básicas de actuación del cliente en caso en eventos extraordinarios.
3	<i>TR-PUB 4.4: Hurto del vehículo que ocasiona que la</i>	Barrera: Colocar un letrero visible desde el puesto del conductor del vehículo donde se alerte a los intrusos

Nº	Suceso iniciador	Recomendaciones
	<i>fuelle caiga en el dominio público</i>	sobre los riesgos radiológicos de los equipos de radiografía.
4	<i>TR-PUB 4.5: Robo con violencia del vehículo que ocasiona que la fuente caiga en el dominio público.</i>	Barrera: Colocar un letrero visible desde el puesto del conductor del vehículo donde se alerte a los intrusos sobre los riesgos radiológicos de los equipos de radiografía.
5	<i>TR-PUB 4.7: Robo con violencias del equipo (proyector) que ocasiona que caiga en el dominio público.</i>	Barrera: Procedimiento que establece que ante situaciones de Robo el operador alerte a los intrusos sobre los riesgos radiológicos de los equipos de radiografía
6	<i>TR-PUB 4.9: Accidente en un transporte no autorizado que ocasiona que el equipo (proyector) caiga en el dominio público</i>	Barrera: Colocar un letrero visible en el contenedor donde se transporta el equipo donde se alerte a los intrusos sobre los riesgos radiológicos de los equipos de radiografía
7	<i>TR-PUB 4.10: Hurto del equipo (proyector) durante el traslado en transporte no autorizado que ocasiona que caiga en el dominio público</i>	Barrera: Colocar un letrero visible en el contenedor donde se transporta el equipo donde se alerte a los intrusos sobre los riesgos radiológicos de los equipos de radiografía
8	<i>OP-PUB 6.13: Intento de hurto del equipo (proyector) durante los trabajos</i>	Barrera: Colocar un letrero visible en el contenedor donde se transporta el equipo donde se alerte a los intrusos sobre los riesgos radiológicos de los equipos de radiografía
9	<i>OP-PUB 6.14: Robo con violencia del equipo (proyector) durante los trabajos que ocasiona que caiga en el dominio público</i>	Barrera: Procedimiento que establece que ante situaciones de Robo el operador alerte a los intrusos sobre los riesgos radiológicos de los equipos de radiografía
10	<i>OP-PUB 6.25: Errores durante la ejecución del plan de emergencia que afecta la efectividad de las respuestas planificadas</i>	Barrera: Establecer un procedimiento de chequeo cruzado o revisión redundante de las acciones que se ejecuten como parte del plan de emergencias

1.3.5. Análisis de importancia de las defensas (barreras y reductores).

A continuación presentamos algunos ejemplos que ilustran la forma en que se realiza el análisis de la importancia estructural de las defensas.

En tal sentido nos hemos restringido al análisis de la importancia estructural de barreras y reductores de frecuencia, pero un análisis similar puede realizarse con los reductores de consecuencia.

1.3.5.1. Importancia estructural de las barreras

En la tabla 12 se presenta la lista de las barreras (en orden decreciente) del valor de la importancia estructural de las mismas, según lo definido en el capítulo 2.

TABLA 12. IMPORTANCIA DE LAS BARRERAS

N°	Denominación de la Barreras	Iniciadores en los que esta barrera participa	
		N°	%
1.	<u>Uso de monitor portátil (radiómetro) con alarma</u>	34	44.7%
2.	<u>Uso dosímetro de lectura directa con alarma</u>	33	43.4 %
3.	<u>Enclavamiento del equipo que impide conectar el tele mando con el equipo</u>	20	26.3 %
4.	<u>Odómetro en el telemando que indica de que la fuente no ha regresado</u>	14	18.4 %
5.	<u>Indicador visual en equipo de que la fuente no ha retornado a la posición de seguridad</u>	13	17.1 %

En las Figuras 9, 10, 11, 12 y 13 se muestran como varía el perfil de riesgo de la “Empresa de referencia” en caso de que, coyunturalmente, no se cuente con una de estas barreras de mayor índice de importancia estructural.

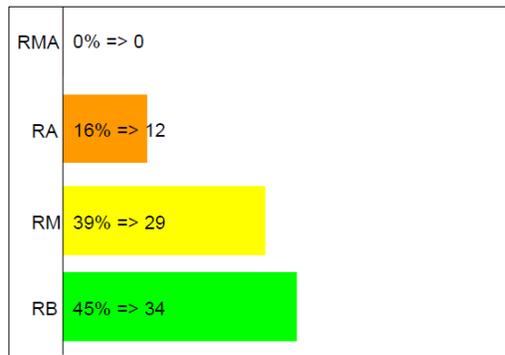


Figura 9. Efecto de la supresión de la barrera “Uso de monitor portátil (radiómetro) con alarma”.

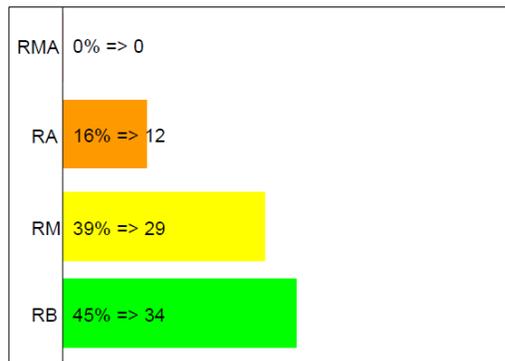


Figura 10. Efecto de la supresión de la barrera “Uso dosímetro de lectura directa con alarma”

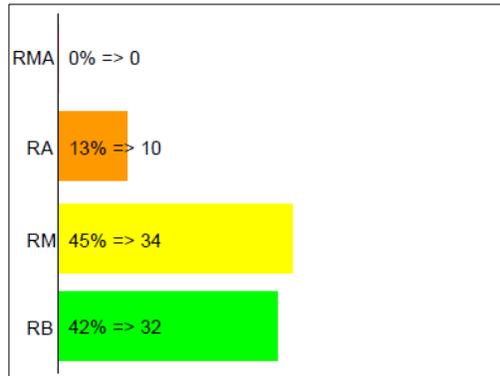


Figura 11. Efecto de la supresión de la barrera “Odómetro en el telemando que indica de que la fuente no ha regresado”.

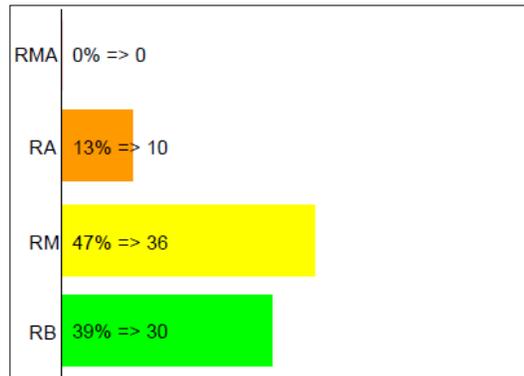


Figura 12. Efecto de la supresión de la barrera “Enclavamiento del equipo que impide conectar el tele mando con el equipo”.

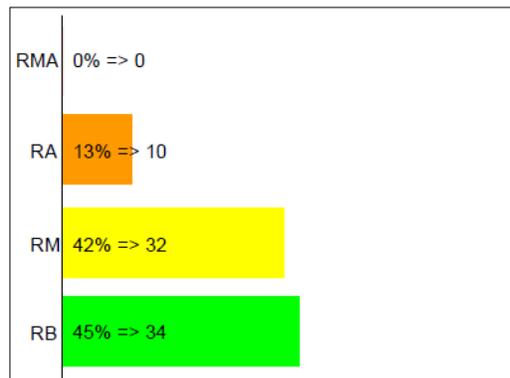


Figura 13. Efecto de la supresión de la barrera “Indicador visual en equipo de que la fuente no ha retornado a la posición de seguridad”.

Aunque el efecto independiente de cada una de estas 5 barreras no es muy evidente en el incremento del nivel de riesgo, debe quedar claro que la pérdida de cada una de estas barreras, incrementa el “valor” del riesgo de todos los sucesos donde ellas participan (a pesar de que el riesgo se mantenga en el mismo “nivel”).

Por otra parte el efecto combinado de estas pocas barreras puede ser muy significativo en el empeoramiento de las condiciones de seguridad de la práctica de radiografía. En tal sentido analicemos la situación de una empresa hipotética que dispone de equipos que no cumplen la normativa aplicable y en consecuencia supongamos que no disponen de las medidas de seguridad 3, 4 y 5 de la Tabla 12 y además no disponen de los equipos de protección radiológica descritos en las medidas 1 y 2 de la Tabla 12. A continuación se representa gráficamente el perfil de riesgo resultante para esta entidad hipotética, demostrándose que unas pocas barreras de seguridad falladas pueden tener un impacto significativo en la elevación de los niveles de riesgo con que se está trabajando. (Fig. 14)

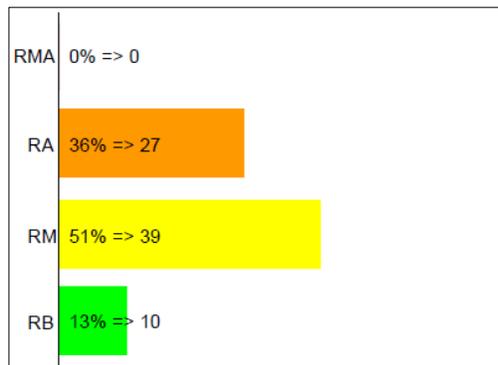


Figura 14. Efecto de la supresión al mismo tiempo de las 5 Barreras de mayor índice de importancia estructural.

Al comparar la figura 14 y la figura 7 se hace evidente que la no existencia de unas pocas defensas puede elevar significativamente el riesgo de accidentes. Este tipo de análisis es de gran importancia para usuarios y reguladores, ya que les permite monitorear la situación del riesgo de la empresa en cada situación específica.

1.3.5.2. Importancia estructural de los reductores de consecuencias

Del mismo modo que se ha analizado la importancia de las barreras, se puede analizar también la importancia de los reductores de consecuencias, que, aunque no impiden que ocurran las exposiciones accidentales, son decisivos para mitigar las consecuencias de muchas de éstas. (Tabla 13 y Fig.15)

1. TABLA 13. IMPORTANCIA DE LOS REDUCTORES DE CONSECUENCIAS

Nº	Reductores de consecuencias	Iniciadores en los que participa	
		Nº	%
1.	Plan de emergencia.	51	65%

N°	Reductores de consecuencias	Iniciadores en los que participa	
2.	Disponibilidad de medios de comunicación para reporte de incidentes durante el viaje.	24	31.5%
3.	Dispositivo de rastreo ON LINE (GPS). Dispositivo de rastreo en tiempo real.	17	22.4%

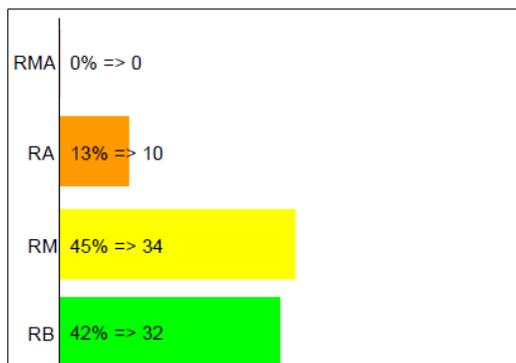


Figura 15. Importancia de los reductores de consecuencias.

Aunque la supresión de estos 3 reductores de consecuencia no muestra reducción del número de sucesos con riesgo alto, el hecho de que estos reductores participen en muchas secuencias accidentales de consecuencias muy altas demuestra que son fundamentales para mitigar las consecuencias.

1.3.6. Conclusiones específicas para la práctica de gammagrafía móvil.

- Se ha aplicado la metodología de matrices de riesgo a la práctica de Gammagrafía Industrial con fuentes radiactivas móviles y se generó una lista de 76 posibles sucesos iniciadores que pudieran provocar exposiciones accidentales. De estos 76 sucesos, el 50 % tendrían consecuencias para los trabajadores ocupacionales y el 50 % para miembros del público. Por otra parte 41 (53,9 %) son derivados de errores humanos, 13 sucesos (17,2 %) son fallos de equipos y 22 sucesos (28,9 %) son eventos externos.
- Como resulta evidente en la conclusión anterior es importante resaltar que los sucesos iniciadores derivados de fallos de equipos son la minoría, porque los equipos utilizados en la actualidad se fabrican con altos estándares de seguridad. Sin embargo los sucesos iniciadores relacionados con errores humanos son la mayor contribución, por lo que resulta imprescindible enfocar las medidas de mejoras hacia los factores humanos y organizacionales (creación de competencias, cultura de seguridad, entre otros.)
- Esta evaluación ha permitido identificar 77 barreras directas, 64 elementos que contribuyen a reducir la frecuencia de los sucesos iniciadores de accidente (reductores de frecuencia) y 10 que podrían disminuir la severidad de las potenciales consecuencias (reductores de consecuencias).
- La evaluación de la empresa de referencia ha permitido identificar que no existen sucesos con riesgo muy alto, por lo cual no existe un riesgo inminente que provoque la paralización de la práctica. Se han encontrado 10 secuencias accidentales de riesgo alto (13%), 32 de riesgo medio (42%) y 34 de riesgo bajo (45%).

- Atendiendo a que existe 10 secuencias accidentales de Riesgo Alto, se ha propuesto un plan de acción con medidas que permitirán reducir estos riesgos hasta niveles aceptables. Es importante destacar que todas las medidas propuestas son medidas administrativas que no suponen un costo considerable para la empresa de referencia
- Se han identificado las barreras y reductores que mayor impacto tienen en la reducción de los riesgos demostrándose la necesidad de mantener una especial vigilancia sobre el mantenimiento de estas.
- Se ha podido demostrar que la pérdida de unas pocas barreras (5 barreras de un total de 77 identificadas) aumentan considerablemente el riesgo de la empresa de referencia hasta el punto de que más del 37 % de las secuencias accidentales pasarían a tener Riesgo Alto.

2. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO EN LA TÉCNICA DE GAMMAGRAFÍA INDUSTRIAL EN BUNKER

2.1. Resultados generales sobre la gammagrafía en bunker

En este apartado se presentan los principales resultados de la aplicación del método de matrices de riesgo al proceso de la práctica de Gammagrafía en búnker. La matriz completa se muestra en el Apéndice 2.

Utilizando la herramienta SEVRA se realizó el análisis de la Empresa de referencia y se obtuvo el perfil de riesgo que se muestra a continuación.

2.1.1. Resumen estadístico

La tabla 14 muestra un resumen estadístico de la aplicación del método de matriz de riesgo en la empresa de referencia que realiza la práctica de Gammagrafía en Búnker.

TABLA 14. RESUMEN DE RESULTADOS DE LA MATRIZ DE RIESGO EN GAMMAGRAFÍA EN BUNKER

Número de Sucesos Analizados	70	
Con consecuencias sobre el trabajador ocupacional	55	78 %
Con consecuencias sobre miembros del público	15	22 %
Con Consecuencias Muy Altas	17	24 %
Con Consecuencias Altas	37	52 %
Con Consecuencias Moderadas	16	23 %
Número de barreras analizadas	82	
Número de reductores de frecuencia analizados	56	
Número de reductores de consecuencias analizados	23	
	Resultados	
Secuencias con Riesgo Muy Alto	0	
Secuencias con Riesgo Alto	1	1,4 %
Con riesgo Alto y Consecuencias Muy Altas	0	0 %

Con riesgo Alto y Consecuencias Altas	1	1.4 %
Con riesgo Alto y Consecuencias Moderadas	0	0 %
Secuencias con Riesgo Medio	24	34%
Con riesgo Medio y Consecuencias Muy Altas	13	18.5 %
Con riesgo Medio y Consecuencias Altas	11	15,7%
Con riesgo Medio y Consecuencias Moderadas	0	0%
Secuencias con Riesgo Bajo	45	64 %

En la Figura 16 se resumen estos mismos resultados de manera gráfica, y puede observarse la distribución de los riesgos Altos, Medios y Bajos en las diferentes etapas del proceso de Gammagrafía en Búnker.

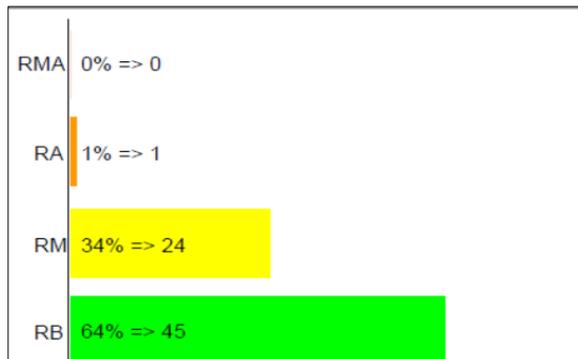


Figura 16. Importancia de los reductores de consecuencias.

TABLA 15. RESUMEN DE RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA MATRIZ DE RIESGO EN GAMMAGRAFÍA EN BÚNKER.

Núm.	Etapa	Riesgo Muy Alto (RMA)	Riesgo Alto (RA)	Riesgo Medio (RM)	Riesgo Bajo (RB)	No Aplica (NA)	Analizados	Total por Etapa	Completo
1	ADQUISICIÓN	0	1	5	5	0	11	11	✓
2	ALMACENAMIENTO/RECINTO OPERACION	0	0	7	8	0	15	15	✓
3	OPERACION EN BUNKER	0	0	11	29	0	40	40	✓
4	MANTENIMIENTO	0	0	1	3	0	4	4	✓
Total		0	1	24	45	0	70	70	4

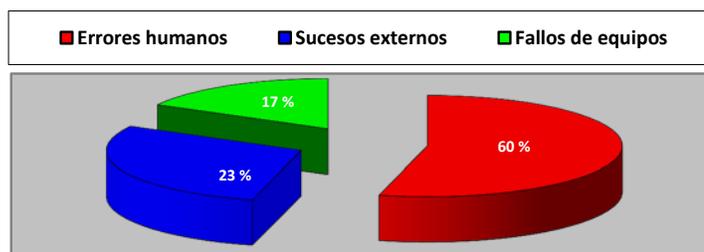


Figura 17. Distribución de sucesos iniciadores para las diferentes etapas.

Se generó una lista de 70 posibles sucesos iniciadores que pudieran provocar exposiciones accidentales. Estos sucesos pudieran producirse tanto en alguna de las etapas del proceso de Gammagrafía en Búnker, considerando desde la etapa de pedido de las fuentes y equipos, almacenamiento, hasta las etapas de operación y mantenimiento. De estos 70 sucesos, el 78% tendrían consecuencias para los trabajadores ocupacionales y el 22 % para miembros del público, este resultado es entendible pues se trata de trabajos en búnker, que entre el confinamiento de la fuente por blindaje y el funcionamiento de los enclavamientos como sistemas de seguridad de la instalación, se limita el acceso al público de las inmediaciones, con más defensa en profundidad que en la gammagrafía móvil. Aunque tienen consecuencias específicamente al público todos aquellos sucesos que pueden implicar pérdida de control de equipos y fuentes radiactivas que pueden llegar al dominio público.

De los 70 sucesos iniciadores analizados 42 son derivados de errores humanos (60%), 16 son eventos externos (23%) y 12 son fallos de equipos (17%). (Fig. 17)

Asimismo, se analizaron 82 barreras directas, 56 elementos que contribuyen a reducir la frecuencia de los sucesos iniciadores de accidente (reductores de frecuencia) y 23 que podrían disminuir la severidad de las potenciales consecuencias (reductores de consecuencias).

Hay barreras que se consideran en conjunto porque realmente actúan como una única barrera, por ejemplo, el enclavamiento de puerta asociado al monitor de radiación de área fijo en el búnker, que también activa la señal luminosa y acústica fuera del búnker, se considera como una barrera, aunque también se analiza el monitor de área fijo con alarma aisladamente, dado que hay instalaciones fijas que solo cuentan con este dispositivo.

Asimismo el monitor de radiación portátil suele llevar asociada una alarma. Si es así, el fallo del monitor por falta de batería, por ejemplo, lleva aparejado el fallo de la otra barrera que es la alarma. Estas situaciones se tendrán en cuenta al analizar las barreras.

Ha quedado comprobado que no hay secuencias de riesgo muy alto en la Empresa de referencia, lo que significa que esta empresa no está amenazada por un riesgo inminente de

accidentes. Sin embargo, el hecho de que exista una secuencia accidental de Riesgo Alto significa que esta “Empresa de referencia” está obligada a elaborar un Plan de Acción para reducir ese riesgo.

2.1.2. Análisis detallado del suceso con Riesgo Alto y consecuencias Muy Altas

De los 17 sucesos con consecuencias catastróficas identificados en el estudio, uno se evalúa con Riesgo Alto, lo cual según los criterios de aceptabilidad del riesgo establecidos en la metodología (epígrafe 2.2.7), es un riesgo inaceptable.

-Suceso iniciador AD-EH-PER-FR: Es importante destacar que el riesgo alto por error humano en el control durante la etapa de envío/devolución de la/s fuente/s entre el remitente y el destinatario con pérdida del contenedor con la/s fuente/s en el dominio público. Una vez se ha extraviado el contenedor con la/s fuente/s en el dominio público no se puede asegurar las actuaciones que pueden dar lugar a que se acceda a la misma y el daño que puede causar puede ser catastrófico a miembros del público. La frecuencia de este suceso es baja y teniendo en cuenta los reductores de frecuencia que dispone la entidad de referencia: el cumplimiento de las directrices de importación y exportación del Código de Conducta de la OIEA, utilizar transportistas autorizados que conocen la reglamentación de transporte que aplica a este tipo de materiales radiactivos y la correcta señalización del bulto de transporte que pone en conocimiento el nivel de riesgo que representa, permite reducir el nivel de frecuencia a muy bajo. Como solo figura una barrera, que es el seguimiento del protocolo de control de importación y exportación el riesgo es alto. En el análisis de los reductores de consecuencias hay que tener en cuenta que se perdería el contenedor, que dispone de enclavamientos de seguridad que evitan el acceso a las fuentes, encontrándose éstas en situación de seguridad y blindadas. Además este contenedor dispone de señalización, que tras la comunicación a la población de la pérdida puede alertarles de su contenido y de las actuaciones a realizar para su entrega.

2.1.3. Medidas para reducir el riesgo de los sucesos iniciadores con Riesgo Alto

En el cuadro se presenta la posible medida para reducir el riesgo del suceso iniciador con riesgo alto. En primer lugar, se han explorado posibles barreras adicionales a las existentes actualmente. En los casos en que estas medidas sean insuficientes, se han tomado en consideración los posibles reductores de frecuencia del suceso iniciador o de sus consecuencias potenciales, que permitan reducir el nivel de riesgo resultante.

TABLA 16. MEDIDAS PARA LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE SUCESOS INICIADORES CON RIESGO ALTO EN EL SEGUNDO CRIBADO

Nº	Suceso iniciador	Recomendaciones
1	Pérdida de la fuente en el proceso de envío/devolución entre el proveedor y el cliente, con posibilidad de caer en el dominio público.	Barrera: Insertar un GPS en el contenedor de las fuentes. Barrera: Colocar un letrero visible en el bulto que alerte sobre el peligro del contenido, con instrucciones de cómo actuar en caso encontrar el bulto extraviado.

2.1.4. Análisis de importancia de las defensas (barreras y reductores)

A continuación presentamos algunos ejemplos que ilustran la forma en que se realiza el análisis de la importancia estructural de las defensas. En tal sentido nos hemos restringido al

análisis de la importancia estructural de barreras y reductores de frecuencia, pero un análisis similar puede realizarse con los reductores de frecuencia.

2.1.4.1. Importancia estructural de las barrera

En la tabla 17 se presenta la lista de las barreras (en orden decreciente) del valor de la importancia estructural de las mismas, según lo definido en el capítulo 2.

TABLA 17. IMPORTANCIA DE LAS BARRERAS

Nº	Denominación de la Barreras	Iniciadores en los que esta barrera participa	
		Nº	%
1.	Monitor portátil con alarma que se utiliza para procedimientos de monitoreo (alrededor del equipo para comprobar tasa de dosis de diseño, alrededor de los recintos blindados para comprobar el blindaje, en operación al acercarse al equipo para comprobar que la fuente está dentro del mismo).	39	55.7%
2.	Monitor de área fijo con alarma	34	48.5 %
3.	Uso del odómetro del telemando manual o indicador en el telemando automático de posición de exposición/retracción	27	38.5 %
4.	Enclavamiento de puerta e indicadores luminosos y acústicos del búnker en base a la medida del monitor de radiación.	25	35.7 %
5.	Enclavamientos de la fuente en el equipo según ISO 3999	24	34.2%

En las figuras 18, 19, 20 y 21, se muestra como varía el perfil de riesgo de la “Empresa de referencia” en caso de que, coyunturalmente, no se cuente con una de estas barreras de mayor índice de importancia estructural.

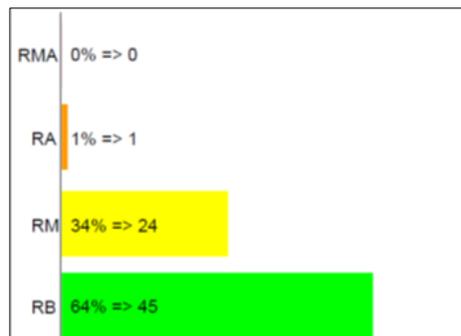


Figura 18. Efecto de la supresión de la barrera “Uso de monitor portátil con alarma”.

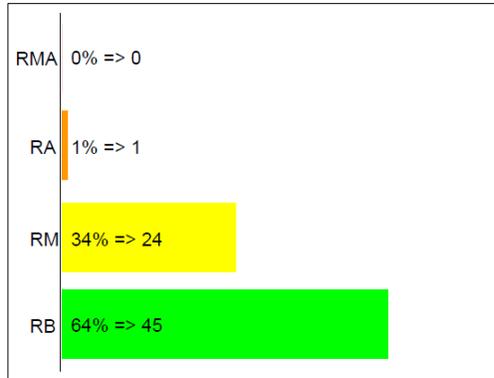


Figura 19. Efecto de la supresión de la barrera “Uso de monitor fijo con alarma”.

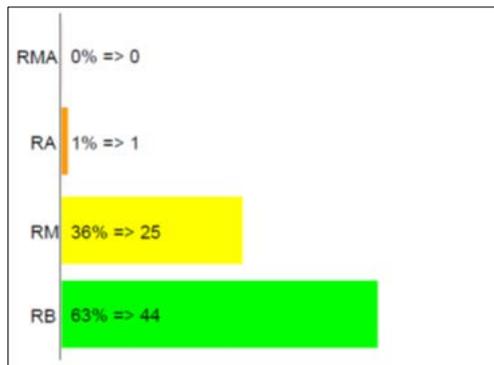


Figura 20. Efecto de la supresión de las barreras “Sin enclavamiento-monitor fijo en la puerta”.

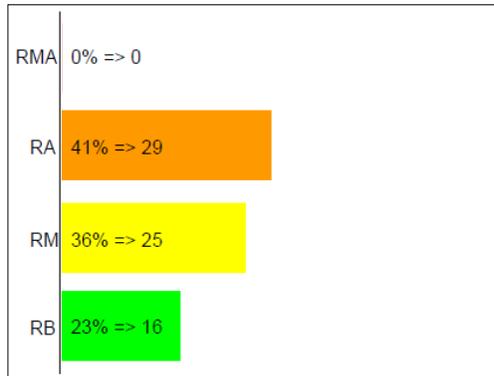


Figura 21. Efecto de la supresión de 5 de las barreras.

En las etapas de adquisición, almacenamiento y mantenimiento, como puede ser la prueba de los equipos y accesorios tras su adquisición, el almacenamiento fuera de la operación o el mantenimiento de equipos no se realiza en el búnker como tal, y no entran a funcionar barreras como son el enclavamiento de puerta, habitualmente conectado al monitor de radiación fijo con alarma y las señalizaciones acústicas y sonoras en el exterior del búnker también conectadas al monitor.

En la etapa de operación los enclavamientos del búnker son la primera barrera que impide acercarse a la fuente radiactiva cuando se está irradiando.

En caso de no disponer de esos enclavamientos, la segunda barrera sería acercarse con un monitor de radiación con alarma, que nos indicaría un nivel de radiación de tal nivel que sería compatible con un suceso iniciador que mantiene a la fuente fuera del equipo proyector, pero ya se iniciarían las consecuencias, puesto que ya hay irradiación.

Otra posible barrera antes de entrar en el recinto es el procedimiento de contar vueltas en el odómetro del telemando y así conocer si se ha retraído o no el telemando.

El indicador del equipo de fuente asegurada o no (equipos que cumplen la norma ISO 3999 o similar), se considera un reductor de consecuencias, dado que para comprobar esta indicación hay que acercarse al equipo, con lo cual ya se han iniciado las consecuencias).

Para rescatar la fuente hay que eliminar los enclavamientos de la puerta del búnker e iniciar el plan de emergencia.

En este caso la barrera ya no son los enclavamientos del búnker, sino una buena planificación de las actuaciones, uso de equipamiento de emergencias y procedimientos al respecto, y sobre todo la medida de las tasas de dosis (alarma asociada al monitor de radiación y procedimiento de monitoreo al acercarse al equipo) y medida de dosis (DLD).

2.1.4.2. Importancia estructural de los reductores de consecuencias

Del mismo modo que se ha analizado la importancia de las barreras, se puede analizar también la importancia de los reductores de consecuencias, que, aunque no impiden que ocurran las exposiciones accidentales, son decisivos para mitigar las consecuencias de muchas de éstas. (Tabla 18)

TABLA 18. IMPORTANCIA DE LOS REDUCTORES DE CONSECUENCIAS

	Denominación de los reductores	Participan	
		Nº	%
1	Ejecución del plan de emergencia Nacional y/o de la entidad, que incluye comunicación oficial al público sobre pérdida de fuentes y criterios de actuación en caso de encontrarlas	40	57 %
2	Monitoreo periódico alrededor de equipos	4	5.7%
3	Indicador visual en equipo de la posición de la fuente (asegurada en la posición de seguridad ó no asegurada). Equipos que cumplen la ISO 3999 ó similar.	23	32 %
4	Dispositivo de rastreo on-line	6	8.5 %
5	Ubicación recinto fuera de áreas residenciales	5	7.1 %
6	Señalización del bulto	3	4.2 %

	Denominación de los reductores	Participan	
8	Verificación periódica de la tasa de dosis en almacén, bunker de operación y del estado de las barreras	7	10 %

Aunque la supresión de los 3 primeros reductores de consecuencia no muestra reducción del número de sucesos con Riesgo Alto el hecho de que estos reductores participen en muchas secuencias accidentales de consecuencias muy altas demuestra que son fundamentales para mitigar las consecuencias.

Si se omite esta revisión o se realiza sin detectar posibles anomalías, las consecuencias pueden ser Altas.

2.1.5. Conclusiones específicas para la práctica de gammagrafía en búnker

- Se pudo confirmar que el 60 % de los sucesos iniciadores postulados están relacionados con errores humanos y que la mayoría de las secuencias accidentales asociadas a mayores riesgos se corresponden con este tipo de errores. Se pudo identificar que existe un grupo de barreras que actúan en la reducción del riesgo en varias secuencias accidentales y por tanto, tienen una importancia relativa en la reducción del riesgo.
- Los resultados obtenidos (un solo riesgo alto que no tiene que ver con los trabajos dentro del recinto de irradiación) evidencian que la gammagrafía con fuentes de radiación en búnker es más segura, los riesgos son menores que en el caso de la operación móvil. Por un lado aumentan para la mayoría de los sucesos iniciadores las barreras, como son los sistemas de seguridad por enclavamientos en las puertas de acceso, también es muy importante el procedimiento de entrar y acercarse al equipo utilizando un monitor de radiación portátil con alarma para verificar que la fuente se encuentra blindada.
- La cantidad de barreras que poseen estas instalaciones como los enclavamientos en las puertas al recinto no permiten el acceso durante el proceso de irradiación, hasta que se garantice que la fuente está completamente blindada, así como la indicación sonora y/o luminosa en el exterior del recinto indicando si la fuente está o no expuesta. La disposición de un segundo nivel de barreras si es que no actuaron los enclavamientos en los accesos, como es el monitor de área estacionario con alarma situado en el interior, que alertaría de que hay una fuente expuesta.
- Por todo ello, la operación en búnker teniendo en cuenta el diseño de los equipos en cuanto al cumplimiento de la norma internacional ISO 3999, no afecta en un gran número de iniciadores al riesgo en la operación, porque lo suplen las otras barreras, lográndose una mayor defensa en profundidad que en la práctica de gammagrafía móvil.
- El búnker en operación para que garantice la seguridad en los trabajos de radiografía industrial, debe contar con enclavamientos suficientes además del blindaje de confinamiento de la fuente de radiación, se demostró que la supresión de estos sistemas trae un gran número de sucesos iniciadores en los que el riesgo es alto.

- El monitor de radiación portátil es un elemento muy importante en las operaciones de gammagrafía industrial fija, pero hay que considerar que es un procedimiento que incluye el uso del equipo. (escalas en que mide, paso de escalas, puesta a cero, entre otros, donde medir, que esté en correcto estado: verificaciones y/o calibraciones periódicas, adecuado a la radiación y energía que se quiere medir, entre otros aspectos a considerar.)
- El operador debe tener una buena formación y competencia. Por tanto, la capacitación del personal de operación, supervisores y oficial de protección radiológica es fundamental para el buen desarrollo de estas prácticas.

3. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO EN LA TÉCNICA DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL CON RX MOVIL

En este apartado se presentan los principales resultados de la aplicación del método de matrices de riesgo al proceso de la práctica de Radiografía con Rx móvil. La matriz completa se muestra en el Apéndice 3.

3.1. Resultados generales sobre radiografía industrial con Rx móvil

3.1.1. Resumen estadístico

La tabla 19 muestra un resumen estadístico de la aplicación del método de matriz de riesgo en la empresa de referencia que realiza la práctica de Radiografía con Rx móvil.

TABLA 19. RESUMEN DE RESULTADOS DE LA MATRIZ DE RIESGO EN RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL CON RX MÓVIL

Número de Sucesos Analizados	20	
Con consecuencias sobre el trabajador ocupacional	7	35 %
Con consecuencias sobre miembros del público	13	65 %
Con Consecuencias Muy Altas	0	0 %
Con Consecuencias Altas	8	40.0 %
Con Consecuencias Moderadas	12	60.0 %
Número de barreras analizadas	26	
Número de reductores de frecuencia analizados	21	
Número de reductores de consecuencias analizados	5	
	Resultados	
Secuencias con Riesgo Muy Alto	0	
Secuencias con Riesgo Alto	0	
Secuencias con Riesgo Medio	9	45 %
Con riesgo Medio y Consecuencias Muy Altas	0	0 %
Con riesgo Medio y consecuencias Altas	3	15 %

Con riesgo Medio y Consecuencias Moderadas	6	30 %
Secuencias con riesgo Bajo	11	55 %

En la Figura 22 se resumen estos mismos resultados de manera gráfica y puede observarse la distribución de los riesgos Altos, Medios y Bajos en las diferentes etapas del proceso de radiografía con Rx móvil.

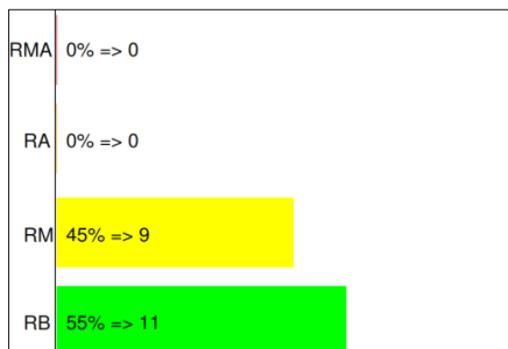


Figura 22. Resumen de resultados de la aplicación de la matriz de riesgo en radiografía con Rx móvil.

Se generó una lista de 20 posibles sucesos iniciadores que pudieran provocar exposiciones accidentales. Estos sucesos pudieran producirse en alguna de las etapas del proceso de radiografía con Rx móvil, considerando desde la etapa de pedido de los equipos hasta la etapa de operación propiamente. De estos 20 sucesos, el 35 % tendrían consecuencias para los trabajadores ocupacionales y el 65 % para miembros del público.

De estos 20 sucesos iniciadores analizados 10 (50%) son derivados de errores humanos 2, (10%) son fallos de equipos y 8 (40%) son eventos externos.

Asimismo, se analizaron 26 barreras directas, 21 elementos que contribuyen a reducir la frecuencia de los sucesos iniciadores de accidente (reductores de frecuencia) y 5 que podrían disminuir la severidad de las potenciales consecuencias (reductores de consecuencias).

Ha quedado comprobado que no hay secuencias de riesgos altos y muy altos en la Empresa de referencia, lo que significa que esta empresa no está amenazada por un riesgo inminente de accidentes.

3.1.2. Análisis de importancia de las barreras

En la tabla 20 se presenta la lista de las barreras (en orden decreciente) del valor de la importancia estructural de las mismas, según lo definido en el capítulo 2.

TABLA 20. IMPORTANCIA DE LAS BARRERAS

N°	Denominación de las barreras	Iniciadores en los que esta barrera participa	
		N°	%
1	Uso de dosímetro con alarma sonora y vibrador	7	35 %
2	Uso de monitor portátil (radiómetro) con alarma	7	35 %

3	Utilizar vehículos cerrados para el transporte	4	20 %
4	Indicador visual en el cabezal que indica que el equipo se	3	15 %

En las figuras 23, 24, 25 y 26 se muestra como varía el perfil de riesgo de la “Empresa de referencia” en caso de que, coyunturalmente, no se cuente con una de estas barreras de mayor índice de importancia estructural.

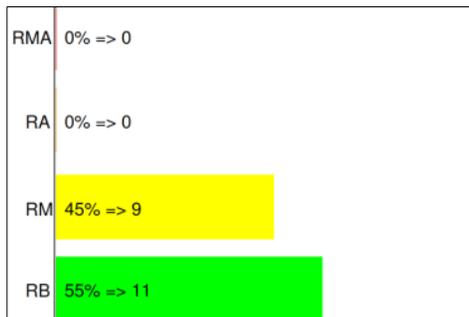


Figura 23. Efecto de su supresión de la barrera “Uso de monitor portátil (radiómetro) con alarma”.

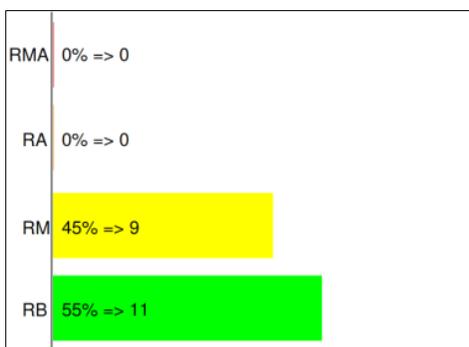


Figura 24. Efecto de su supresión de la barrera “Uso dosímetro de lectura directa con alarma.”

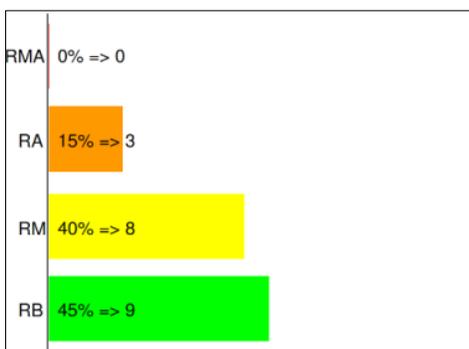


Figura 25. Efecto de su supresión de la barrera “Utilizar vehículos cerrados para el transporte”.

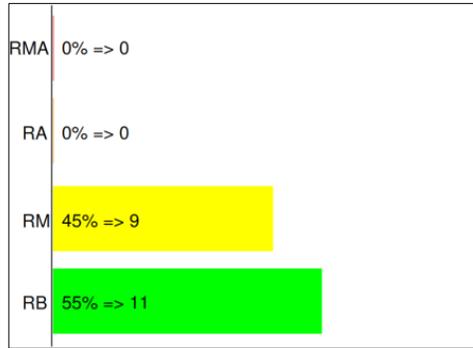


Figura 26. Efecto de su supresión de la barrera “Indicador visual en el cabezal que indica que el equipo se encuentra irradiando”.

Se evidencia que la supresión de la barrera “Utilizar vehículos cerrados para el transporte” causa un aumento del nivel de riesgo, de Medio a Alto en los tres sucesos en participa.

Aunque el efecto independiente de las demás barreras no es muy evidente en el incremento del nivel de riesgo, debe quedar claro que la pérdida de cada una de estas barreras incrementa el “valor” del riesgo de todos los sucesos donde ellas participan (a pesar de que el riesgo se mantenga en el mismo “nivel”).

Por otra parte, el efecto combinado de estas pocas barreras puede ser muy significativo en el empeoramiento de las condiciones de seguridad de la práctica de radiografía.

En tal sentido analicemos la situación de una empresa hipotética que dispone de equipos que no cumplen la normativa aplicable y en consecuencia supongamos que no disponen de las medidas de seguridad 3 y 4 de la Tabla 20 y además no disponen de los equipos de protección radiológica descritos en las medidas 1 y 2 de la Tabla 20.

A continuación se representa gráficamente el perfil de riesgo resultante para esta entidad hipotética demostrándose que unas pocas barreras de seguridad falladas pueden tener un impacto significativo en la elevación de los niveles de riesgo con que se está trabajando.

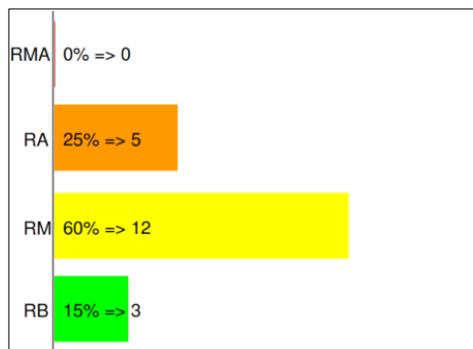


Figura 27. Efecto de su supresión al mismo tiempo de las 5 Barreras de mayor índice de importancia estructural

Al comparar la figura 27 y la figura 22, se hace evidente que la no existencia de unas pocas defensas puede elevar significativamente el riesgo de accidentes. Este tipo de análisis es de gran importancia para usuarios y reguladores ya que les permite monitorizar la situación del riesgo de la empresa, en cada situación específica.

3.1.3. Análisis de importancia de reductores de consecuencias

Del mismo modo que se ha analizado la importancia de las barreras, se ha analizado también la importancia de los reductores de consecuencias, que, aunque no impiden que ocurran las exposiciones accidentales, son decisivos para mitigar las consecuencias de muchas de éstas.

TABLA 21 IMPORTANCIA DE LOS REDUCTORES DE CONSECUENCIAS (>5 %)

Nº	Reductores de consecuencias	Iniciadores en los que participa	
		Nº	%
1	Ejecución del plan de emergencia Nacional y/o de la entidad	11	55 %
2	Comunicación oficial al público sobre la pérdida de las fuentes	10	50 %
3	Disponibilidad de medios de comunicación para reporte de incidente durante el viaje	7	35

7.1.4 Conclusiones específicas para la práctica de radiografía con Rx móvil

- Se concluye que la práctica de radiografía con Rx móvil es una práctica que en forma general, es menos riesgosa que otras prácticas que usan fuentes de radiación, lo anterior se evidencia al no existir riesgos altos y muy altos. La situación de seguridad de la práctica obedece en parte a que no existe una fuente radiactiva que controlar.
- Cabe hacer presente que la seguridad de esta práctica es siempre y cuando se mantengan los estándares de la instalación de referencia, y eso queda expresado en los análisis de las barreras, en donde la degradación del sistema de barreras logra aumentar los riesgos de los sucesos y obtener riesgos altos.

4. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO EN LA TÉCNICA DE RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL CON RX EN BUNKER

4.1. Resultados generales sobre radiografía industrial con Rx en bunker

En este apartado se presentan los principales resultados de la aplicación del método de matrices de riesgo al proceso de la práctica de radiografía con Rx en bunker. La matriz completa se muestra en el Apéndice 4.

Utilizando la herramienta SEVRRRA se realizó el análisis de la Empresa de referencia y se obtuvo el perfil de riesgo que se muestra a continuación.

4.1.1. Resumen estadístico

La tabla 22 muestra un resumen estadístico de la aplicación del método de matriz de riesgo en la empresa de referencia que realiza la práctica de radiografía con Rx en bunker.

TABLA 22. RESUMEN DE RESULTADOS DE LA MATRIZ DE RIESGO EN RADIOGRAFÍA INDUSTRIAL CON RX EN BUNKER

Número de Sucesos Analizados	10	
Con consecuencias sobre el trabajador ocupacional	5	50 %
Con consecuencias sobre miembros del público	5	50 %
Con Consecuencias Muy Altas	0	0 %
Con Consecuencias Altas	3	3
Con Consecuencias Moderadas	6	60.0 %
Número de barreras analizadas	18	
Número de reductores de frecuencia analizados	11	
Número de reductores de consecuencias analizados	2	
	Resultados	
Secuencias con Riesgo Muy Alto	0	
Secuencias con Riesgo Alto	0	
Secuencias con Riesgo Medio	4	40 %
Con riesgo Medio y Consecuencias Muy Altas	0	0 %
Con riesgo Medio y consecuencias Altas	0	15 %
Con riesgo Medio y Consecuencias Moderadas	4	30 %
Secuencias con riesgo Bajo	6	60 %
Con riesgo Medio y Consecuencias Muy Altas	0	0 %
Con riesgo Medio y consecuencias Altas	3	30 %
Con riesgo Medio y Consecuencias Moderadas	2	20 %
Con riesgo Medio y Consecuencias Bajas	1	10 %

En la Figura 28 se resumen estos mismos resultados de manera gráfica y puede observarse la distribución de los riesgos Altos, Medios y Bajos en las diferentes etapas del proceso de Radiografía con Rx en Bunker.

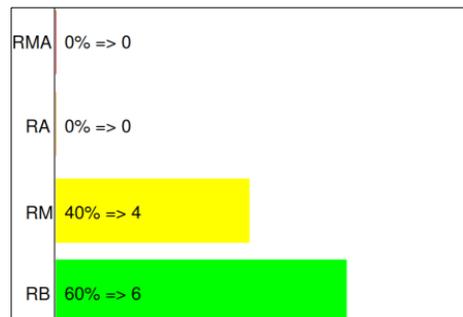


Figura 28. Resumen de resultados de la aplicación de la matriz de riesgo en Radiografía con Rx en Bunker

Se generó una lista de 10 posibles sucesos iniciadores que pudieran provocar exposiciones accidentales. Estos sucesos pudieran producirse tanto en alguna de las etapas del proceso de radiografía con Rx en bunker, considerando desde la etapa de diseño y construcción hasta la etapa de operación propiamente.

De estos 10 sucesos, el 50 % tendrían consecuencias para los trabajadores ocupacionales y el 50 % para miembros del público. De estos 10 sucesos iniciadores analizados 8 (80%) son derivados de errores humanos 1, (10%) son fallos de equipos y 1 (10%) son eventos externos.

Asimismo, se analizaron 18 barreras directas, 12 elementos que contribuyen a reducir la frecuencia de los sucesos iniciadores de accidente (reductores de frecuencia) y 2 que podrían disminuir la severidad de las potenciales consecuencias (reductores de consecuencias).

Ha quedado comprobado que no hay secuencias de riesgos altos y muy altos en la Empresa de referencia, lo que significa que esta empresa no está amenazada por un riesgo inminente de accidentes.

4.1.2. Análisis de importancia de las defensas

En la tabla 23 se presenta la lista de las barreras (en orden decreciente) del valor de la importancia estructural de las mismas, según lo definido en el capítulo 2.

TABLA 23. IMPORTANCIA DE LAS BARRERAS

N°	Denominación de las barreras	Iniciadores en los que esta barrera participa	
		N°	%
1	Verificación mediante un monitoreo radiológico alrededor del bunker durante una prueba de funcionamiento	4	40 %
2	CCTV y acción del operador para detener el equipo	3	30 %
3	Enclavamiento (interlock) que actúa cuando el cabezal emite radiación	2	20 %
4	Barrera física en la entrada del bunker (cadena)	2	20 %

En las figuras 29, 30, 31 y 32 se muestra como varía el perfil de riesgo de la “Empresa de referencia” en caso de que, coyunturalmente, no se cuente con una de estas barreras de mayor índice de importancia estructural.

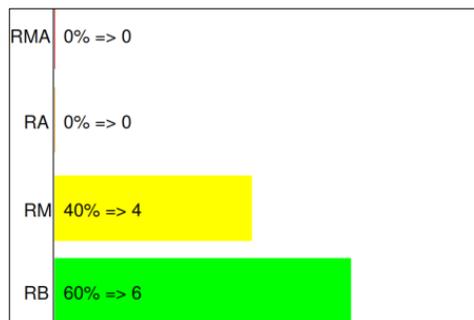


Figura 29. Efecto de su supresión de la barrera “Verificación mediante un monitoreo radiológico alrededor del bunker durante una prueba de funcionamiento”.

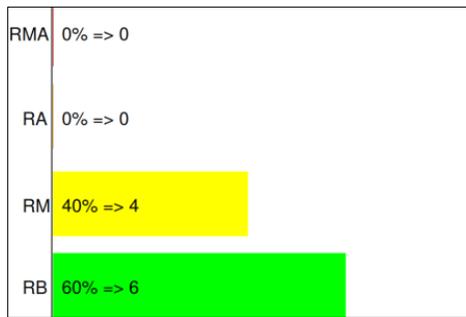


Figura 30. Efecto de su supresión de la barrera “CCTV y acción del operador para detener el equipo”.

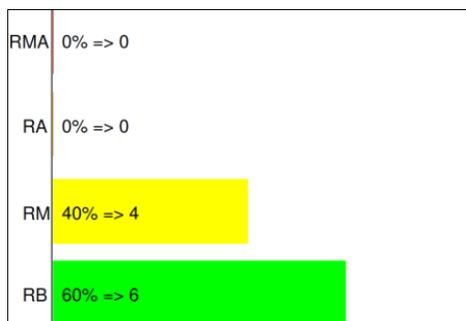


Figura 31. Efecto de su supresión de la barrera “Enclavamiento (interlock) que actúa cuando el cabezal emite radiación”.

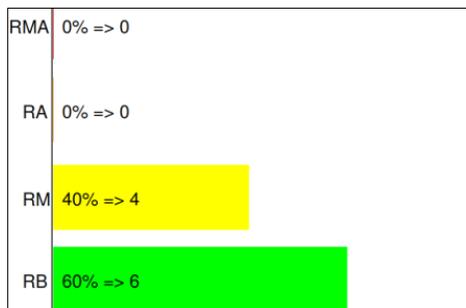


Figura 32. Efecto de su supresión de la barrera “Barrera física en la entrada del bunker (cadena)”.

Aunque el efecto independiente de cada una de estas 4 barreras no es muy evidente en el incremento del nivel de riesgo, debe quedar claro que la pérdida de cada una de estas barreras incrementa el “valor” del riesgo de todos los sucesos donde ellas participan (a pesar de que el riesgo se mantenga en el mismo “nivel”).

Por otra parte, el efecto combinado de estas pocas barreras puede ser muy significativo en el empeoramiento de las condiciones de seguridad de la práctica de Radiografía. En tal sentido analicemos la situación de una empresa hipotética que dispone de equipos que no cumplen la normativa aplicable y en consecuencia supongamos que no dispones de las medidas de seguridad de la Tabla 23. A continuación se representa gráficamente el perfil de riesgo resultante para esta

entidad hipotética demostrándose que unas pocas barreras de seguridad falladas pueden tener un impacto significativo en la elevación de los niveles de riesgo con que se está trabajando.

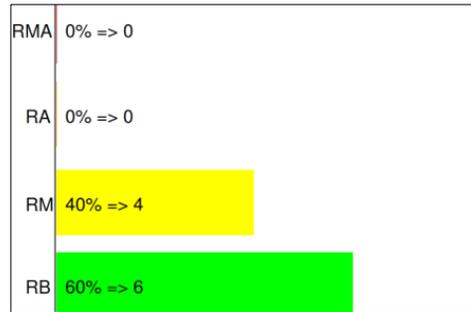


Figura 33. Efecto de su supresión al mismo tiempo de las 4 Barreras de mayor índice de importancia estructural.

Al comparar la figura 28 y la figura 33 se hace evidente que la no existencia de unas pocas defensas puede elevar significativamente el riesgo de accidentes. Este tipo de análisis es de gran importancia para usuarios y reguladores ya que les permite monitorear la situación del riesgo de la empresa en cada situación específica.

4.1.3. Análisis de importancia de reductores de consecuencias

Del mismo modo que se ha analizado la importancia de las barreras, se ha analizado también la importancia de los reductores de consecuencias, que, aunque no impiden que ocurran las exposiciones accidentales, son decisivos para mitigar las consecuencias de muchas de éstas.

2. TABLA 24. IMPORTANCIA DE LOS REDUCTORES DE CONSECUENCIAS (>5 %)

Nº	Reductores de consecuencias	Iniciadores en los que participa	
		Nº	%
1	Ejecución del plan de emergencia Nacional y/o de la entidad	3	30 %
2	Comunicación oficial al público sobre la pérdida de las fuentes	1	10 %

8.1.4 Conclusiones específicas para la práctica de radiografía con Rx en bunker.

- Se concluye que la práctica de radiografía con Rx en bunker es una práctica que en forma general es menos riesgosa que otras prácticas que usan fuentes de radiación, y a la vez menos riesgosa que la radiografía con Rx móvil, lo anterior se evidencia al no existir riesgos altos y muy altos y por la menor cantidad de sucesos iniciadores. La situación de seguridad de la práctica obedece en parte a que no existe una fuente radiactiva que controlar y por otra parte el confinamiento del haz de radiación.
- Cabe hacer presente que la seguridad de esta práctica es siempre y cuando se mantengan los estándares de la instalación de referencia. A pesar de que no hubo variaciones de los niveles de riesgo al suprimir las barreras una a una ni tampoco al suprimir el conjunto de barreras más importantes, se debe tener en cuenta, lo ya

mencionado anteriormente, que al retirar una barrera se aumenta el valor del riesgo del suceso, aunque el nivel de riesgo se mantenga.

5. CONCLUSIONES

5.1. Búsqueda sistemática y anticipativa

El uso de la matriz de riesgo, resulta de gran utilidad en la evaluación de los mecanismos actuantes durante las prácticas de radiografía industrial, con el objetivo primordial de que las acciones y tareas desarrolladas cumplan con la mejor performance posible, actuando de manera lógica en la reducción del riesgo.

Este análisis genera un mecanismo de detección temprana de posibles fallos y errores que pueden generar una situación de exposición accidental. Para ello se investigan todos los pasos del proceso Radiografía Industrial, tomando en consideración todos los posibles actores involucrados y procesos asociados.

Si el personal involucrado en el análisis adquiere una visión completa del proceso y de la importancia de sus tareas en el riesgo global y en relación con las etapas en que no intervienen directamente, ello redundará en un beneficio hacia la mejora continua y propondrá la incorporación de mejores y más eficientes mecanismos de control.

La matriz de riesgo es, por lo tanto, una manera de hacer consciente a todo el personal de la Empresa de Radiografía de los requisitos de seguridad y el riesgo derivado de su trabajo.

5.2. Identificación y cribado de lo importante

La identificación de los mecanismos iniciadores, y secuencias accidentales, se puede aplicar en una empresa de radiografía industrial, siempre y cuando se disponga de un método de cribado selectivo que identifique aquellas secuencias accidentales que necesitan atención, así como las posibles medidas de seguridad que deberían añadirse o cuya robustez podría ser mejorada.

El estudio aplicado a la Radiografía Industrial ha confirmado que estos dos cribados proporcionan un camino racional y selectivo para identificar con precisión las áreas más vulnerables a las que dedicar esfuerzo.

5.3. Sencillez del método y aplicabilidad en una empresa de radiografía

El mecanismo aplicado para el desarrollo de la matriz de riesgo no requiere a priori, acabados y específicos conocimientos sobre esta metodología.

Si requiere, en cambio, un acabado conocimiento de la práctica en cuestión, para evaluar las diferentes mecanismos que puedan conducir a un accidente o incidente. Un grupo formado por personal que trabaja en la práctica de Radiografía Industrial puede aplicar el método dedicando un tiempo asequible en la práctica, como así se ha demostrado en las aplicaciones piloto realizadas en las empresas que se han involucrado en este proyecto.

Sólo necesitan disponer de un taller de formación de un día de duración y, preferiblemente, un instructor que les acompañe en el proceso, resolviendo dudas prácticas, al menos al principio.

La matriz de riesgo no requiere conocimientos altamente especializados en análisis de riesgos.

5.4. Confirmación del conocimiento existente

Todo método para ser aceptado e incorporado a la práctica debe cumplir dos condiciones: *ser fiable y ser útil*. La fiabilidad se demuestra si el método es capaz de confirmar lo que ya se sabe por experiencia. La utilidad se demuestra arrojando nueva luz y aportando nuevo conocimiento que se pueda emplear en mejorar la seguridad.

Los accidentes publicados y las lecciones aprendidas de los mismos constituyen el conocimiento existente, las cuales se suponen incorporadas en la “Empresa de referencia”.

La primera prioridad es asegurarse de que los sucesos con consecuencias muy altas o catastróficas no tienen riesgo alto o muy alto. Para ello, es preciso mantener eficaces las barreras existentes en esta “Empresa de referencia”.

5.5. Consideraciones finales

5.5.1. Para las Empresas que realizan la práctica de Radiografía Industrial

La fiabilidad de todas las medidas de seguridad descritas, en este trabajo descansan en el supuesto de que hay una empresa que establece responsabilidades con claridad, incluyendo la responsabilidad de supervisar que dichas medidas se cumplen y se mantienen eficaces, y asegura la formación de su personal, lo cual redundará en el conocimiento de la mejor y más eficiente forma de cumplirlas.

Dicha empresa necesita además una cultura de seguridad, que se traduzca en una carga de trabajo moderada, compatible con un ambiente de atención sin distracciones, un adecuado programa de mantenimiento preventivo y correctivo, auditorías internas, etc.

Aplicando sistemáticamente la metodología de Matrices de Riesgo y con el auxilio de la herramienta “SEVRRRA Industria” la empresa podrá autoevaluar sus riesgos, identificar medidas para la mejora de la seguridad y evaluar críticamente la degradación de la seguridad cuando se pierden determinadas defensas (barreras y reductores) en una situación determinada.

Debe resaltarse el rol del “Cliente” que contrata los servicios de una empresa de Radiografía industrial.

En ese aspecto, la relación “Cliente - Empresa contratada para el servicio de radiografía industrial”, debe buscar privilegiar todos los aspectos de seguridad radiológica y física que sean posibles, realizando todo aquello que sea necesario, con el fin de reducir el riesgo.

Esto implica el conocimiento mutuo de las reglas básicas de uno y otro generando una simbiosis entre ambos, que permita actuar de manera lógica incrementando los niveles de seguridad, durante la ejecución de las tareas.

5.5.2. Para los reguladores

Al realizar sus funciones reguladoras de licenciamiento e inspección, los organismos reguladores tienen la oportunidad de aprovechar el conocimiento aportado por este trabajo y de verificar aquellos aspectos claves que influyen en la reducción del riesgo. Es deseable que se tomen en consideración las conclusiones de éste y se revisen los métodos de evaluación y de inspección de los reguladores a la luz de las mismas.

Este mecanismo permite aplicar un enfoque graduado, acotando el nivel de riesgo ya sea bajo, medio, alto o muy alto, haciendo foco en aquellos que pueden generar mayor daño en

primer lugar y continuar luego con los restantes aplicando la metodología de la matriz de riesgo, sumado a los conceptos ALARA y de Cultura de la Seguridad.

10 REFERENCIAS

- [1]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, (2000): The radiological accident in Yanango, IAEA, Vienna.
- [2]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, (2009): The radiological accident in Nueva Aldea, IAEA, Vienna.
- [3]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, (2004): The radiological accident in Cochabamba, IAEA, Vienna.
- [4]. International Atomic Energy Agency, (1993): The radiological accident in Soreq, IAEA, Vienna.
- [5]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, (1996): The radiological accident at the irradiation facility in Nesvizh, IAEA, Vienna.
- [6]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, (1990): The radiological accident in San Salvador, IAEA, Vienna.
- [7]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Lessons learned from accidents in industrial radiography, Vienna, 1998
- [8]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Análisis Probabilista de Seguridad de Tratamientos de Radioterapia con Acelerador Lineal, TECDOC-1670/S, IAEA, Vienna (2012).
- [9]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Aplicación del método de análisis de matriz de riesgo a la Radioterapia, TECDOC-1685/S, IAEA, Vienna (2013).
- [10]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Events Web Based System. Reportes de eventos radiológicos.
- [11]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Lessons Learned from the Response to Radiation Emergencies (1945-2010)
- [12]. ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas Básicas Internacionales de Seguridad, GSR Part. 3. Viena 2011.
- [13]. ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas Básicas Internacionales de Seguridad, GSR Part. 4. Viena 2009.
- [14]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, (2010): Radiation safety in industrial radiography, Specific Safety Guide No. SSG-11, IAEA, Vienna.
- [15]. Prospective risk analysis of healthcare processes (July 2009): A systematic evaluation of the use of HFMEA TM in Dutch healthcare M.M.P. Habrakena*, T.W. Van der Schaafa, I.P. Leistikowc and P.M.J. Reijnders-Thijssend Department of Industrial Engineering and Innovation Sciences, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands; Hasselt University, Hasselt, Belgium; University Medical Center Utrecht, Utrecht, The Netherlands; MAASTRO clinic, Maastricht, The Netherlands Ergonomics Vol. 52, No. 7, 809–819

- [16]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, (2011): A Framework for an Integrated Risk Informed Decision Making Process. INSAG -25, Vienna.
- [17]. Norma UNE 150008 “Análisis y Evaluación del Riesgo Ambiental. AENOR 2008, España
- [18]. Guía Técnica Métodos cualitativos para el análisis de riesgos http://www.proteccioncivil.org/centrodoc/guiatec/Metodos_cualitativos/indice_cualitativos.htm
- [19]. Consejo de Seguridad Nuclear Instrucción IS-25, de 9 de junio de 2010 , del Consejo de Seguridad Nuclear , sobre criterios y requisitos sobre la realización de los análisis probabilistas de seguridad y su aplicaciones a las centrales nucleares. BOE, Madrid, España, 2010
- [20]. ARAMIS- Accidental Risk assessment Methodology for industries in the context of Seveso II Directive User Guide <http://aramis.jrc.it>
- [21]. Mc Collin, Chris, "Working Around Failure." Manufacturing Engineer, February 1999.
- [22]. Examining Risk Priority Numbers in FMEA, Volume, Reliability Edge Home 4, Issue 1 <http://www.reliasoft.com/newsletter/2q2003/rpns.htm>
- [23]. Santamaría Ramiro, J. M, Braña Aísa, P. A. “Análisis y Reducción de Riesgos en la Industria Química”. Fundación MAPFRE, 1993, España
- [24]. NUREG/CR-6642 SCIE-NRC-379-99 Risk Analysis And Evaluation Of Regulatory Options For Nuclear Byproduct Material System.
- [25]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Component Reliability Data for use in Probabilistic Safety Assessment, TECDOC-478, IAEA, Vienna 1988.
- [26]. GERTMAN, D.I., BLACKMAN, H.S., Human Reliability and Safety Analysis Data Handbook, John Wiley&Sons, Inc., New York 1994.
- [27]. M. PERDOMO OJEDA, R. FERRO FERNÁNDEZ, "Fallos de Causa Común y Errores Humanos", Ediciones Universitarias UGMA. Universidad Gran Mariscal de Ayacucho, Barcelona, Venezuela, 1996INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Análisis Probabilista de Seguridad de Tratamientos de Radioterapia con Acelerador Lineal, TECDOC-1670/S, IAEA, Vienna (2012).
- [28]. J.J VILARAGUT, C DUMENIGO, J.M. DELGADO, J MORALES, J. D Mc DONNELL, R. FERRO, P. ORTIZ, M.L. RAMÍREZ, A. PÉREZ, S. PAPADOPULOS, M GONCALVES, R. LÓPEZ, C SANCHEZ, A CASCAJO, F. SAMOANO, C ALVAREZ, A GUILLEN, M. RODRÍGUEZ, P.P. PEREIRA AND A NADER, “Prevention of accidental exposure in radiotherapy; The risk matrix approach. Health Physics Society, February 2013, Vol. 104.
- [29]. Foro Iberoamericano de Organismos Reguladores radiológicos y nucleares (2010): Informe del Proyecto sobre: Recomendaciones de seguridad de las instalaciones radiactivas de radioterapia, basadas en la experiencia operacional (lecciones aprendidas) y los resultados de los estudios de APS: Aplicación del método de la matriz de riesgo Volumen 1: texto principal, (<http://www.foroiberam.org>).
- [30]. Norma ISO 2919:2012 Radiological protection, Sealed radioactive sources -- General requirements and classification.
- [31]. ISO-3999ISO 3999:2004 Radiation protection, Apparatus for industrial gamma radiography -- Specifications for performance, design and tests.

11 LISTA DE PARTICIPANTES

Expertos del Foro que participaron en el proyecto:

Walter Adrián Truppa (*Argentina*) *Autoridad Regulatoria Nuclear*

Josilto Oliveira de Aquino (*Brasil*) *Comisión Nacional de Energía Nuclear*

Miguel Aravena Gonzalez (*Chile*) *Comisión Chilena de Energía Nuclear*

Rubén Darío Quintero (*Colombia*) *Instituto Colombiano de Geología y Minería*

Yolanda Perez Reyes (*Cuba*) *Centro Nacional de Seguridad Nuclear*

Cruz Duménigo Gonzalez (*Cuba*) *Centro Nacional de Seguridad Nuclear*

Belén Tamayo Tamayo (*España*) *Consejo de Seguridad Nuclear*

Blanca Alfonso Nicolás (*España*) *Consejo de Seguridad Nuclear*

Laura Urteaga García (*España*) *Consejo de Seguridad Nuclear*

Mardonio Jimenez Rojas (*México*) *Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias*

Adrián Lopez García (*México*) *Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias*

Gerardo Lázaro Moreyra (*Perú*) *Instituto Peruano de Energía Nuclear*

Blanca Faller (*Uruguay*) *Autoridad Reguladora Nacional en Radioprotección*

Pedro Ortiz Lopez *Organismo Internacional de Energía Atómica*

Rodolfo Cruz Suarez *Organismo Internacional de Energía Atómica*

Durante la elaboración del documento, fueron consultados los siguientes especialistas:

Hugo Villalobos Cruz (*México*) *Adiestramiento y Capacitación Nuclear, S.A. de C.V.*

Jaime Altamirano Rodríguez (*México*) *Nuclear Ingeniería, S.A. de C.V.*

Rigoberto Tapia Huerta (*México*) *Radiografías Caballero, S.A. de C.V.*

Ricardo Casillas Hernández (*México*) *Control Total de Calidad en Procedimientos de Soldadura, S.A. de C.V.*

Enrique Huerta Aguilar (*México*) *Control Total de Calidad en Procedimientos de Soldadura, S.A. de C.V.*

Luis Fernando Jimenez Cruz (*México*) *Ingeniería e Inspección en Soldadura, S.A. de C.V.*

José Guadalupe Vázquez Guzmán (*México*) *Ingeniería e Inspección en Soldadura, S.A. de C.V.*

Iván Cristian Alanís Zendejas (*México*) *Ingeniería e Inspección en Soldadura, S.A. de C.V.*

Miguel Ángel Figueroa Cardona (*México*) *Supervisión e Inspecciones Técnicas, S.A. de C.V.*

José Antonio Alduenda Bernal (*México*) *Supervisión e Inspecciones Técnicas, S.A. de C.V.*

Agustín Alvarado Rizo (*México*) *Peritos en Radiografía y Soldadura, S.A. de C.V.*

Eliel Huizar de la Torre (*México*) *Peritos en Radiografía y Soldadura, S.A. de C.V.*

José Roberto Luna Mendoza (*México*) *Radiografías de Campeche, S.A. de C.V.*

Blanca García Martín (*España*) *Servicios de Control e Inspección, S.A.*

Roberto Gamella Rus (*España*) *SGS Tecnos, S.A.*