



**UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID**

**ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO**

**ÁREA INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN  
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER  
PUESTA EN MARCHA DE INSTALACIÓN  
RADIATIVA: LABORATORIO DE ENSAYOS**

**Alumno: Álvaro M<sup>a</sup> Araluce Arvizu**

**Director: D./D<sup>a</sup>. Luis Perezagua Pérez**

**Dir. empresa: D./D<sup>a</sup>. Francisco J. Novalvos Gutiérrez**

**JULIO 2023**

**TÍTULO: PUESTA EN MARCHA DE INSTALACIÓN RADIATIVA:  
LABORATORIO DE ENSAYOS**

**AUTOR: ÁLVARO M.<sup>a</sup> ARALUCE ARVIZU**

**DIRECTOR DEL PROYECTO: D. LUIS PEREZAGUA PÉREZ**

**DIRECTOR EMPRESA D.D<sup>a</sup>. FRANCISCO J. NOVALVOS GUTIERREZ**

**FECHA: 21 de Julio de 2023**

## RESUMEN

Las centrales nucleares se someten a numerosas inspecciones y pruebas para garantizar el correcto funcionamiento, y la seguridad de la instalación durante la operación. Uno de esos componentes son los filtros de carbón activo, que forman parte de la ventilación de las centrales. Por normativa, esos ensayos no pueden realizarse en la propia planta, y debe realizarse por un laboratorio de una tercera entidad.

La empresa WESTINHOUSE-TECNATOM proporciona diferentes servicios a las centrales nucleares, uno de ellos, el análisis del carbón activo que se encuentra en sus sistemas de ventilación.

La realización de dichos ensayos se da en el *Laboratorio de Carbón activo* (L.C.A.) que dicha empresa posee. Por la naturaleza radiológica de los ensayos, dicho laboratorio es, a su vez, una **instalación radiactiva**. Por ello, debe tener una autorización de apertura y operación expedida por el *Consejo de Seguridad Nuclear* (C.S.N.).

Tras años de operación, el incremento de ensayos y los cambios en la normativa aplicable tanto a los ensayos como a la instalación radiactiva, y el relevo del personal, crean en WESTINHOUSE-TECNATOM la necesidad de ampliar la instalación, adaptar la infraestructura, modificar las técnicas desarrolladas, para poder seguir operando de forma satisfactoria.

El carácter fundamental de las modificaciones provoca la ampliación del laboratorio, siendo necesario más instrumental para cumplir los requisitos de los clientes. La ampliación del laboratorio, y el incremento de la actividad radiológica (por el incremento de ensayos), hace que la instalación radiactiva cambie, siendo necesario solicitar una modificación de la licencia, o más probablemente, la expedición de una nueva licencia.

Este proyecto (puesta en marcha de una instalación radiactiva: laboratorio de ensayos) busca, disponer de todo lo necesario para la correcta realización de ensayos de carbón activo y la obtención de la licencia de operación de la instalación radiactiva.

La finalización de este proyecto conllevará que la empresa disponga de todo lo necesario para la obtención de licencia de operación para la instalación radiactiva, además de una descripción detallada para el montaje del laboratorio de carbón activo.

## ABSTRACT

Nuclear power plants undergo numerous inspections and tests to ensure the proper functioning and safety of the facility during operation. One such component is the activated carbon filters, which are part of the plant ventilation. By regulation, these tests cannot be carried out at the plant itself, and must be performed by a third-party laboratory.

The company WESTINHOUSE-TECNATOM provides different services to nuclear power plants, one of which is the analysis of the activated carbon found in their ventilation systems.

These tests are carried out in the Active Carbon Laboratory (L.C.A.) owned by the company. Due to the radiological nature of the tests, this laboratory is, in turn, a radioactive facility. For this reason, it must have an authorization to open and operate issued by the Nuclear Safety Council (C.S.N.).

After years of operation, the increase in the number of tests and the changes in the regulations applicable to both the tests and the radioactive facility, and the replacement of personnel, create in WESTINHOUSE-TECNATOM the need to expand the facility, adapt the infrastructure, modify the techniques developed, in order to continue operating in a satisfactory manner.

The fundamental nature of the modifications causes the laboratory to expand, requiring more instrumentation to meet customer requirements. The enlargement of the laboratory, and the increase of the radiological activity (due to the increase of tests), causes the radioactive facility to change, being necessary to request a modification of the license, or more probably, the issuance of a new license.

This project (start-up of a radioactive facility: testing laboratory) seeks to have everything necessary for the correct performance of active carbon tests and to obtain the operating license for the radioactive facility.

The completion of this project will provide the company with everything necessary to obtain the operating license for the radioactive facility, as well as a detailed description for the assembly of the activated carbon laboratory.

Resumen en inglés.

**Key words:** Palabras clave en inglés

## GLOSARIO

- LCA: Laboratorio de Carbón Activo
- CSN: Consejo de Seguridad Nuclear
- CN o CCNN: Central Nuclear/Centrales Nucleares
- HVAC: *Heating Venting & Air-Conditioning*
- I-131: radionucleido yodo 131
- INa: yoduro sódico
- ICH<sub>3</sub>: yoduro de metilo
- WANO: *World Association of Nuclear Operators*
- HEPA: *High efficiency Particle Arresting*
- keV: kiloelectronvoltio
- MeV: megaelectronvoltio
- PR: protección radiológica
- PRL: prevención de riesgos laborales

# Índice

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	12
OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	13
NORMATIVA APLICABLE .....	14
1. CONOCIMIENTOS PREVIOS .....	17
1.1 SISTEMAS DE VENTILACIÓN Y FILTRADO DE CENTRALES NUCLEARES E INSTALACIONES RADIATIVAS .....	17
1.1.1 Introducción .....	17
1.1.2 Función.....	17
1.1.3 Estructura .....	18
1.2 RADIOLOGÍA.....	22
1.2.1 Conceptos básicos de radiología.....	22
1.2.2 Radiación.....	24
1.2.3 Tipos de desintegración.....	25
1.2.4 Niveles de penetración de la radiación .....	29
1.2.5 Interacción de las partículas cargadas con la materia .....	30
1.2.6 Protección radiológica .....	36
2. MEMORIA DE LA INSTALACIÓN .....	41
2.1 LABORATORIO DE CARBÓN ACTIVO.....	41
2.1.1 INTRODUCCIÓN.....	41
2.1.2 CONDICIONES GENERALES.....	41
2.1.3 DISTRIBUCION DEL LABORATORIO .....	42
2.1.4 Carbón activo.....	46
2.1.5 ENSAYOS .....	49
2.2 INSTALACIÓN RADIATIVA.....	66
2.2.1 Radionucleido.....	66
2.2.2 Yoduro de metilo.....	68
2.2.3 Actividad de la instalación .....	74

2.2.4	Blindaje.....	76
2.2.5	Dosimetría del personal del laboratorio .....	80
2.2.6	Sistema de ventilación y filtrado .....	81
3.	ESTUDIO DE SEGURIDAD.....	83
3.1	Introducción.....	83
3.1.1	Riesgo de liberación súbita de la presión .....	83
3.1.2	Riesgo de liberación de radiactividad .....	84
3.1.3	Riesgo de quemaduras.....	89
3.2	CONCLUSIONES.....	90
4.	VERIFICACIONES .....	92
4.1	Introducción.....	92
4.2	Verificaciones y comprobaciones iniciales .....	92
4.3	VERIFICACIÓN DE PROCESOS.....	94
4.3.1	Verificaciones en la recepción y almacenamiento del trazador radiactivo .....	94
4.3.2	Verificaciones previas a un ensayo o series de ensayos.....	95
4.3.3	Verificaciones después de realizado el ensayo .....	95
4.3.4	Verificaciones durante la eliminación de las muestras contaminadas .....	96
4.3.5	Verificaciones de carácter periódico .....	96
4.3.6	Verificaciones del equipo de protección .....	97
5.	PLAN DE EMERGENCIA .....	99
5.1	Introducción.....	99
5.2	Accidentes radiológicos previsibles.....	99
5.2.1	Recepción y almacenamiento.....	99
5.2.2	Liberación de actividad durante el proceso .....	101
5.2.3	Liberación de radiactividad del recipiente de residuos .....	101
5.3	Emergencias de naturaleza no radiológica .....	102
5.4	Notificaciones a la autoridad .....	102
6.	REGLAMENTO FUNCIONAL .....	104
6.1	INTRODUCCIÓN .....	104
6.2	RESPONSABILIDADES.....	105
6.2.1	Responsabilidad del explotador.....	105
6.2.2	Responsabilidad del supervisor de la instalación .....	105

---

6.2.3	Responsabilidad de los operadores de la instalación .....	106
6.2.4	Responsabilidad del personal sin licencia .....	106
6.3	OPERACIONES DE LA INSTALACIÓN.....	106
6.3.1	Operaciones normales de la instalación .....	106
6.3.2	Operaciones de descontaminación.....	107
6.4	MEDIDAS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICAS.....	109
7.	EQUIPOS .....	111
7.1	COMPONENTES DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL .....	113
7.2	INSTRUMENTACIÓN .....	114
7.2.1	CAUDALIMETRO MÁSIKO Y/O FLUJOMETROS .....	114
	.....	115
7.2.2	Flujómetros de inyección.....	115
7.2.3	Manorreductores.....	116
7.2.4	Calderas de generación de vapor.....	117
7.2.5	Estufas.....	117
7.2.6	Manómetros.....	118
7.2.7	Higrómetros .....	118
7.2.8	Punto de Rocío .....	119
7.2.9	Espectrómetro .....	119
8.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	122
9.	ANEXO .....	123
10.	Bibliografía.....	130

# Índice de Figuras

- ILUSTRACIÓN 1. Central nuclear de Angra II
- ILUSTRACIÓN 2. Central nuclear de Trillo
- ILUSTRACIÓN 3. Esquema Housing A
- ILUSTRACIÓN 4. Esquema Housing B
- ILUSTRACIÓN 5. Filtro HEPA
- ILUSTRACIÓN 6. Racks sin las bandejas
- ILUSTRACIÓN 7. Bandejas de carbón activo en sus racks
- ILUSTRACIÓN 8. Tolvas de carbón activo
- ILUSTRACIÓN 9. Desintegración Alfa
- ILUSTRACIÓN 10. Desintegración beta negativa
- ILUSTRACIÓN 11. Desintegración beta positiva
- ILUSTRACIÓN 12. Hora penetración de la radiactividad
- ILUSTRACIÓN 13. Radiación de frenado o Bremsstrahlung
- ILUSTRACIÓN 14. Clasificación de zonas en función de su tasa de dosis
- ILUSTRACIÓN 15. Iconos de zonas en función de su tasa de dosis
- ILUSTRACIÓN 16. Clasificación de zonas en función del tipo de actividad
- ILUSTRACIÓN 17. Carbón activo compactado en una sección de la maqueta
- ILUSTRACIÓN 18. Carbón activo bajo microscopio
- ILUSTRACIÓN 19. CPU de control, vitrina de gases al fondo
- ILUSTRACIÓN 20. Maqueta de ensayo definida en norma ASTM D3803
- ILUSTRACIÓN 21. Cambio en la eficiencia en función del caudal
- ILUSTRACIÓN 22. Esquema del aparataje del ensayo de eficiencia
- ILUSTRACIÓN 23. línea de expresión, y filtro adjunto, del LCA
- ILUSTRACIÓN 24. Generador de vapor
- ILUSTRACIÓN 25. Estufa de ensayo
- ILUSTRACIÓN 26. Tamizadora y tamices homologados
- ILUSTRACIÓN 27. Cámara estanca para ensayo de autoignición
- ILUSTRACIÓN 28. Espectrometría de carbón activo con actividad natural
- ILUSTRACIÓN 29. Espectrometría de carbón activo con yodo
- ILUSTRACIÓN 30. Blindaje donde se aloja el INA marcado
- ILUSTRACIÓN 31. Grajea tipo donde viene encapsulado el INA
- ILUSTRACIÓN 32. Diagrama de destilación simple
- ILUSTRACIÓN 33. TLD, y DLD
- ILUSTRACIÓN 34. Pórtico de detección beta
- ILUSTRACIÓN 35. Estela García, en Quicky
- ILUSTRACIÓN 36. Actividad del laboratorio con procedimiento optimizado
- ILUSTRACIÓN 37. Actividad total del laboratorio con procedimiento alternativo
- ILUSTRACIÓN 38. Límite de dosis
- ILUSTRACIÓN 39. Unidad de ventilación y filtrado de la instalación
- ILUSTRACIÓN 40. Canister de muestreo ambiental
- ILUSTRACIÓN 41. Vitrina de gases
- ILUSTRACIÓN 42. Equipos de protección
- ILUSTRACIÓN 43. Radiómetro y contaminómetro
- ILUSTRACIÓN 44. Sistema de control

- ILUSTRACIÓN 45. Flujómetro
- ILUSTRACIÓN 46. Controlador de caudal
- ILUSTRACIÓN 47. Turbina de flujo
- ILUSTRACIÓN 48. Microprocesador para caudalímetros Brooks
- ILUSTRACIÓN 49. Flujómetro con regulación manual
- ILUSTRACIÓN 50. Manorreductor
- ILUSTRACIÓN 51. Estufa con control e indicador digital
- ILUSTRACIÓN 52. Manómetro analógico
- ILUSTRACIÓN 53. Higrómetro
- ILUSTRACIÓN 54. Punto de Rocío de espejo
- ILUSTRACIÓN 55. Blindaje de espectrómetro gamma multicanal

---

# Índice de Tablas

- TABLA 1. Centrales nucleares, tecnología de construcción, y normas aplicables
- TABLA 2. Decaimiento de 1000Ci
- TABLA 3. Alcance de radiación beta en función de su energía
- TABLA 4. Coeficientes de absorción lineal
- TABLA 5. Atenuación radiación mediante semirreductores
- TABLA 6. Análisis de blindaje
- TABLA 7. Coeficientes de dosis por inhalación y factor de ponderación

# INTRODUCCIÓN

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El laboratorio de carbón tiene un registro de operación que data de 1985, cuando el C.S.N. otorgo la licencia de operación. Desde entonces, el L.C.A. ha experimentado varias modificaciones, y las técnicas/legislación han variado. También el personal que ha trabajado en él.

Recientemente, se han dado varios hechos importantes:

- Compra de TECNATOM por WESTINHOUSE: WESTINHOUSE se muestra especialmente interesado en los departamentos que prestan servicios a las CC.NN., siendo el L.C.A. uno de ellos.
- Cambio de responsables, incluido el del L.C.A.: los nuevos responsables, en su nuevo cargo, analizan el estado del L.C.A.
- Cambio del inspector asignado por el C.S.N.: una de las nuevas funciones de un inspector nuevo, es la auditoria total de su campo (ventilación de CC.NN.), lo cual incluye al L.C.A.
- Cambios en la normativa aplicable: hay nueva normativa aplicable sobre los lechos de adsorción de la ventilación de las CC.NN..
- Incremento en el número de ensayos: el laboratorio se acerca a su limite de producción.

Estos hechos han provocado que:

- WESTINGHOUSE dé orden de recopilar el *KNOW-HOW* de los diferentes laboratorios, lo cual incluye **procedimientos, planos, diseños, memorias técnicas**.
- El análisis del laboratorio ha determinado que, de no invertir en el L.C.A., puede quedar peligrosamente obsoleto, y perder su capacidad operacional.
- El C.S.N. ha iniciado los trámites para cambiar (o adaptar) la normativa vigente aplicable a los lechos de adsorción de la ventilación de CC.NN.; uno de los cambios provocará un **aumento de los ensayos de cerca del 60% del total del laboratorio**, demanda que el actual L.C.A. no es capaz de asumir.

## OBJETIVOS DEL PROYECTO

Tras analizar todos los cambios anteriormente citados, WESTINHOUSE-TECNATOM tiene un objetivo claro: disponer de todo lo necesario para la ampliación del L.C.A..

Por ello, el **presente proyecto se va a centrar en** la recopilación de todo lo necesario para solicitar al C.S.N. una licencia de operación de la nueva instalación radiactiva (o nuevo L.C.A.), lo cual supone:

- Realizar una **memoria técnica de los componentes** necesarios para la operación normal del laboratorio, **con la que realizar de forma correcta su actualización/ampliación.**
- **Recopilar** la información básica de **los diferentes ensayos realizados**, que junto a la memoria técnica, forman el *know-how* del L.C.A..
- **El estudio radiológico de la nueva instalación radiactiva** (ampliación L.C.A.).
- Recopilación de **todos los datos necesarios para la obtención de la autorización del CSN**, al ampliar la actividad de la instalación de 1mCi a 2mCi, tal y como se establece en el **RD 1836/1999 Reglamento sobre las instalaciones nucleares y radiactivas**

## NORMATIVA APLICABLE

En el proyecto, al tratar de una instalación radiactiva que es a su vez un laboratorio de ensayos, habrá normativa que aplique a uno u otro.

Además, es importante desarrollar como se aplican las normativas en el sector nuclear. En España, la mayor autoridad en el ámbito radiológico es el C.S.N. (Consejo de Seguridad Nuclear), que es quien determina que normas o reglamentos aplican en las centrales nucleares u otras instalaciones radiactivas, ya que es el único organismo competente en España en materia de seguridad nuclear y protección radiológica. [1]

Pero, hay muchos organismos internacionales con mucho peso, aunque no tengan potestad directa sobre dichas plantas/instalaciones. organismos como W.A.N.O. (*World Association of Nuclear Operators*) o I.A.E. (Organismo Internacional de Energía Atómica), e incluso empresas privadas, como pueden ser NUCON o TECNATOM.

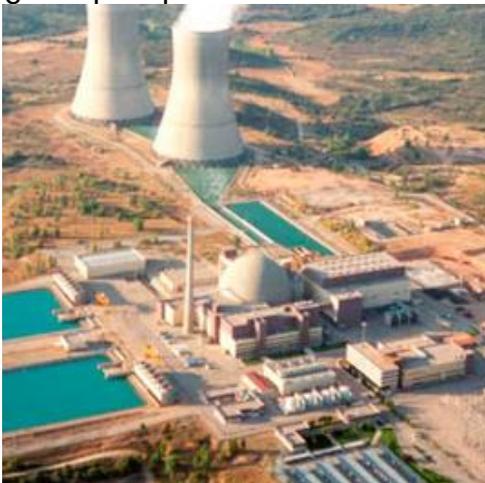
También es de especial relevancia la información suministrada por la empresa que proporciona la tecnología nuclear, es decir, la tecnología empleada en la construcción de la central: WESTINGHOUSE, SIEMENS, TOSHIBA...

Entre los organismos que tienen influencia sobre las decisiones del C.S.N, también están los que redactan normativa que, por la tecnología empleada, aplica a ciertas plantas. A continuación, se detalla un ejemplo de diferentes centrales, la tecnología empleada, y la norma aplicable en los ensayos de eficiencia de carbón activo.

Central Nuclear	Tecnología de construcción	NORMA APLICABLE (LCA)
C.N.Almaraz I y II	Westinghouse PWR	ASTM D 3803
C.N.Trillo	Siemens PWR	ASTM D 3803
C.N.Angra II	Siemens PWR	KTA 3601

*Tabla 1 Centrales nucleares, tecnología de construcción, y normas aplicables*

Como se puede observar en la tabla, las centrales de Trillo y Angra II, tienen la misma tecnología de construcción, es más, son centrales gemelas. Entonces, ¿Por qué aplica una normativa diferente en cada central?



*Ilustración 2 Central Nuclear de Trillo*



*Ilustración 1 Central Nuclear de Angra II*

Todo radica en cómo funciona la legislación en cada país.

En el momento de la construcción de la C.N.Trillo, las empresas españolas y el C.S.N., tenían experiencia con la normativa americana ASTM D 3803, pero no con la normativa alemana KTA3601. Se realizó un estudio de la viabilidad de evaluar los sistemas empleando la normativa ASTM D 3803, estudio que el C.S.N. aprobó.

En cambio, C.N.Angra se rige por la KTA 3601, según determinó el C.N.E.N. (Comisión Nacional de Energía Nuclear), ya que es lo que recomienda el proveedor de la tecnología, SIEMENS.

La competencia del C.S.N. es tal, que, aunque el propio elaborador de una norma publique una nueva dejando obsoleta la actual, el C.S.N. será quien determine si se aplica, y en caso de hacerlo, cuando y como.

Una vez establecido que la autoridad competente en España es el C.S.N., éstas son las normas o reglamentos que ha determinado que aplican a la instalación, y a los ensayos a realizar:

- **Real Decreto 1836/1999: Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas:** en el capítulo V, artículo 25, se especifican las modificaciones de instalaciones. Como una de las modificaciones es la ampliación de la actividad del laboratorio y su superficie, se ha de solicitar una nueva licencia.
- **Real Decreto 35/2008: modificación del reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas, aprobado por RD 1836/1999.**
- **Real Decreto 783/2001: Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes**
- **Real Decreto 1029/2022: Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes.**
- **IS-05: valores de exención para nucleidos según RD 1836/1999.:** como el laboratorio excede la actividad de I-131, a razón de 74 veces superior, se declara instalación radiactiva.
- **Norma UNE-73-302: distintivos para señalización de radiaciones ionizantes**
- **ETFs:** Especificaciones Técnicas de Funcionamiento. Reglamentos propios de las CC.NN. e instalaciones radiactivas.
- **ASME AG1 Code on Nuclear Air and Gas Treatment:** (Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos). Documento que reúne los requisitos para el rendimiento, diseño, construcción, aceptación y calidad, de equipos o componentes relacionados con el tratamiento del aire de instalaciones nucleares o radiactivas.
- **ANSI/ASME N509 Nuclear Power Plant Air-Cleaning Units and Components:** componentes y unidades de limpieza del aire de centrales nucleares. Centrada en requisitos de los sistemas.
- **ANSI/ASME N510 Testing of Nuclear Air Treatment Systems:** esta norma cubre las pruebas in situ los sistemas de tratamiento del aire descritos en la norma ASME N509.

- **ANSI/ASME N511 In-Service Testing of Nuclear Air-Treatment, Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems:** pruebas in situ de componentes HVAC, y tratamiento del aire de instalaciones radiactivas, más centrado en pruebas de aceptación.
- **ASTM D 3803 Standard Test Method for Nuclear-Grade Activated Carbon:** (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales), publica acuerdos voluntarios de normas técnicas.  
Se aplica a los ensayos de eficiencia de carbón activo, generalmente para sistemas de tecnología americana. Muy rigurosa, pensada para sistemas diseñadas por normativa americana, muy completa.
- **KTA 3601 Ventilation Systems in Nuclear Power Plants:** (Nuclear Safety Standards Commission), está formada por diferentes grupos diferenciados: desde operadores de centrales nucleares a grupos de interés.  
Se aplica a los enseres de oficina de carbón activo, generalmente para sistemas de multitud de tecnologías. Introduce un concepto nuevo para evaluar el carbón, no solamente por su eficiencia sino por el espesor del lecho, permitiendo determinar si un carbón absorbe por la calidad propia o por la cantidad que hay en el lecho.
- **R.G.1.140 US/NRC Design, inspection, and testing criteria for air filtration and adsorption units of normal atmosphere cleanup systems in light-water-cooled nuclear power plants:** guía reguladora emitida por el N.R.C. (*Nuclear Regulatory Commission*, homólogo al C.S.N. en EE.UU.), aplica al diseño, inspección y pruebas de los sistemas de filtrado que apliquen atmósferas radiactivas, que funcionen durante operación normal.
- **R.G.1.52 US/NRC Design, inspection, and testing criteria for air filtration and adsorption units of post-accident engineered-safety-feature atmosphere cleanup systems in light-water-cooled nuclear power plants,** aplica al diseño, inspección y pruebas de los sistemas de filtrado que apliquen atmósferas radiactivas, cuya actividad esté relacionada con la seguridad nuclear (actúa en caso de accidente, o ayuda a la central a llegar a un estado seguro).
- **ASTM-D-2862: Standard Test Method for Particle Size Distribution of Granular Activated Carbon:** norma establecida para la realización e la granulometría.
- **IMDG-CODE:** incluye el ensayo de autoignición para materiales peligrosos.

# 1. CONOCIMIENTOS PREVIOS

## 1.1 SISTEMAS DE VENTILACIÓN Y FILTRADO DE CENTRALES NUCLEARES E INSTALACIONES RADIATIVAS

### 1.1.1 Introducción

Las centrales nucleares siempre han tenido una fuerte cultura de seguridad, por los riesgos que involucran.

En cualquier tipo de emplazamiento donde va a trabajar personal, se ha de garantizar su seguridad, siendo el aire suministrado un elemento imprescindible.

Las centrales nucleares (o instalaciones radiactivas) no son ajenas a esta necesidad, y disponen de sistemas de HVAC (*heating, ventilation and air-conditioning*) para obtener una atmosfera deseable donde puedan trabajar empleados y equipos por igual, por disponen de los elementos comunes a cualquier tipo de sistema de ventilación, aunque deben de tener especial cuidado con una peculiaridad de dichas instalaciones.

En el caso general de una central de energía nuclear, por la fisión de combustible nuclear, se generan contaminantes radiactivos (siendo el más común, el yodo). Estos contaminantes pueden estar en forma gaseosa o de aerosol, contaminando las zonas donde se generan.

### 1.1.2 Función

La función de los sistemas de ventilación y filtración nucleares está cerrada activas es muy simple:

- En operación normal, mantener las condiciones atmosféricas de las diferentes salas libres de contaminantes radiológicos, y en unas condiciones climatológicas aceptables. Además, evitar la liberación de contaminación a una atmósfera no controlada.
- En caso de accidente, permitir que el personal de emergencia para realizar sus tareas siendo expuesto a la mínima cantidad posible de contaminación (i.e. personal de sala de control), además de cumplir

otras funciones secundarias como la liberación de presión de ciertos edificios, evitando a su vez la liberación de esas partículas contaminantes al ambiente (i.e. disco de ruptura del edificio de combustible), ayudando a la central a llegar a una parada segura.

Se entiende que estos sistemas de ventilación y filtrado trabajan asociados a sistemas de HVAC tradicionales.

Como se puede observar, dichos sistemas tienen un rol muy importante en la seguridad de las centrales nucleares (o instalaciones radiactivas).

### 1.1.3 Estructura

Se ha adelantado hoy que los sistemas de ventilación y filtrado, como su nombre indica, poseen varias etapas de filtros, con el objetivo de retener dicha contaminación radiactiva.

La estructura, o *housing*, de estos sistemas de filtrado, no difiere mucho de las estructuras destinadas a HVAC, es decir, una carcasa metálica estanca (de material no oxidable, acero/aluminio), en cuyo interior se alojan los diferentes componentes. En el caso de la ventilación y filtrado de ambientes radiológicos, los filtros HEPA y los lechos de adsorción o filtros de carbón activo



Ilustración 3 Esquema Housing A

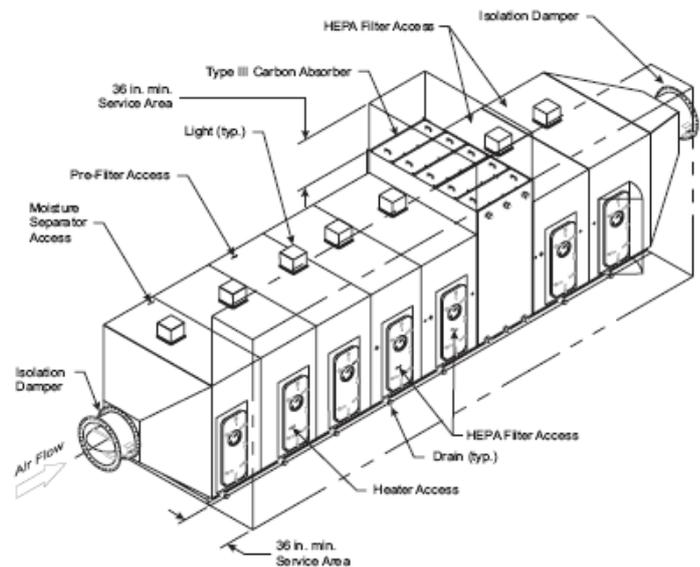


Ilustración 4 Esquema Housing B

La estructura normal, suele ser la siguiente:

- Separadores de humedad: en caso de caudales muy húmedos, condensa parte de la humedad en esta malla metálica.
- Baterías de calefacción: de arranque automático o manual, eliminan el resto de humedad, o lo reducen, para evitar la degradación del carbón.
- Pre filtros: como su nombre indica, unos filtros previos para retener partículas suspendidas en el aire de gran tamaño (aunque existen pero

filtros con una capacidad de retención de partículas pequeñas muy elevada)

- Banco de filtro H.E.P.A. (*High efficiency Particle Arresting*): son filtros de alta eficiencia capaces de retener partículas de muy pequeño tamaño (para partículas de diámetro de 0,3 micrones tiene una eficiencia de retención del 99,97%). es el responsable de eliminar los aerosoles suspendidos en el aire.

Según el diseño puede tener un banco o varios.

- Banco de filtros de carbón, o lecho de adsorción de carbón activo: en este banco se encuentra el adsorbente, capaz de eliminar el yodo radiactivo en forma de gas.

En función del diseño puede haber uno o varios bancos de carbón.

- Ventilador: aunque hay sistemas pasivos que funciona mediante la diferencia de presión, lo común es disponer de un ventilador que la genere. Suele estar aguas abajo del sistema para generar depresión y evitar fugas hacia el exterior del contaminante.

### 1.1.3.1 Filtros HEPA

Como ya se ha adelantado, los filtros H.E.P.A. buscan retener partículas radiactivas que se puedan encontrar en el caudal de aire.

Suelen tener una eficiencia mínima de 99,97% para partículas con un tamaño superior a 0,3 micrómetros. hay varias tecnologías para su fabricación, aunque los más comunes están fabricados en papel de fibra de vidrio, montado sobre unos separadores corrugados de aluminio que le dan cierta rigidez.

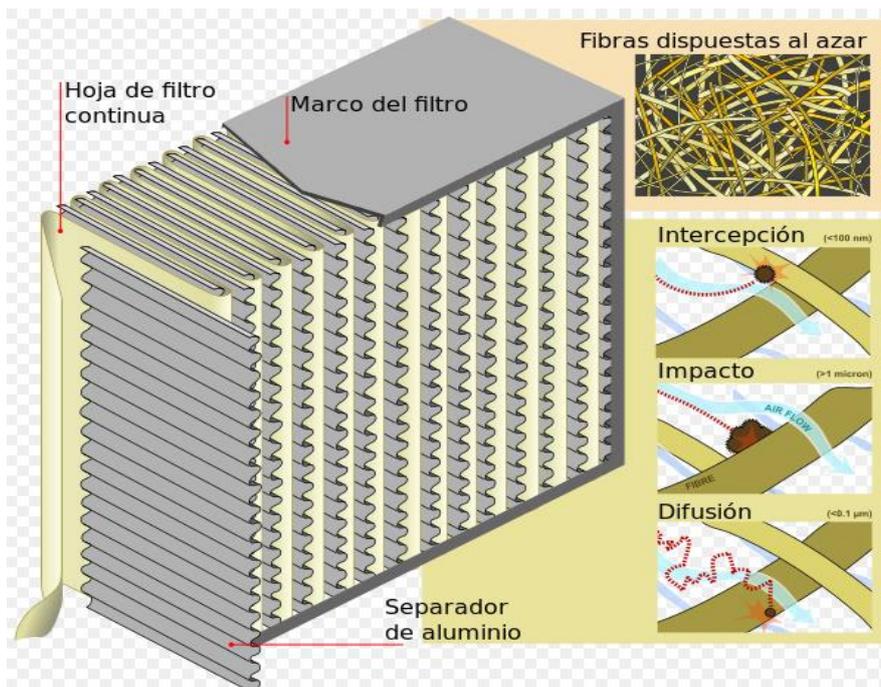


Ilustración 5 Filtro H.E.P.A.

### **1.1.3.2 Filtros de carbón**

#### 1.1.3.2.1 Introducción

Especialmente relevantes para el L.C.A.. Aunque se desarrollará en detalle el papel del carbón activo y sus propiedades, se puede ir adelantando ciertos datos básicos sobre su instalación en los sistemas de ventilación y filtrado.

La misión de los filtros de carbón activo es retener el yodo radiactivo que se da en operación normal o en grandes cantidades en caso de accidente. El filtro de H.E.P.A. también tiene el mismo objetivo, aunque ambos se diferencian en el estado en el que se encontrará el yodo reactivo.

- El filtro H.E.P.A. es capaz de retener aerosoles.
- El filtro de carbón activo busca retener el yodo en estado gaseoso.

Es por eso que lo más normal es encontrar ambos filtros trabajando en tándem, uno tras el otro.

En los lechos de carbón activo, el filtrado se da mediante la adsorción. la adsorción es el proceso por el cual las partículas quedan retenidas en las superficies de un material (se desarrollará más en profundidad en su correspondiente apartado). Es importante no confundirlo con el proceso de absorción, que es el proceso por el que un elemento pasa de una primera fase a incorporarse al volumen de la segunda fase.

Dicha adsorción se da en los granos de carbón, que forman el lecho de carbón activo.

#### 1.1.3.2.2 Tipos de bancos de carbón activo

En los H.E.P.A.s, puede variar su tamaño y dimensiones, pero los lechos de carbón activo son algo más complejos, al tener que retener una gran cantidad de granos de carbón activo.

- Tipo bandeja: como su nombre indica, el banco se compone de numerosas bandejas, en cuyo interior se encuentra el carbón activo. Dichas bandejas son de acero inoxidable, y tienen una apertura central por donde pasa el aire, tras la que tiene que atravesar dos mallas en cuyo interior está el carbón activo, produciéndose el filtrado. Un conjunto de bandejas forma lo que se conoce como un banco de carbón activo.



*Ilustración 7 Bandejas de carbón activo en sus racks*



*Ilustración 6 Racks sin las bandejas*

- Tipo tolva: es el más sencillo, se trata de un cubículo con mallas en sus extremos, para permitir el paso de aire, completamente relleno de carbón activo.



*Ilustración 8 Tolvas de carbón activo*

## 1.2 RADIOLOGÍA

### 1.2.1 Conceptos básicos de radiología

- Isótopo: elemento de igual número atómico, pero de distinta masa atómica.
- Radionucleido: es la forma inestable de un elemento, es decir, radioactivo.
- Masa atómica: número de protones más número de neutrones
- Unidad de energía atómica: electrón voltio, es la energía cinética que posee un electrón, inicialmente en reposo como después de ser acelerada por la diferencia de potencial de un voltio.
- Ondas electromagnéticas: se definen como la propagación de energía a través del espacio sin el soporte de un medio material.
- Ionización: La ionización es un proceso fundamental en el cual un átomo o molécula adquiere una carga eléctrica al perder o ganar electrones.
- Radiactividad: velocidad con que un determinado isótopo radiactivo se transforma en otro nucleido como se expresa como la fracción de átomos que se desintegra por segundo.
- Actividad: se llama actividad al número de desintegraciones por unidad de tiempo que presenta una sustancia reactiva.  $A = A_0 * e^{-\lambda t}$
- Constante de desintegración: se denomina periodo de semidesintegración ( $\lambda$ ), al tiempo que tiene que transcurrir para que una sustancia radiactiva reduzca su actividad a la mitad.  $T = \ln(2/\lambda)$
- Electronvoltio: unidad de energía, especialmente utilizada en el campo de radiaciones ionizantes. Es la energía cinética que posee un electrón (o partícula cargada) cuando se ha acelerado a través de un voltio de potencial eléctrico.
- Curio: medida utilizada para cuantificar la actividad radiactiva de un elemento. Se define como las desintegraciones por segundo que se dan en 1 g de sustancia reactiva. Un curio equivale a  $3,7 * 10^{10}$  desintegraciones por segundo.
- Bequerelio: representa la misma magnitud que el curio, un bequerelio es una desintegración por segundo. Es una unidad de medida del sistema internacional.

#### 1.2.1.1 Radiactividad

No se puede desarrollar una instalación radiactiva, sin explicar brevemente primero qué es la radiactividad:

La mayoría de los elementos que se encuentran en la naturaleza poseen núcleos estables, es decir el número de protones y neutrones que contienen no varía con el tiempo de forma natural.

Aun así, elementos naturales con un número másico superior al del plomo, tienen núcleos más o menos inestables que tienden a lo largo del tiempo, y con mayor o menor rapidez, a modificar su composición mediante la emisión

A esa situación de inestabilidad, o fenómeno de transformación nuclear espontánea, se le llama radiactividad. El ritmo o rapidez de transformación espontánea es característico de cada radionucleido y viene expresado por la llamada constante de integración.

La estabilidad o inestabilidad de los núcleos depende únicamente de su estructura interna y no está influenciada por factores externos como la temperatura, presión o estado químico. Está estrechamente relacionada con la energía de enlace por nucleón de la especie nuclear en cuestión. Cuanto mayor sea esta energía, mayor será la estabilidad del núcleo.

Esto no quiere decir que, mediante métodos artificiales, no se pueda modificar o alterar la estabilidad de un elemento.

Aunque pueda parecer obvio, es importante destacar que la inestabilidad de un elemento conlleva su desintegración, llevándolo finalmente a un estado estable, y perdiendo actividad en el proceso. La actividad de un elemento solo es función del tiempo, viéndose inalterada por cualquier otro factor.

$$A = A_0 * e^{-\lambda t} ; T = \frac{\ln 2}{\lambda} ; A = A_0 * 2^{-n}$$

$\lambda$  constante de desintegración ;  $T$  periodo de semidesintegración ;  $n$  numero de periodos  $T$

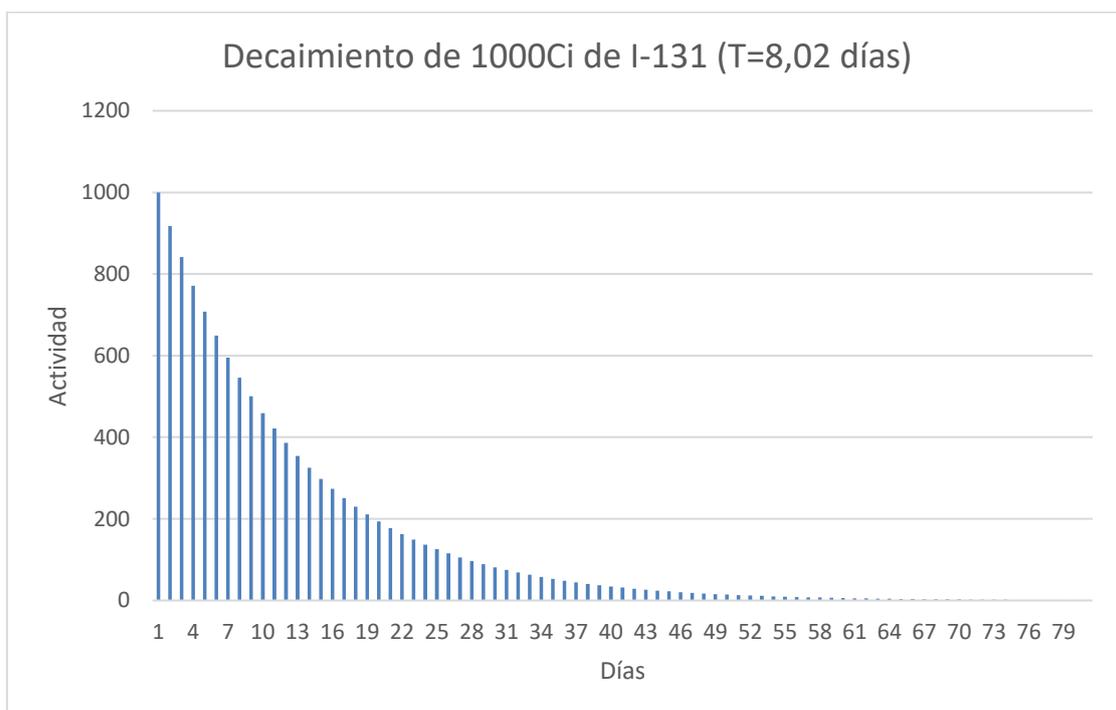


Tabla 2 Decaimiento de 1000Ci de I-131

## 1.2.2 Radiación

En este apartado se va a desarrollar conceptos más avanzados de radiología, imprescindibles a la hora de entender el trazador que se ha empleado, y por ello, el diseño de la instalación.

### 1.2.2.1 Tipos de radiación

Hay distintos tipos de radiación. Desde el punto de vista de protección radiológica, los factores importantes son:

- Capacidad de penetración
- Daños biológicos
- Tipo de desintegración

#### 1.2.2.1.1 Rayos X

Los rayos X son una forma de radiación electromagnética que se encuentra en una región del espectro por encima de la radiación ultravioleta. Esto implica que los fotones de rayos X poseen una energía significativamente más alta que los de la luz visible, y debido a su corta longitud de onda, los rayos X exhiben propiedades muy distintas a las de la luz visible. [1]

Una propiedad destacada de los rayos X es su capacidad para penetrar a través de materiales de espesor considerable, y esta capacidad aumenta a medida que la energía de los rayos X es mayor y la densidad de la materia que atraviesan es menor.

Los rayos X también tienen la capacidad de excitar la luminosidad en sustancias fluorescentes y de impresionar placas fotográficas. Esto permite obtener imágenes del interior del cuerpo humano, así como de la estructura o configuración interna de objetos sólidos o masas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los rayos X también pueden tener diversos efectos biológicos en los seres vivos y causar lesiones graves si la exposición es excesiva.

#### 1.2.2.1.2 Radiación gamma

La radiación gamma se refiere a una forma de radiación electromagnética compuesta por fotones con una energía generalmente superior a la de los rayos X. Aunque, si la aceleración de electrones que produce los rayos X es lo suficientemente alta, también se pueden obtener fotones con energías similares e incluso superiores a las de los rayos gamma. [1]

La diferencia fundamental entre ambas radiaciones radica en que, mientras que los fotones de rayos X se generan en la corteza del átomo, los fotones gamma

se generan espontáneamente en el núcleo de átomos inestables o radioactivos. Estos fotones gamma se emiten con energías específicas y características determinadas por el núcleo en cuestión (las emisiones gamma suelen ir acompañadas de partículas alfa y beta). Aunque difieren en su origen, naturaleza y propiedades, los rayos X y los rayos gamma son similares.

En la actualidad, las energías de excitación y desexcitación de los núcleos suelen estar comprendidas entre cientos de keV y varios MeV, lo cual es considerablemente mayor que las energías presentes en la corteza del átomo. Por esta razón, los fotones gamma resultantes de transiciones energéticas en los núcleos atómicos tienen energías más altas que los fotones de radiación visible y los de radiación característica de rayos X, los cuales resultan de transiciones energéticas en la corteza del átomo. Es debido a esta mayor energía que los fotones gamma poseen un mayor poder de penetración.

Aunque se desarrollará más adelante, la radiación gamma será el principal motivo por el cual hay que utilizar blindajes, por su capacidad de penetración y peligro para la vida.

#### 1.2.2.1.3 Radiación neutrónica

Radiación compuesta por neutrones. Tiene una alta capacidad de penetración, ya que no poseen carga eléctrica, y son perjudiciales para la salud humana.

### 1.2.3 Tipos de desintegración

Se ha visto el concepto de radiación gamma, energía liberada por la desintegración del elemento. Queda por ver esa desintegración como se genera.

De acuerdo con la naturaleza de la radiación emitida existen 3 tipos fundamentales de procesos radiactivos: desintegración alfa, desintegración beta y desintegración gamma.

#### 1.2.3.1 Desintegración alfa

Constituyen la emisión espontánea de núcleos de helio-4, y por tanto están constituidas por dos protones y dos neutrones fuertemente ligados. Son partículas pesadas doblemente cargadas con carga positiva.

La mayoría de los radionúclidos que emiten partículas Alfa son núcleos pesados, con número másico mayor de 140.

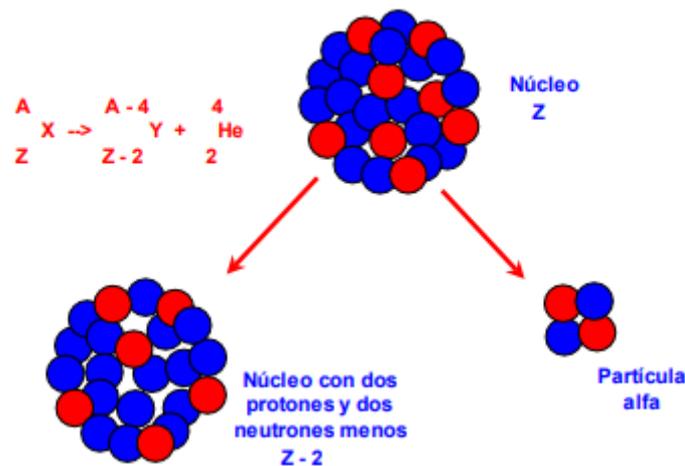


Ilustración 9 Desintegración alfa, fuente (curso supervisores CIEMAT)

### 1.2.3.2 Desintegración beta

Agrupar 3 procesos radiactivos:

- Desintegración beta- o emisión de un electrón: el ser resultado de la desintegración de un neutrón del núcleo que se transforma en un protón como un electrón que es emitido y otra partícula llamada antineutrino. El número residual tiene el mismo número másico que el originario pero su número atómico es una unidad mayor.

$$n > p + e^{-} + \nu$$

Se da principalmente en núcleos que poseen un número excesivo de neutrones.

El espectro energético de los electrones emitidos por un determinado radionucleido emisor beta negativo es un espectro continuo; es decir, los electrones emitidos en una desintegración beta negativo presentan una distribución continua en energías, abarcando desde cero hasta una energía de máxima que es característica del núcleo en particular.

*(De especial interés, ya que es el tipo de desintegración que experimenta el radionucleido que utilizaremos en la instalación)*

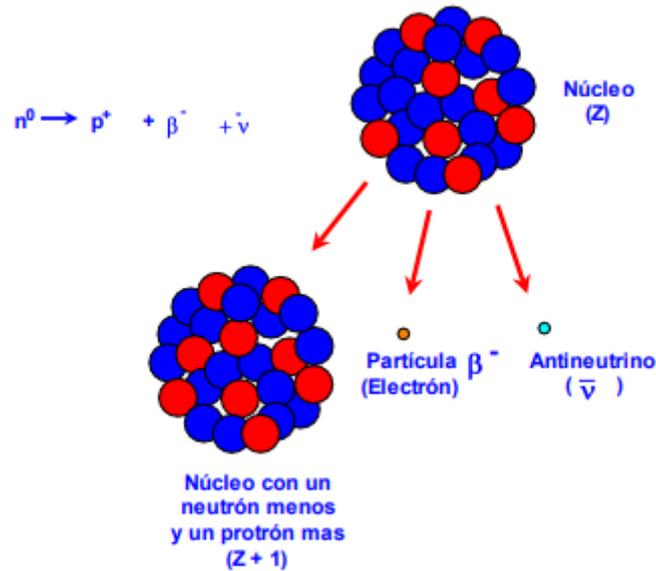


Ilustración 10 Desintegración beta negativa, fuente (curso supervisores CIEMAT)

- La desintegración beta+ o emisión de un positrón: consiste en la emisión de positrones por los núcleos atómicos. El positrón es la antipartícula del electrón: su masa es igual a la del electrón pero su carga eléctrica es positiva. Es el resultado de la transformación de un protón del núcleo en un neutrón como un positrón y un neutrino.

- 

$$p > n + e^+ + \nu$$

El núcleo residual tendrá el mismo número másico que el originario, pero su número atómico se verá reducido en una unidad.

El espectro energético de los positrones emitidos en la integración beta masculino, es también continuo.

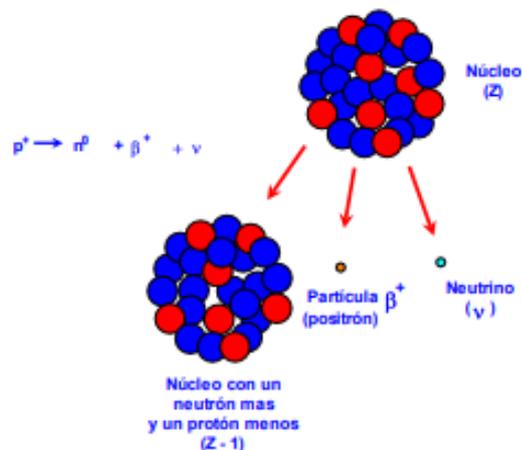
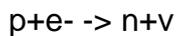


Ilustración 11 Desintegración beta positiva, fuente (curso supervisores CIEMAT)

- La captura electrónica o captura de un electrón cortical por el núcleo atómico: en este proceso, el núcleo captura un electrón de las capas internas del átomo, y lo combina con un protón nuclear transformándose el patrón en neutrón según el siguiente esquema.



El proceso de captura electrónica va siempre acompañado de la emisión de rayos X característicos del átomo.

Los núcleos que experimentan este tipo de desintegración alteran su número atómico, pero no su número másico de forma que los núcleos residuales son isómeros del originario

### **1.2.3.3 Desintegración gamma**

La emisión de rayos gamma es un proceso mediante el cual el núcleo de un átomo libera su energía de excitación. Después de experimentar una desintegración alfa o beta, el núcleo resultante puede quedar en un estado excitado, es decir, con un exceso de energía interna.

Para restablecer su equilibrio energético, el núcleo se desexcita emitiendo un fotón gamma.

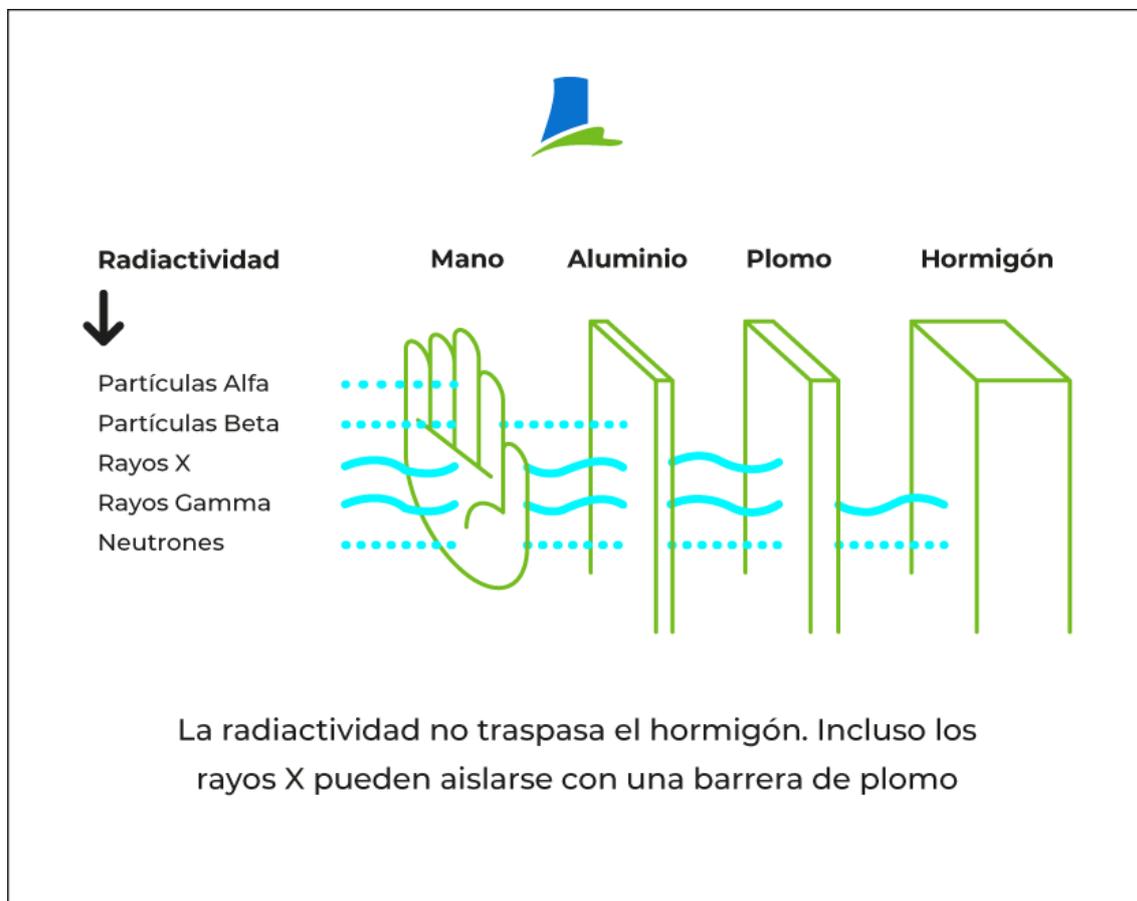
### 1.2.4 Niveles de penetración de la radiación

La capacidad de penetración dependerá de la energía que dispongan las partículas, y de su masa. Como norma general, las partículas son frenadas muy rápido, las ondas electromagnéticas tienen más capacidad de penetración.

Esto se debe a que las partículas son de gran tamaño, favoreciendo el choque y retención en el material.

Las ondas electromagnéticas tienen mayor capacidad de penetración, pero debido a su carga, son frenadas por la carga del material.

Los neutrones tienen mucha capacidad de penetración. Tienen una masa pequeña, y no tienen carga.



*Ilustración 12 Penetración de la radiactividad, fuente (Foro Nuclear, publicación web)*

Esta información es fundamental a la hora de saber cómo protegerse de cada tipo de radiación. De esta información se extrae que las partículas Alfa y beta son fáciles de blindar, la propia ropa es capaz de para estas partículas, pero presentan mucho riesgo en caso de ser ingeridas o inhaladas.

Los rayos X y los rayos gamma son bastante más complejos, requiriendo un diseño de las instalaciones adecuado, de un uso apropiado de blindajes

## 1.2.5 Interacción de las partículas cargadas con la materia

### 1.2.5.1 Introducción

Tanto las radiaciones corpusculares como las electromagnéticas comparten la propiedad de penetrar en la materia y transferir su energía, ya sea de forma total o parcial, a medida que interactúan con los átomos que componen dicha materia.

La comprensión de los principales procesos de interacción entre las radiaciones y la materia es crucial para el estudio de detectores de radiación, magnitudes y unidades asociadas a la radiación, efectos biológicos en organismos vivos y el diseño de blindajes adecuados para cada tipo de radiación.

Las radiaciones que comparten la capacidad de producir ionización en los materiales que atraviesan son conocidas como radiaciones ionizantes. La ionización ocurre cuando un electrón es expulsado de su estructura atómica o molecular.

Las radiaciones constituidas por partículas cargadas, como electrones, protones o partículas alfa, son directamente ionizantes, ya que la ionización del medio se produce directamente por la partícula cargada.

### 1.2.5.2 Tipos de interacción de partículas cargadas la materia

Cuando una partícula cargada atraviesa la materia, se ve sometida a la influencia de fuerzas electrostáticas provenientes de los núcleos y, en mayor medida, de los electrones presentes en la misma. Esto da lugar a un proceso gradual de frenado de la partícula hasta que finalmente se detiene por completo.

Las partículas cargadas pierden su energía al interactuar con la materia a través de tres tipos principales de colisiones:

- Colisión elástica: La partícula choca con los átomos del medio, desviándose de su trayectoria y cediendo una cierta cantidad de energía en forma de energía cinética. No se produce alteración anatómica en el núcleo en el medio.
- Colisión inelástica: Las partículas chocan con los átomos del medio. No se conserva la energía cinética del medio, Ya que partes empleadas en modificar la estructura electrónica de los mismos produciendo excitaciones.

- Colisión radiativa: La partícula cargada se frena o se desvía en su interacción con los átomos del medio. Y como resultado, emite ondas electromagnéticas. Este proceso a nivel elemental se produce con mayor probabilidad en las proximidades del núcleo atómico, como secuencia de pequeñas desviaciones de la partícula incidente. Se conoce también como radiación de frenado. (de vital importancia dada la naturaleza de nuestro trazador).

La radiación de frenado resulta prácticamente insignificante para partículas cargadas e iones pesados en comparación con los electrones al atravesar un medio material. Sin embargo, para los electrones, la radiación de frenado adquiere una importancia considerable cuando su energía supera algunos MeV, especialmente si el medio material tiene un número atómico elevado. Esto se deduce de la relación entre la pérdida de energía por radiación de frenado y la ionización.

Es cierto que la radiación de frenado es de menor relevancia para partículas cargadas e iones pesados debido a su masa y carga más altas. Estas partículas interactúan de manera más efectiva con los núcleos atómicos mediante colisiones nucleares, lo cual es la principal causa de pérdida de energía en la materia, reduciendo significativamente la contribución de la radiación de frenado.

Por otro lado, para los electrones, especialmente aquellos con energías superiores a varios MeV, la radiación de frenado puede tener una importancia considerable. A medida que los electrones de alta energía atraviesan un medio material con un número atómico elevado, experimentan aceleraciones más pronunciadas debido a las fuerzas electrostáticas con los electrones de los átomos. Esto da lugar a la emisión de fotones de alta energía, es decir, radiación de frenado.

#### 1.2.5.2.1 Poder de frenado y alcance

Cuando una partícula cargada atraviesa un medio material, pierde energía de forma continua al interactuar con los átomos del medio. Estos procesos de excitación e ionización contribuyen a la pérdida gradual de energía de la partícula cargada.

Una magnitud importante, es la descripción cuantitativa de la pérdida continua de energía de la partícula cargada incidente al atravesar la materia, y el poder de frenada. Se define como la pérdida de energía experimentada por la partícula por unidad de longitud a lo largo de su trayectoria en la materia. [1]

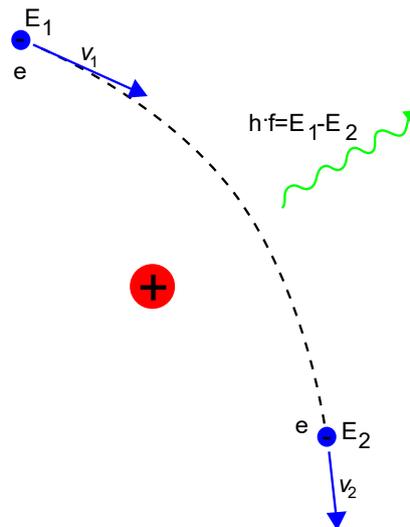
Se expresa en unidades de energía por unidad de longitud.

$$MeV/cm, = J/cm$$

La magnitud de la radiación de frenado con respecto a la pérdida de energía por ionización varía dependiendo del tipo de partícula y del medio material. Sin embargo, en general, para electrones de alta energía y medios con un número atómico alto, la radiación de frenado puede tener una contribución significativa en comparación con la pérdida de energía por ionización.

$$\text{Radiación Frenado} = ZE/800 \text{ (MeV)}$$

$Z = \text{numero atomico} ; E = \text{energia en MeV}$



*Ilustración 13 Radiación de frenado o Bremsstrahlung*

Es conveniente expresar el alcance para una partícula cargada en una sustancia mediante la masa expresada en gramos o miligramos por centímetro cuadrado. De una lámina de dicha sustancia de 1 cm cuadrado de superficie y de grosor igual a espesor atravesado. A un espesor así expresado su suele llamar espesor másico. [1]

$$X_m = d(\text{g/cm}^3) * (\text{cm})$$

Se puede ver que el alcance de los electrones en un medio depende muy poco de la naturaleza de la sustancia atravesada.

#### 1.2.5.2.2 Frenado y alcance de partículas beta

Debido a su menor masa y mayor velocidad, las partículas beta exhiben una velocidad considerablemente mayor que las partículas alfa con la misma energía. Esto se traduce en un mayor poder de penetración en la materia. Las partículas beta, al ser más ligeras y rápidas, pueden recorrer distancias significativas en el aire, con un alcance que puede estimarse en metros. Sin embargo, es importante destacar que el alcance depende en gran medida de la energía de la partícula.

Además, las partículas beta también presentan una trayectoria altamente irregular dentro de la materia. Esto se debe a las desviaciones que experimentan al interactuar con los electrones y núcleos atómicos del medio. Las colisiones con estos constituyentes de la materia provocan cambios bruscos en la dirección de la partícula beta, lo que resulta en una trayectoria irregular y tortuosa.

A continuación, se da el alcance para partículas beta en función de su energía y en diversos materiales.

*Tabla 3 Alcance de radiación beta en función de su energía, fuente (Curso operador Infocitec)*

<b>Alcance de radiación beta en función de su energía (en mm)</b>				
<b>Energía (MeV)</b>	<b>AIRE</b>	<b>Tejido biológico</b>	<b>Aluminio</b>	<b>Plástico</b>
0,05	29	0,04	0,015	0,03
0,10	100	0,13	0,05	0,09
0,50	1200	0,85	0,65	1,60
1,00	3050	4,75	1,52	3,50
1,50	5000	6,80	2,4	5,00
2,00	7100	11,15	4,1	7,40
2,50	9100	13,60	5,5	9,80
3,00	11000	17,35	6,75	12,00
4,00	15000	22,50	7,85	15,50

Cuando se trata de diseñar blindajes o contenedores para radionúclidos que experimentan desintegración beta, es importante considerar ciertos aspectos. En particular, se busca utilizar materiales que sean efectivos para frenar los electrones o positrones emitidos por la desintegración, al tiempo que minimizan la radiación de frenado generada en el proceso.

Por lo tanto, se suele utilizar un primer espesor de material con bajo número atómico en contacto directo con el radionúclido. Este material ligero ayuda a frenar las partículas cargadas (electrones o positrones) de manera más eficiente, reduciendo así la cantidad de radiación de frenado producida. Al tener un bajo número atómico, este material permite una interacción más suave y menos intensa con las partículas cargadas, minimizando su dispersión y generando menos radiación secundaria.

Luego, se añade un cierto espesor de material con alto número atómico. Este material más pesado se utiliza para atenuar cualquier radiación adicional que pueda generarse durante el frenado de las partículas o en el proceso de aniquilación de los positrones. El alto número atómico del material favorece una interacción más intensa con las partículas o los fotones, lo que resulta en una mayor capacidad de absorción y atenuación de la radiación.

En resumen, para almacenar de forma segura un radionucleido de desintegración beta:

- Un primer material ligero, de bajo número atómico, para frenar eficientemente las partículas cargadas.
- Un segundo material pesado, de elevado número atómico, para atenuar cualquier radiación adicional generada durante el proceso.

#### 1.2.5.2.3 Interacción de fotones con la materia

Tanto los rayos X como los rayos gamma son tipos de radiación electromagnética que tienen la capacidad de interactuar directamente con la materia, lo cual resulta en la liberación de electrones secundarios.

Estos electrones secundarios, a su vez, provocan excitación e ionización en los átomos y moléculas del material que atraviesan. Por lo tanto, se consideran radiaciones indirectamente ionizantes.

Esta interacción se puede dar mediante uno de los siguientes procesos:

- Efecto fotoeléctrico: el fotón o gamma es completamente absorbido y toda su energía es comunicada a un electrón, el cual escapa del átomo.
- Efecto Compton: el fotón o gama incidente, al chocar, solo cede parte de su energía, convirtiéndose en otro fotón de menor energía y, por tanto, menor frecuencia, desviado a la trayectoria inicial.
- Creación de pares: El fotón o gamma, al acercarse a un núcleo atómico desaparece totalmente y en su lugar aparece un electrón y un positrón. Se trata de una conversión de energía en materia.

El paso de la radiación electromagnética a través de la materia se caracteriza por una ley de atenuación exponencial. Esto es así porque en la interacción de un haz de fotones con la materia que atraviesan, esto es una eliminación de la intensidad a título individual mediante los procesos descritos anteriormente.

$$\frac{I(x)}{I_0} = e^{-\mu \cdot x}$$

Donde  $\mu$  ( $m^{-1}$ ) coeficiente de atenuación lineal, es un parámetro característico de absorbente, que depende aparte la naturaleza de la densidad del mismo, de la energía de los fotones incidentes.

Energía (MeV)	Agua	Aluminio	Hierro	Plomo
0,2	0,14	0,33	1,06	5
0,5	0,09	123	0,63	1,7
1	0,067	0,16	0,44	0,77
1,5	0,057	0,14	0,4	0,57
2	0,048	0,12	0,33	0,51
2,5	0,042	0,1	0,31	0,48
3	0,038	0,09	0,3	0,47
4	0,033	0,082	0,27	0,48
5	0,03	0,074	0,24	0,48

Tabla 4 Coeficientes de absorción lineal, fuente (curso operador Infocitec)

También es muy común, a la hora de elaborar blindajes para rayos X y gamma, el empleo de espesores de semirreducción de un material. Como su nombre indica, es el espesor necesario (interpuesto en su trayectoria) para reducir la intensidad de una fuente a la mitad.

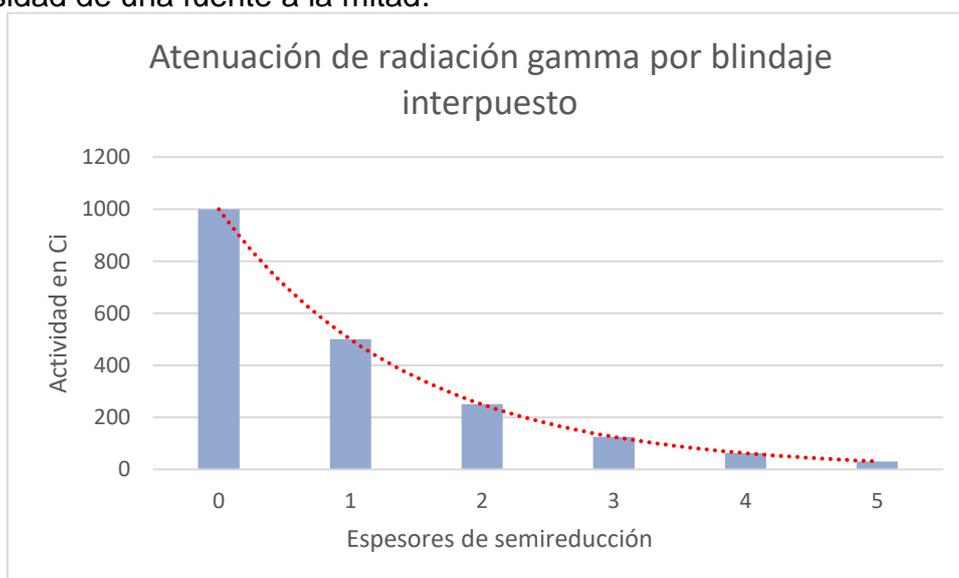


Tabla 5 Atenuación radiación mediante semirreducciones

Se observa una similitud entre la atenuación experimentada al atravesar diferentes espesores de material y la desintegración de un radioisótopo a lo largo del tiempo (Tabla 1), ya que ambas magnitudes están relacionadas por la misma relación matemática.

## **1.2.6 Protección radiológica**

### **1.2.6.1 Introducción**

La protección radiológica tiene como finalidad la protección de los individuos que, por circunstancias de su trabajo, por el uso de equipos o materiales radiactivos, puedan estar expuestos a irradiaciones.

Es importante destacar, que el riesgo por radiaciones se descompone en dos tipos de efectos biológicos:

- Efectos estocásticos: aquellos cuya probabilidad de ocurrencia depende de la dosis recibida. Entre estos efectos se incluyen los efectos genéticos y los efectos cancerígenos. En el caso de estos efectos, no existe una dosis umbral por debajo de la cual no se produzcan.

A mayor exposición, mayor probabilidad de ocurrencia.

- Deterministas: aquellos que se manifiestan únicamente por encima de una dosis umbral específica y cuya gravedad está relacionada con la cantidad de dosis recibida. Algunos ejemplos de estos efectos incluyen la dermatitis, las cataratas y las deficiencias hemáticas.

A mayor exposición, y tras superar el umbral, mayor gravedad de los síntomas.

La protección radiológica se centra especialmente en las personas que trabajan habitualmente con fuentes generadoras de dichas radiaciones, además del público en general ajeno, que pueda verse afectado de forma puntual. Oh

### **1.2.6.2 Principios de la protección radiológica**

La protección radiológica se centra especialmente en la prevención de la ocurrencia de los efectos no estocásticos perjudiciales, a la vez que trata de limitar la probabilidad de que se produzcan efectos estocásticos.

Por ello, se establece un sistema de limitación de dosis. Que va a regular la cantidad de radiación que puede recibir un trabajador en un solo instante coma y a lo largo de un determinado tiempo.

Este sistema de limitación de dosis está basado en 3 conceptos fundamentales:

- Justificación: la exposición a radiación debe estar justificada, es decir, tiene que haber un motivo que produzca un beneficio neto positivo, que pueda compensar la dosis recibida.

Es un concepto que en ocasiones es fácil de apreciar (radioterapia), y en otros puede ser algo más complicado (beneficio económico).

- Optimización: una vez se determina que se va a llevar a cabo una actividad con dosis, Hay que tratar que esa dosis sea la más baja posible, o mejor dicho, que siga la filosofía a ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*).

La filosofía ALARA afecta a conceptos como diseño de instalaciones, dimensionamiento de equipos de trabajo, metodologías de trabajo...

(i.e. se tiene que reparar una válvula, para la cual hace falta un mecánico y un soldador. En vez de realizar toda la operación in situ, una zona afectada por radiaciones ionizantes, se desmonta la válvula para su reparación en una zona de inferior tasa de dosis.)

- Limitación de dosis individual: se establecen unos límites de dosis para personas profesionalmente expuestas y para el público, este requisito establecido para asegurar una protección adecuada, incluso para los individuos más expuestos punto los límites recomendados representan los valores inferiores que no deben ser sobrepasados.

Para llevar a cabo este control, el personal que se ve afectada por radiaciones ionizantes deberá de llevar unos dispositivos capaces de registrar la dosis recibida, y de poder avisar en tiempo real al portador de la dosis recibida, y/o tasa de dosis de la zona.

### **1.2.6.3 Reducción de dosis**

Una vez se ha determinado que un trabajador va a recibir una dosis de radiación ionizante, hay ciertas formas de atenuar la radiación recibida. Estas formas, o factores, funcionan de forma independiente o adecuadamente combinados. Estos factores son:

- Distancia: en el caso más sencillo de una fuente puntual que emite uniformemente en todas las direcciones, la dosis recibida a una distancia de la fuente es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

$$Dosis = 1/r^2$$

La aplicación de la ley del cuadrado de la distancia es de interés fundamental para protegerse de las radiaciones x, gamma o neutrónica. En el caso de las

partículas cargadas, su alcance máximo en el aire viene determinada por su energía, lo cual proporcionará una distancia al límite

- **Tiempo:** cuanto menor sea el tiempo invertido en realizar una determinada operación menor será la dosis recibida, ya que la dosis es proporcional al tiempo de exposición.

Normalmente, una combinación correcta de tiempo y distancia suele ser suficiente para la protección necesaria. En los casos en los que la radiación es muy alta, o no se pueda emplear uno de los dos factores anteriormente citados, se utilizará un blindaje.

- **Blindaje:** como su nombre de forma intuitiva puede dar a entender, se trata de colocar un material de un espesor y/o materiales determinados, para atenuar la radiación que pueda llegar al personal.
  - Radiación Alfa: al ser partículas pesada, su alcance es muy pequeño, basta una simple hoja de papel para detenerla.
  - Radiación beta: es más penetrante, pero unos pocos centímetros de material ligero como el plástico o el vidrio son suficientes para blindar. El material ligero deberá ir recubierto de una capa de plomo, con el fin de abordar la radiación de frenado que se produzca.
  - Radiación X y gamma: son las más penetrantes, por lo que son también las más difíciles de blindar. Los diferentes procesos que experimentan al interactuar con materia conducen a una ley de atenuación exponencial.

En estos casos, un parámetro muy útil en la estimación de espesores de blindaje es el llamado espesor de semirreducción, definido como aquel que reduce la dosis a la mitad.

#### ***1.2.6.4 Clasificación de zonas***

En función del riesgo de exposición, considerando tanto la probabilidad como la magnitud de las posibles exposiciones, se establece una diferente señalización de zonas, que son:

ZONAS	TRÉBOL	TASA DE DOSIS (µSv/h)	CONTAMINACION SUPERFICIAL (**) Despr.(Bq/cm <sup>2</sup> )	CONTAMINACION AMBIENTAL (% LDCA)
LIBRE		< 0,5 (*)	No existe	No existe
ZONA VIGILADA	Gris azulado	< 3	< 0,4 (β-γ) < 0,04 (α)	No existe
ZONA CONTROLADA	Verde	< 10	< 4 (β-γ) < 0,4 (α)	< 10
ZONA CONTROLADA DE PERMANENCIA LIMITADA	Amarillo	< 1000	< 40 (β-γ) < 4 (α)	< 100
ZONA CONTROLADA DE PERMANENCIA REGLAMENTADA	Naranja	< 10 <sup>3</sup> (100 mSv/h)	< 400 (β-γ) < 40 (α)	< 1000
ZONA CONTROLADA DE ACCESO PROHIBIDO	Rojo	≥ 10 <sup>3</sup> (100 mSv/h)	≥ 400 (β-γ) ≥ 40 (α)	≥ 1000

Ilustración 14 Clasificación de zonas en función de su tasa de dosis, fuente (CSN, IRD-OP-GR-10, 2009)

[2]

Dichas zonas se representan en las instalaciones mediante carteles con la siguiente iconografía:



Ilustración 15 Iconos de zonas en función de su tasa de dosis, fuente (CSN, IRD-OP-GR-10, 2009)

[2]

Importante destacar que, si tiene flechas radiales, indican la presencia de radiaciones ionizantes, y si tiene el fondo punteado, indica la presencia de contaminación superficial. Ambas se pueden dar a la vez.



*Ilustración 16 Clasificación de zonas en función del tipo de actividad, fuente (CSN, IRD-OP-GR-10, 2009)*

[2]

La señalización de las zonas controladas y vigiladas se establece en el anexo IV del Real decreto 783/2001 y la norma UNE-73-302.

## **2. MEMORIA DE LA INSTALACIÓN**

### **2.1 LABORATORIO DE CARBÓN ACTIVO**

#### **2.1.1 Introducción**

Para poder realizar la solicitud de licencia, primero hay que desarrollar cual será la actividad del laboratorio. Es imprescindible tener claro ciertos conceptos para poder entender que ensayos se van a elaborar en un laboratorio de carbón activo.

Como concepto general, en el laboratorio de carbón activo (L.C.A.), tiene como objetivo realizar ensayos para evaluar diferentes parámetros del carbón, en este caso concreto, carbón activo de aplicación radiológica. Por ello, debe tener todo el instrumental necesario, el cual puede ser muy amplio.

#### **2.1.2 Condiciones generales**

Aparte de la instrumentación específica para cada ensayo, el laboratorio tendrá todo lo necesario para una normal operación de cualquier laboratorio. Véase:

- Mesas de trabajo para el personal, donde puedan disponer de sus equipos informáticos personales además de diverso material de oficina. Se estima que para la actividad que tendrá el laboratorio será necesario disponer de sitio para 4 trabajadores.
- Mesas de trabajo mecánico: el laboratorio estará provisto de todo lo necesario para el mantenimiento del propio laboratorio instrumental, desde racorería, hasta material eléctrico. No solo tendrá el material necesario como sino también el espacio para trabajar con ello (i.e. mesa de inoxidable alta).
- Debido a la cantidad de instrumentación que habrá que emplear, será necesario que el laboratorio tenga su propio equipo de protección eléctrica, el cual no se va a diseñar en ese proyecto.
- Para mantener unas condiciones climatológicas adecuadas, el laboratorio dispondrá de su propio sistema de climatización, el cual se podrá controlar desde el mismo laboratorio.
- Es relevante mencionar que para que las condiciones atmosféricas del laboratorio sean lo más estables posible, además de por el aspecto radiológico (se desarrollará en el apartado de protección radiológica), es importante evitar que el laboratorio u instalación radiactiva tenga ventanas.

Se han mencionado unas condiciones generales que debe de cumplir el laboratorio de carbón activo, aunque no se han mencionado las condiciones que debe reunir una instalación radiactiva, lo cual se desarrollará en su apartado correspondiente.

### **2.1.3 Distribución de laboratorio**

El laboratorio estará constituido por cuatro zonas bien diferenciadas:

- Zona de trabajo: zona de acceso libre, donde los operadores de la instalación tienen sus sitios asignados, mesas de trabajo, materiales, etc. Desde esta zona de trabajo se puede monitorizar y controlar los ensayos.
- Zona de ensayos: zona donde está todo el sistema para los sistemas de eficiencia de carbón activo (los que entrañan riesgo radiológico). Esta zona se considera zona vigilada.  
En esta zona también se realizan otros ensayos, pero por la ampliación de los sistemas de ensayo de eficiencia de carbón activo, se trasladará su ejecución a la “zona de trabajo”.
- Vitrina de gases: donde se sitúa el trazador radiactivo. Aquí se ejecutan todas las operaciones de manipulación del trazador: almacenaje, reacción, inyección, descontaminaciones...
- Almacén: zona de acopio del equipamiento que no está en uno o pendiente de calibrar, carbón de respaldo, etc...

Se podría añadir una quinta zona, aunque esté fuera del laboratorio, que es el sistema de ventilación y filtrado, responsable de mantener la atmósfera del laboratorio limpia.

La “zona de trabajo” está separada de la “zona vigilada” por una vitrina, además de por la vitrina de gases.

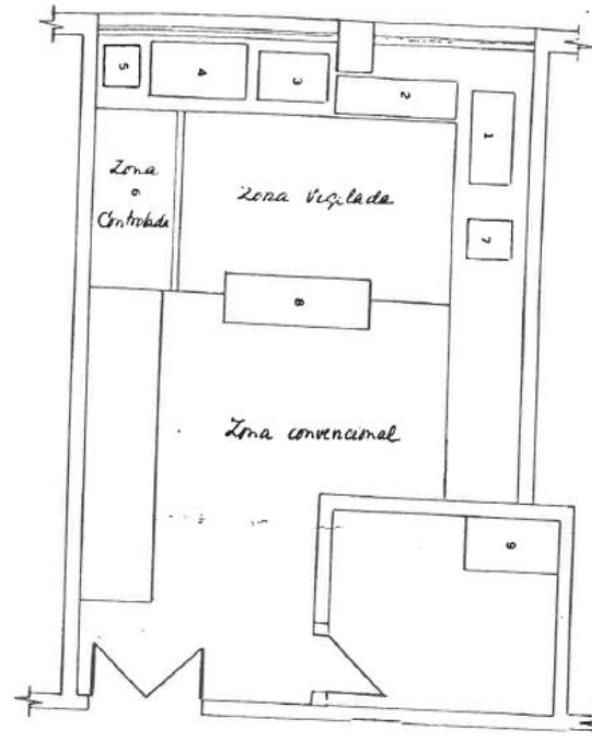
#### **2.1.3.1 Cambios en la distribución**

La instalación original consta de 1984, y desde entonces se han realizado modificaciones de relevancia técnica, y alguna mejora radiológica. Este proyecto, aprovechando la solicitud de autorización debido a su ampliación, va a recoger el estado actual y el futuro estado, cuando el proyecto sea implantado en su totalidad.

La distribución de las zonas de trabajo será importante a la hora de analizar blindajes, y demás protecciones radiológicas.

### DISTRIBUCIÓN DEL LABORATORIO 1984

1. Equipos de control
2. Calderas de agua
3. Sistema de inyección (yoduro de metilo)
4. Estufas de ensayo
5. Condensador
6. Vitrina de gases
7. Muestreador de centelleo
8. Puesto de mando y control
9. Analizador multicanal

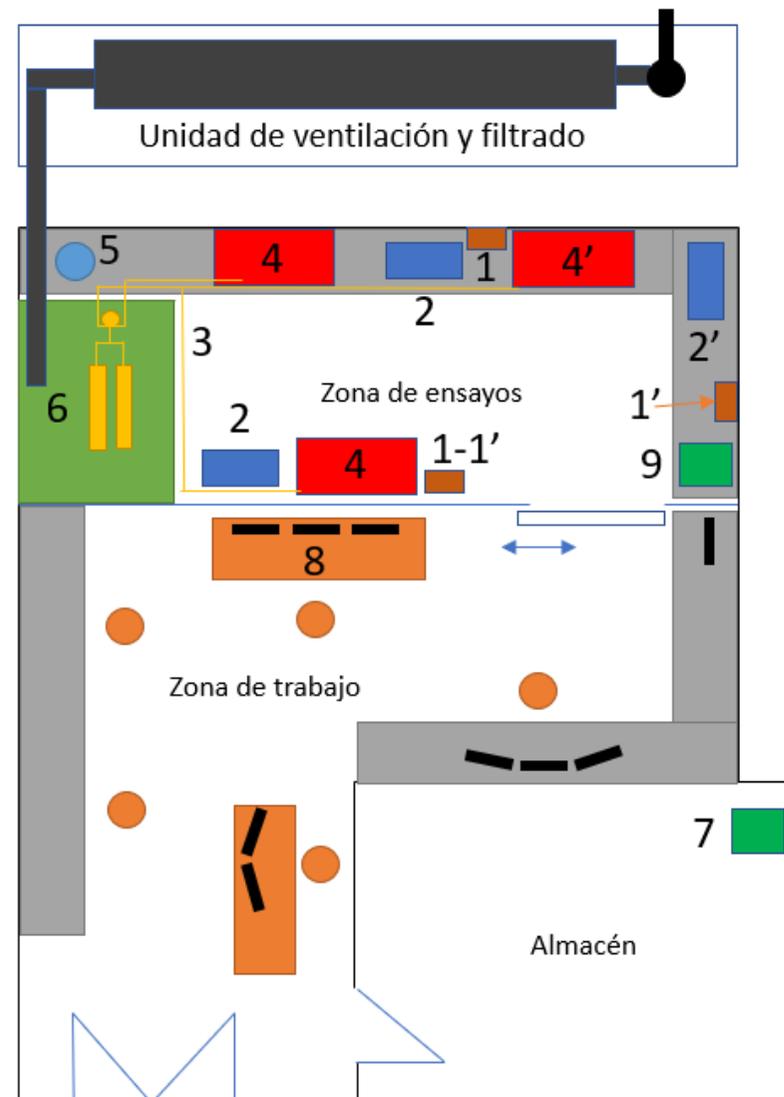


- 1: EQUIPO DE CONTROL.
- 2: GENERADOR DE VAPOR
- 3: ZONA DE INYECCION
- 4: HORNO DE LECHOS
- 5: CONDENSADOR
- 6: VITRINA DE GASES
- 7: DETECTOR DE CENTELLEO
- 8: PUESTO DE MANDO Y CONTROL
- 9: ANALIZADOR MULTICANAL

## DISTRIBUCIÓN DEL LABORATORIO PREVISTA

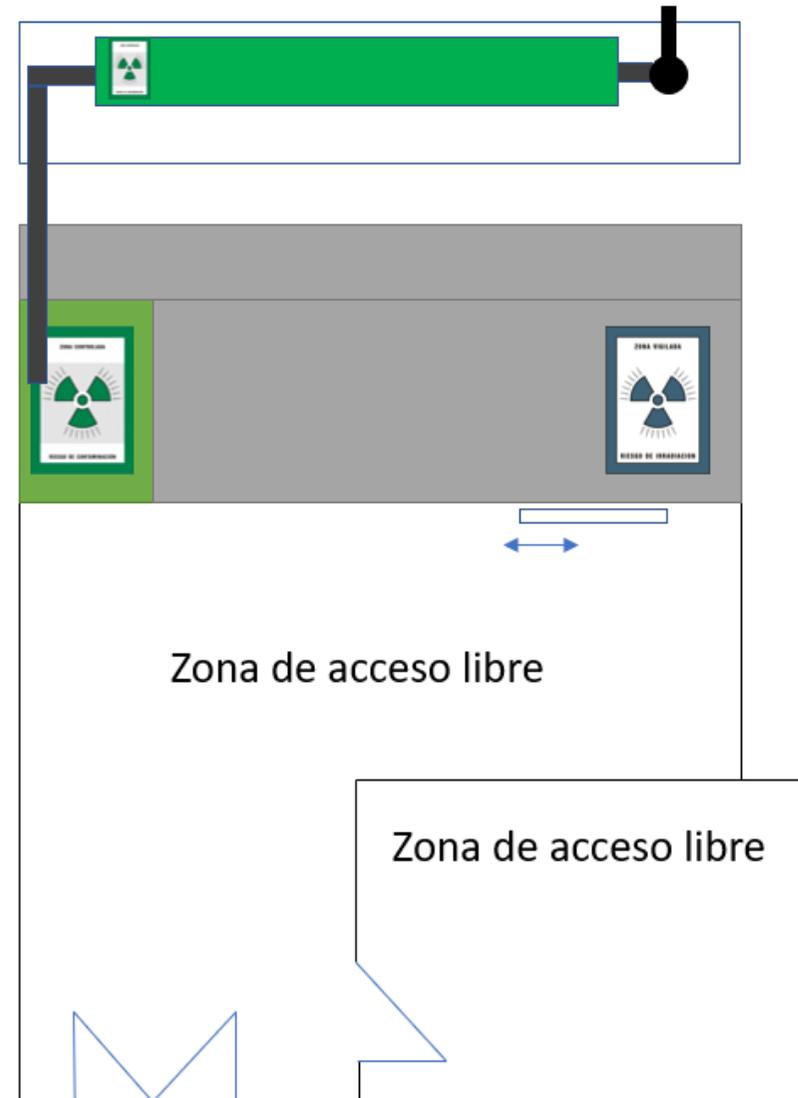
1. Cuadros de automatización y control
2. Calderas de agua
3. Sistema de inyección (yoduro de metilo)
4. Estufas de ensayo
5. Condensador
6. Vitrina de gases
7. Muestreador de centelleo
8. Puesto de mando y control
9. Analizador multicanal

*(La denominación "prima" indica situación de nuevos equipos)*



- Gris: zona vigilada
- Verde: zona controlada con riesgo de irradiación y contaminación

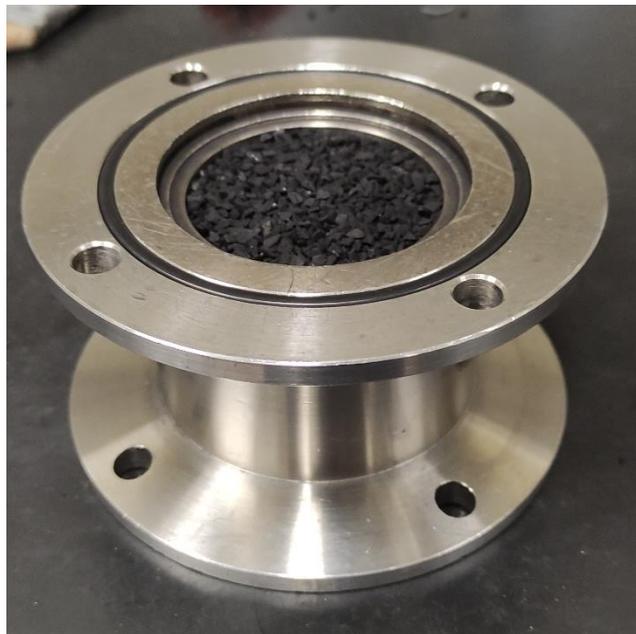
El interior del sistema de ventilación y filtrado se considera zona controlada con riesgo de irradiación y contaminación hasta que sea chequeado.



### 2.1.4 Carbón activo

Es el momento de desarrollar que función va a tener la instalación radiactiva. Como ya se ha adelantado, en esta instalación se va a ubicar el Laboratorio de Carbón Activo (L.C.A.). Es una instalación que se dedica al ensayo y estudios del carbón activo. El carbón activo es un material muy utilizado en el mundo químico por su alta capacidad de adsorción, lo que lo hace perfecto como elemento descontaminante.

El carbón activo, o carbón activado, es un carbón tratado para obtener un elemento pequeño, pero con una gran área superficial, al ser muy poroso. El apellido “activo” hace referencia al tratamiento al que se le somete: exposición a altas temperaturas y reacciones químicas. Así, se potencian los rasgos que lo hacen tan atractivo.



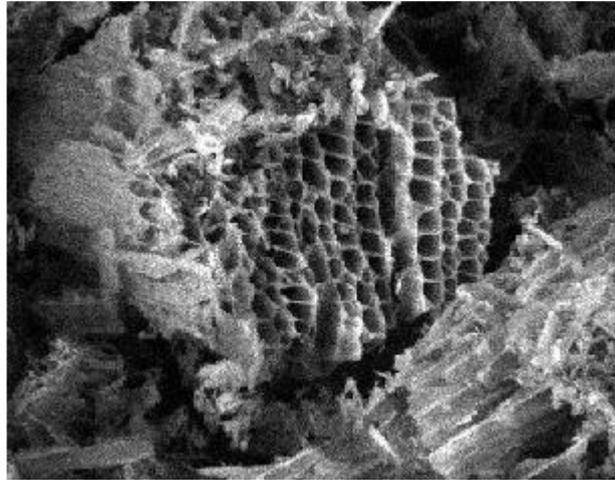
*Ilustración 17 Carbón activo compactado en una sección de la maqueta, fuente (TECNATOM)*

Además, el carbón activo destinado al filtrado de la ventilación de centrales nucleares o instalaciones radiactivas está tratado de forma especial, para mejorar la adsorción del yodo, principal contaminante radiactivo de una central nuclear de fisión. Este tratamiento, de forma general, se realiza con un impregnante conocido como TEDA (trietilendianima).

#### 2.1.4.1 Adsorción y desorción

Es importante explicar el fenómeno de la adsorción, para evitar equivocarlo con “absorción”. La adsorción es el proceso por el cual, en este caso, partículas a eliminar del caudal de aire, en contacto con el carbón activo, son retenidas en los poros de los granos del carbón.

Esta adsorción no implica reacción química entre el carbón activo y las sustancias contaminantes, se trata de una interacción física (fuerzas de atracción como enlaces débiles o electrostática).



*Ilustración 18 Carbón activo bajo microscopio, fuente (TECNTOM)*

Pese a que el carbón activo es un excelente filtrante, el carbón activo de uso nuclear tiene un impregnante, el cual mejora mucho su eficiencia de adsorción, sobre todo en condiciones de mucha humedad (típicas de un accidente nuclear).

En oposición al fenómeno de adsorción, está la desorción. Las partículas retenidas en los huecos del carbón son liberadas, volviendo al caudal de aire (normalmente, tras un aporte de energía, i.e. calor).

#### **2.1.4.2 TEDA**

El compuesto TEDA (trietilendianina) es el impregnante más empleado por los proveedores de carbón activo del sector nuclear. Este compuesto químico mejora las propiedades de adsorción del carbón activo, y la selectividad frente al yodo radiactivo (yodo, yodo molecular, yoduro de metilo), que es el principal contaminante en operación normal, y especialmente, en caso de accidente.

El TEDA también tiene otro beneficio: mejora la capacidad de adsorción en condiciones de elevada humedad (el caso de un accidente nuclear). La humedad es un factor muy relevante para el carbón activo, las partículas de agua pueden ser adsorbidas, degradando el carbón. El impregnante también sufre desgaste por humedad y con el tiempo, por lo que el carbón debe cambiarse según se empiece a observar una reducción en la eficiencia de filtrado. [3]

Se puede encontrar carbón activo de categoría nuclear sin TEDA, pero es un hecho cada vez más raro.

### **2.1.4.3 Contaminante adsorbido en el carbón activo**

Aunque los lechos de adsorción se suelen someter a un tratamiento para su regeneración (calentamiento, lavado), no es algo que la mayoría de las normas permita hacer en los carbones activos con aplicación nuclear por varios motivos:

- El carbón activo, tras su uso, se considera residuo radiológico. Además, al emplearse en ventilación, es un riesgo directo para las personas.
- Difícil gestión del residuo: en su mayoría, el residuo radiactivo es de carácter gaseoso. Al regenerar el carbón, los contaminantes pasarían de nuevo al aire, siendo su gestión prácticamente imposible.
- Aunque la regeneración del carbón mejoraría su eficiencia de adsorción, el TEDA no puede regenerarse, siendo inviable hacerlo de forma operativa.
- La regeneración por calor (la más común), podría provocar la desorción de partículas radiactivas al ambiente, eliminando el propósito de dichos filtros.

Esto hechos hacen que los proveedores de carbón activo de clase nuclear busquen maximizar su vida útil, maximizando su eficiencia.

### **2.1.4.4 Parámetros del carbón activo**

Este carbón debe poseer unas características muy concretas. Dichas condiciones están recogidas en numerosas normativas, que varían según la organización, tecnología de la planta nuclear, consejo nuclear regulador; pero las principales normas son:

- Tamaño reducido, para facilitar su compactación.
- Buena capacidad de adsorción en situaciones de elevada humedad.
- Impregnante para favorecer la selectividad al I-131.

Como resumen, los parámetros más importantes a evaluar son:

- Tamaño: el grano de carbón debe de tener un tamaño especificado, parámetro que depende del fabricante.

- No muy grande: pese a tener una gran área superficial, quedarían espaciosos huecos entre los granos, emitiendo un paso franco del aire (potencialmente contaminado).
- No muy pequeño: el área superficial no sería tan grande, pero los huecos entre granos de carbón serían virtualmente inexistentes, dificultando el paso del aire, generando una gran pérdida de carga.
- Capacidad de adsorción: la forma de averiguar si un lecho de adsorción realiza bien su trabajo en sencillo, exponiéndolo a una cantidad conocida de contaminante, y viendo cuanto es capaz de retener. Este es el parámetro más importante a la hora de determinar la vida útil del carbón.
- Punto de autoignición: el tamaño de los lechos de adsorción de carbón activo varía en función del sistema de ventilación en el que se hallen (siendo de unos kilos, hasta toneladas), pero hay una constante: su gran poder calorífico hace que sean un gran riesgo de incendio, especialmente al trabajar con temperaturas elevadas.

## 2.1.5 ENSAYOS

Una vez se ha introducido el material a ensayar (carbón activo), se va a especificar las diferentes técnicas, y utilidad, que se emplean en el L.C.A.

### 2.1.5.1 Ensayos de eficiencia

Los ensayos de eficiencia representan cerca del 95% de los ensayos que se realizan en el L.C.A.. Dicho ensayo analiza la capacidad de adsorción de una muestra característica de un sistema de ventilación y filtrado de una CC.NN.

El ensayo de eficiencia de los filtros de carbón activo de los sistemas de ventilación y filtrado de las centrales nucleares u otras instalaciones radiológicas, son imprescindibles para el correcto funcionamiento de dichos sistemas. Evite la liberación de partículas radiactivas al ambiente, no solo exterior a dichas instalaciones, sino en sus propios sistemas internos de ventilación.

#### 2.1.5.1.1 Resumen del ensayo

Los ensayos de eficiencia tienen como objetivo fundamental determinar la eficacia de los hechos adsorbentes, en lo que respecta a la capacidad de

retención de las distintas formas químicas en la que se puede encontrar el yodo radiactivo, u otro contaminante radiológico que se encuentre en una central nuclear u instalación radiactiva.

Servirá también para terminar la penetrabilidad de dicho isotopos, para determinar la eficacia de los distintos carbones activados, y para realizar cuantas operaciones de investigación y desarrollo se consideran oportunas.

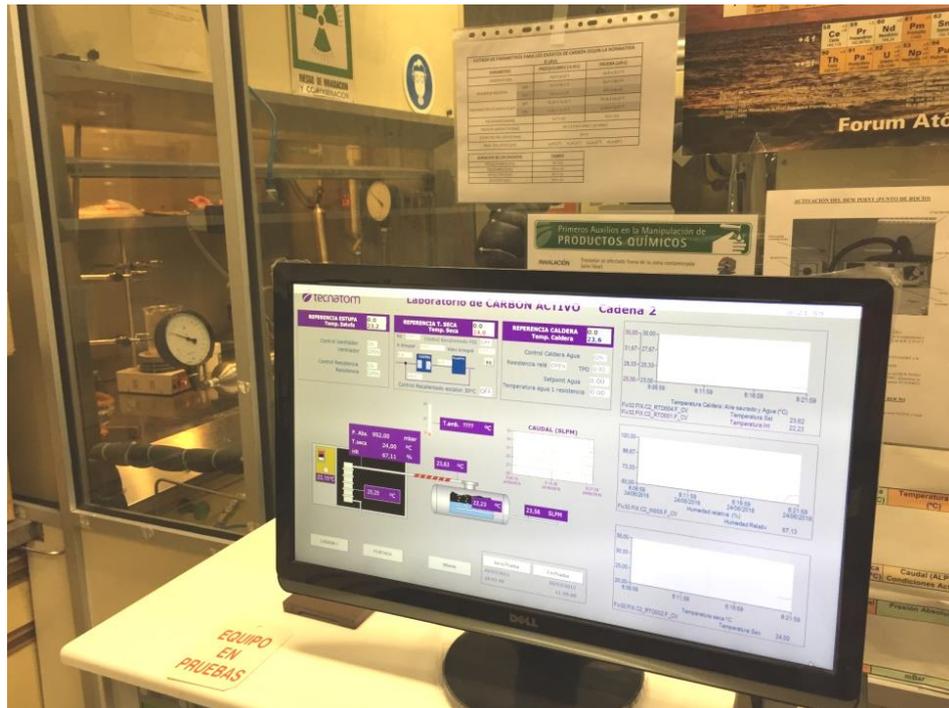
El carbón activado a ensayar se expone a un caudal de aire y vapor de agua, en unas condiciones de velocidad, temperatura, humedad y presión, que puedan representar la situación de accidente en una central nuclear.

Para ello se dispondrá de un sistema donde se instalará la maqueta del lecho de adsorción del carbón activo, y se pueda simular la corriente de aire húmedo y potencialmente contaminado (condiciones de accidente) a la que se tendría que enfrentar dicho sistema de filtrado de una central nuclear o instalación radiactiva.

El tiempo de exposición a dichas condiciones será el establecido en la norma que aplique, que siempre tienen como objetivo que el carbón activo tenga una exposición suficiente para alcanzar un estado de equilibrio y homogeneidad en la muestra a ensayar.

Aunque el ensayo de eficiencia del carbón activo puede variar en función de la norma que aplique, aunque las normas más modernas coinciden en la estructura del ensayo (pudiendo variar sus condiciones y tiempo de duración). La estructura del ensayo es la siguiente: [4]

- Previo al ensayo:
  - Contaje de la actividad de la muestra a ensayar: para realizar el cálculo final de penetración del trazador, hay que conocer la actividad previa al ensayo tanto del carbón muestra como del carbón de respaldo.
  - Inicialización del sistema y verificación de correcto funcionamiento: tras la verificación se procede a indicar los parámetros del ensayo en los dispositivos de control.



*Ilustración 19 CPU de control, vitrina de gases al fondo, fuente (TECNATOM)*

- Estructura del ensayo:
  - Pre-equilibrio: periodo en el que el sistema va adquiriendo los parámetros finales del ensayo, es el periodo con mayor tolerancia.
  - Equilibrio: período en el que el sistema ya ha adquirido los parámetros finales del ensayo. Este período debe de estar minuciosamente controlado ya que debe ser muy preciso, tolerancia mínima.
  - Inyección: tras haber pasado el tiempo establecido de exposición, se realiza la inyección del trazador en la corriente de aire húmedo.
  - Elución: tras finalizar la inyección, período de tiempo en el que el carbón sigue estando sometido a las duras condiciones del equilibrio, para permitir que el trazador se asiente en el lecho de carbón.
- Después del ensayo:
  - Finalización de registro de datos del ensayo: dichos datos se analizarán posteriormente para ver que el ensayo se ha realizado de forma correcta

- desmontaje de la maqueta: la maqueta una vez aislada de la corriente de aire húmedo del sistema como se puede extraer el del horno para su desmontaje y extracción del carbón.
- Pesaje de las muestras del carbón: para analizar la variación de peso de las muestras debido a la humedad (ganancia o pérdida), se pesa por profundidad del hecho el carbón.
- Contaje del carbón: una vez procesado el carbón en sus recipientes herméticos, se pasa a analizar la actividad, o bien específica del trazador que se ha inyectado, o bien de actividad total, que tiene esa muestra.
- Cálculo y análisis: una vez que se ha contado la actividad de todo el lecho de carbón, tanto de muestra como de respaldo se procede a realizar los cálculos de penetración del trazador. Además se realizan el análisis de los diferentes parámetros del ensayo como para verificar que se ha realizado correctamente.
- Certificado: finalmente con los cálculos y análisis realizados como se procede a realizar el certificado que se emitirá al cliente.

Alcanzado el equilibrio se inyecta el trazador, en una concentración y actividad determinada que suele indicar la norma. Hay que indicar que hay que calcular que, para cada ensayo, se utilice la cantidad mínima posible de trazador que sea compatible con la sensibilidad tanto del ensayo como de los equipos de medida.

La corriente de aire húmedo, y en el momento de la inyección como el trazador radiactivo, se hace pasar por el canister o maqueta a ensayar. Esta maqueta dispondrá lógicamente del carbón a ensayar, además de un carbón de respaldo que evitará la liberación del trazador radiactivo al ambiente en caso de que consiga penetrar el carbón a ensayar. Se entiende que el carbón de respaldo es un carbón de características ya comprobadas, teniendo sobre todo una alta capacidad de adsorción.

Tras inyectar el trazador, se mantiene el paso de aire húmedo en las mismas condiciones, para permitir que dé del todo la adsorción.

Al finalizar la prueba, se extrae la maqueta. Al desmontar la maqueta se ha de extraer el carbón a ensayar y el carbón de respaldo, Dicho carbón se ha de almacenar en botes estancos para proceder a su medida de actividad.

La penetración del trazador se conoce teniendo los datos de la actividad original tanto del carbón a probar como del carbón de respaldo, y la actividad de los mismos carbones después del ensayo.

Por la naturaleza del ensayo, es importante destacar que se considera un ensayo destructivo, bien por la actividad que adsorbe el carbón, y que, por seguridad, no se va a regenerar, como por la degradación que puede sufrir al ser expuesto a temperaturas y humedades elevadas.

#### 2.1.5.1.2 Normativa aplicable

Esta técnica está recogida en numerosas normas (las principales, ASTM 3803, KTA 3606, RDT-I-16). Como análisis superficial:

- RDT-I-16: americana, ya obsoleta para la mayor parte de CC.NN., pocas siguen empleándola. Se centra en ensayos sencillos, de corta duración, y con un precalentamiento.

Se considera obsoleto ya que ese precalentamiento provoca una regeneración del carbón, falseando la medida, y pudiendo provocar la desorción de contaminantes provenientes de planta

- ASTM 3803: americana, sin duda la más completa. Desarrolla el método de forma muy concisa, favoreciendo la intercomparación de resultados, y la repetibilidad de los ensayos.

Provee de toda la información necesario para la realización del ensayo, aunque suele requerir que el diseño de los sistemas de filtrado de la C.N. se realice según normativa americana.

- KTA 3606: alemana, muy flexible. Mientras se cumplan unos parámetros básicos, y el lecho de carbón sea homólogo al de planta, el ensayo es válido.

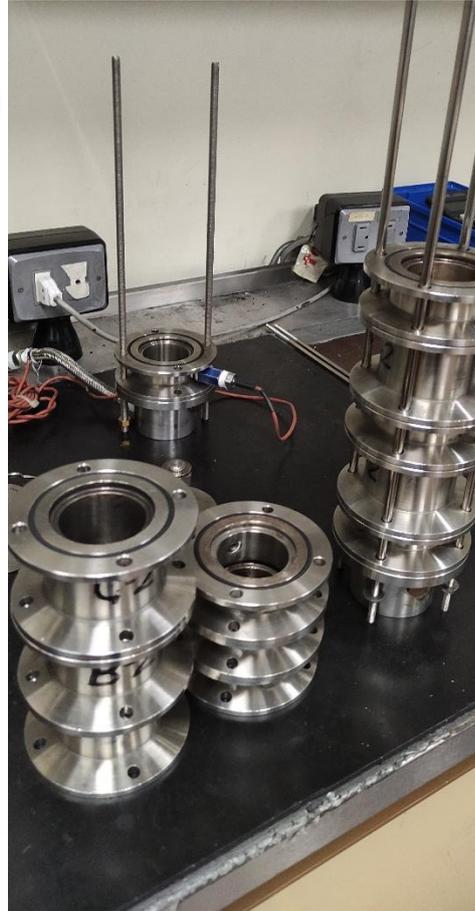
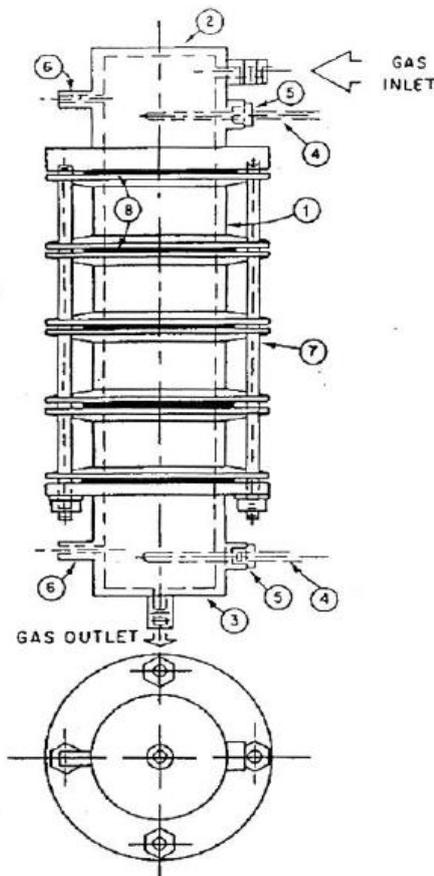
También introduce otro criterio de aceptación del carbón, factor  $K$ , por lo que, en ese aspecto, es más restrictiva.

#### 2.1.5.1.3 Resumen del ensayo

Aunque se acaba de ver que hay diferentes normas que aplican a los ensayos, se va a desarrollar el concepto que hay detrás, que es común para todas ellas. Se ha mencionado antes, que el objetivo de un ensayo de eficiencia es determinar la capacidad de adsorción de un carbón activo. El método, de forma simplificada, es el siguiente:

Se dispone de una maqueta homóloga al sistema de ventilación y filtrado de la C.N., es decir, un lecho de adsorción. Se monta en un sistema capaz de generar una corriente de aire húmedo a través de la maqueta. Este sistema

simulará las condiciones de accidente nuclear, o condiciones más adversas, a las que se someterá el lecho de adsorción.



*Ilustración 20 Maqueta de ensayo definida en norma ASTM D3803, fuente (TECNATOM)*

Tras exponer el lecho de carbón de la maqueta a unas condiciones concretas, se inyectará (en forma gaseosa) un contaminante radiactivo (o trazador radiactivo, a efectos de ensayo) durante un periodo fijo.

Finalizada la inyección, se deja otro tiempo establecido de reposo, tras la que se analiza la actividad retenida en el lecho.

#### 2.1.5.1.4 Parámetros importantes del ensayo

Lo que tienen en común es que debe de cumplir las condiciones básicas del lecho de adsorción de filtro del que provienen. Como parámetros del ensayo en sí:

- Misma velocidad del flujo: la maqueta del laboratorio tendrá un tamaño muy inferior al del sistema de filtrado de la planta, por lo que su sección será muy inferior. Se ha de regular de tal forma que, la velocidad del caudal de aire húmedo que pasa por la maqueta sea la misma que la del filtro de planta.

A una velocidad muy alta, las partículas tendrán demasiada energía como para quedar adsorbidas.

A una velocidad muy baja, el caudal se volverá laminar, evitando el choque de las partículas con los granos del carbón.

El caudal de ensayo deberá regularse en función de la velocidad el fluido del lecho original, y de la sección del lecho de la maqueta.

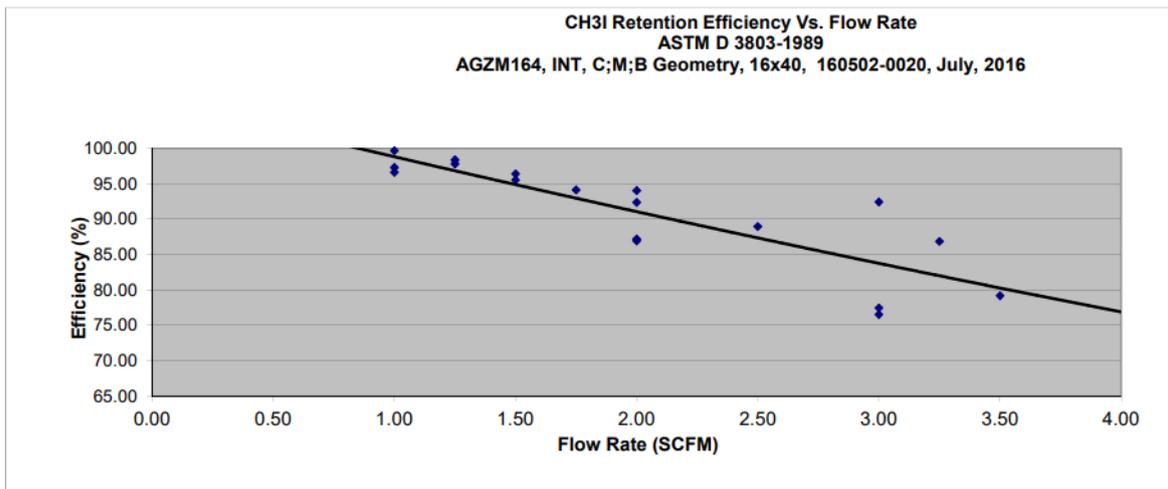


Ilustración 21 Cambio en la eficiencia en función del caudal, fuente (F&J Speciality Products,inc)

- Tiempo de residencia: parámetro fundamental en los lechos de adsorción, cuanto más tiempo pase la partícula contaminante el lecho de adsorción, mayor las probabilidades de que se quede retenida. [5]

Varía en función de la profundidad del lecho de adsorción. La maqueta deberá tener la misma profundidad que el lecho de adsorción original.

- Condiciones termodinámicas del ensayo: el caudal de aire húmedo que pasa por el lecho de adsorción será fijado por la norma, o por los requisitos marcados por el cliente. Suelen ser las condiciones de accidente en las que trabajara el filtro de planta.
  - Temperatura del aire húmedo: suele marcarse en 30°C, pudiendo variar en función de la norma.
  - Humedad relativa: en función de si el sistema tiene baterías calefactoras, o si trabaja en salas húmedas. Suele ser del 70%-95%.

Es un factor muy relevante, ya que una mínima variación de la humedad puede suponer una variación de la eficiencia de retención del contaminante por parte del carbón, sobre todo en humedades muy elevadas. [6]

- Temperatura de la cámara: la temperatura de la cámara imitará la temperatura donde se halla el lecho de adsorción de la C.N. Entre 25°C a 80°C.
- Presión del ensayo: simula la presión de funcionamiento/accidente. Suele tener un rango amplio. Es importante tenerla monitorizada, ya que habrá que elegir una presión de inyección superior (aun así, la inyección se favorece por diseño, aprovechando el efecto *Venturi*) [7].

Esta medida tiene cierto riesgo de fuga del trazador radiactivo al ambiente, se tratará en profundidad en el apartado “Protección radiológica”

- Temperatura ambiental: es la temperatura del laboratorio. Aunque no es una medida del ensayo en sí, afecta a la instrumentación que se utilizará para monitorear/controlar el ensayo.

Afecta al rendimiento de los diferentes componentes, la estabilidad del ensayo, y ayuda a la repetibilidad de este.

En relación con la muestra que se recibe, hay unos parámetros importantes del carbón que hay que conocer:

- Central de origen: proporciona información sobre la tecnología empleada
- Fecha de extracción: a efectos de norma, a partir de la extracción empieza a correr el plazo de análisis.
- Sistema del que proviene: en función del sistema, se aplicarán unas condiciones de ensayo concretas.
- Norma aplicable: la C.N. es quien decide que norma se ha de aplicar para el ensayo. Si es un ensayo nuevo, o la C.N. no lo tiene claro, el personal del L.C.A. podrá decidir que aplicar, en base a los datos anteriores.
- Criterio de aceptación: la norma establece unos criterios de aceptación, pero es decisión de la C.N. cual quiere aplicar (siempre y cuando el consejo de seguridad que aplique lo apruebe).

El laboratorio podrá comunicar la existencia de diferentes criterios de aceptación, aunque no podrá imponerlos.

- Tipo de carbón: si es usado, nuevo o de almacén. El ensayo varía en función.

- Lote del carbón: aunque no es obligatorio, para facilitar el seguimiento de resultados, se suele indicar que carbón está instalado (hay diferentes lotes y proveedores).
- Numero de muestra: los sistemas de filtrado de carbón activo a veces disponen de unos dispositivos mecánicos, que son muestras representativas del carbón del sistema. Hay que indicar que numero sirve para tener un control de cuantos dispositivos quedan, y de la urgencia del ensayo.

Los que no disponen de *canisters*, obtienen el carbón directamente del lecho.

- Peso de la muestra: la muestra de carbón se pesa, para determinar después del ensayo la variación de humedad. Se desarrollará en “Resultado del ensayo”.

#### 2.1.5.1.5 Instrumentación para el ensayo

Al ser el ensayo que, con mucha diferencia, más se realiza en el L.C.A., y también por ser el más complejo, es el que más instrumental tiene.

Además, hay que recordar que estos ensayos, tienen duración muy diferente en función de la norma que aplique. Los más cortos tienen una duración de 5 horas y los más largos pueden llegar hasta las 21. Si a eso se le suma la cantidad de parámetros que hay que controlar y registrar, la instrumentación que hay que usar es muy numerosa.

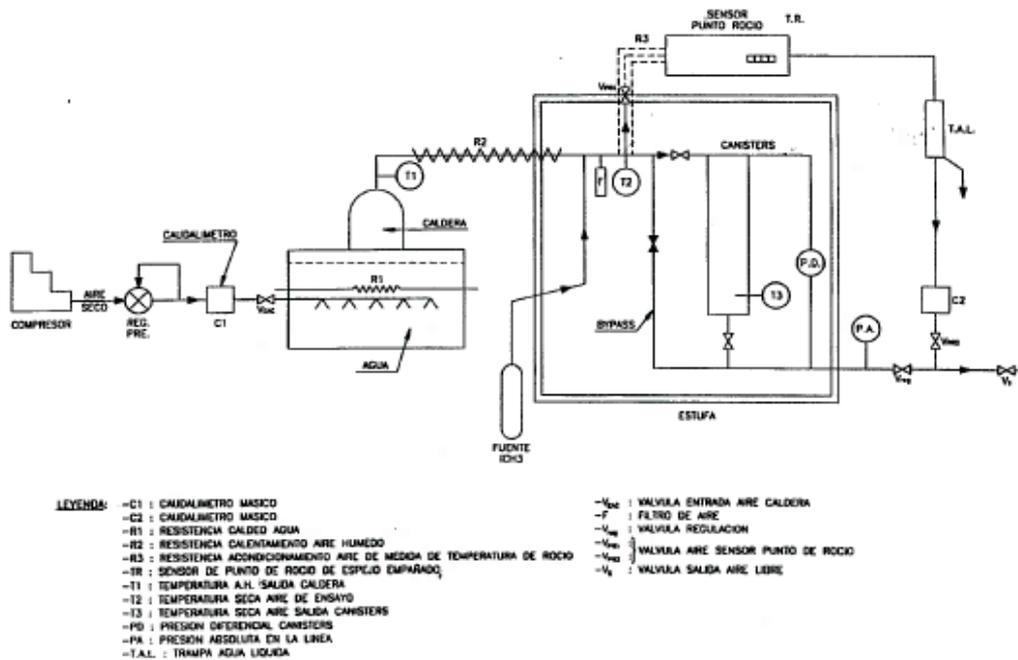


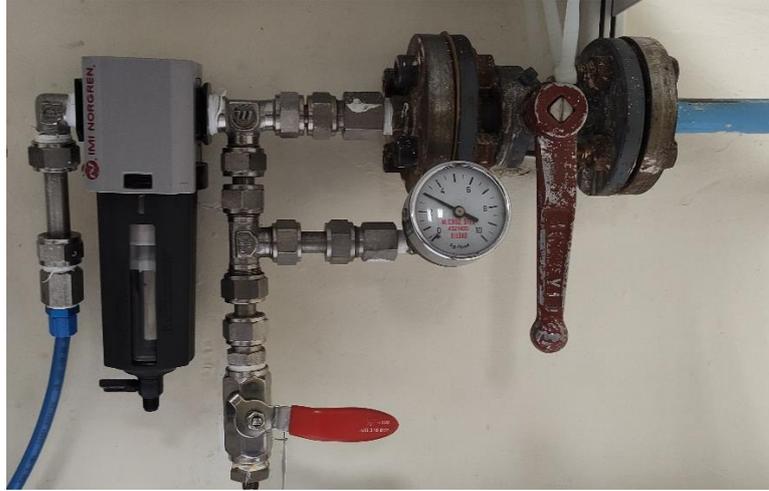
Ilustración 22 Esquema del aparataje del ensayo de eficiencia, fuente (TECNATOM)

- **Tuberías de interconexión:** para montar el sistema que simule el sistema de ventilación y filtrado del lecho de adsorción ubicado en planta, se monta mediante tuberías de interconexión de acero inoxidable. El diámetro tiene que ser tal que permita el caudal correcto de la muestra a ensayar.

Las interconexiones se reducirán al mínimo técnicamente posible coma a fin de reducir la condensación del vapor y del trazador, además de evitar posibles fugas.

- **Compresor:** será el encargado de proveer al laboratorio de carbón activo de aire comprimido. El compresor se encuentra en la sala de maquinas de la empresa, teniendo un sustito de respaldo.

- Filtro de partículas para aire comprimido: filtro del aire comprimido para eliminar cualquier residuo que pueda haber desde el compresor hasta el laboratorio.



*Ilustración 23 línea de presión, y filtro adjunto, del LCA*

- Filtro de carbón activo: se dispondrá también de un lecho de absorción para evitar el paso de posibles contaminantes a la muestra ensayar.
- Saturador/generador de vapor: Se trata de una caldera con resistencias eléctricas en su interior, y varias sondas de temperatura que ayudan a su control. Por un lateral tiene la entrada de aire presurizado, y por la parte superior, la salida del aire ya humedecido.



*Ilustración 24 Generador de vapor, fuente (TECNATOM)*

Además, posee una válvula de seguridad para evitar sobrepresiones que puedan dañar la instalación. Esta válvula de seguridad puede ser un disco de ruptura, o una válvula de alivio.

- Horno de prueba/estufa: se dispone de un horno aislado, con convección forzada, dispone de resistencias calefactoras y un ventilador. Además, dispone de varias sondas de temperatura para su control y monitorización.



*Ilustración 25 Estufa de ensayo*

- Canister de ensayo o lecho de prueba y respaldo: también se puede conocer como maqueta; son los aparatos utilizados como soporte de los lechos de prueba y de respaldo. Son de acero inoxidable, con juntas tóricas, resistentes a altas temperaturas. Estas juntas tienen como objeto de conseguir un sellado efectivo y evitar fugas del trazador al exterior.

Esta maqueta, donde se encuentra el carbón a ensayar, es un lecho de adsorción homólogo al sistema de filtrado de carbón activo de donde proviene la muestra; salvo por una pequeña peculiaridad: se le añade un pequeño lecho de carbón nuevo, que servirá de respaldo para evitar el escape del trazador radiactivo, en caso de que el carbón a ensayar no sea capaz de adsorber todo el contaminante.

Como ya se ha mencionado antes, el canister puede variar de geometría en función de la norma, aunque su estructura básica y materiales sean iguales, para resistir las condiciones del ensayo y evitar fugas.

- Condensador: se dispone de un condensador con capacidad suficiente para condensar toda el agua que haya podido arrastrar el aire durante el ensayo.

Se trata de un cilindro de acero inoxidable, fuera del horno de prueba coma donde su temperatura es más baja y se puede recoger el precipitado que pueda haber.

- Equipos de medida y control: el sistema dispone de una amplia variedad de instrumentos para medir y controlar las variables que intervienen en el proceso. Este sistema se compone de un PLC conectado a un ordenador con un display donde se muestran los parámetros de monitorización y control. Este sistema también es capaz de registrar los diferentes parámetros del ensayo, para su posterior análisis.

Aunque hay diferentes maneras de realizar el ensayo, se detalla a continuación una de ellas.

- Control: elementos que, con su actuación, ayudan a mantener las condiciones del ensayo dentro de los parámetros necesarios.
  - Caudalímetro volumétrico: este dispositivo es capaz de controlar el caudal que entra en el sistema, para mantener estable la velocidad del aire húmedo en el ensayo.
  - Resistencias eléctricas: como mínimo, tiene que haber dos juegos de resistencias: las de la caldera/generador de vapor, y las de la estufa u horno.
  - Ventilador: se trata de la convección forzada del horno de prueba o estufa.
- Monitorización: elementos que con la información que proporciona, permiten manejar los elementos de control, o registrar datos necesarios para el posterior análisis del ensayo.
  - Sondas de temperatura: a lo largo del sistema hay numerosas sondas que proporcionan datos de temperaturas relevantes para el ensayo. Como mínimo, debe haber las siguientes:
    - Temperatura de la caldera: importante para determinar la temperatura del agua y obtener la humedad deseada en la corriente de aire. Mediante estas sondas se controlan las resistencias de la caldera

- Temperatura de la estufa: necesaria para mantener la estufa u horno a la temperatura de ensayo. Mediante estas ondas se controla las resistencias del horno y el ventilador de la convección forzada.
- Temperatura de la corriente del aire: con estas sondas coma se controla que la temperatura de la corriente de aire húmedo es la correcta antes de llegar al lecho de absorción.
  - Transmisor de presión absoluta: necesario para monitorizar la presión del ensayo. También se podría utilizar un transmisor de presión relativa.
- Sistema de recuento de actividad: el sistema de recuento de actividad consta de un detector de cristal de yoduro sódico te 4 por 3 in coma acoplada a un tubo fotomultiplicador coma junto con sus preamplificadores, amplificadores y fuentes de alimentación. Se ha acoplado a un analizador multicanal conectado, a su vez coma a un sistema de lectura e impresión de datos.

Como su nombre indica, el sistema de recuento de actividad sirve para analizar la actividad de un elemento, en este caso, una muestra de carbón activo. Se podrá calibrar de forma específica para poder detectar el contaminante o trazador apropiado, o analizar la actividad total del todo el espectro de energía.

### **2.1.5.2 Ensayos de granulometría**

Los ensayos de granulometría tienen como fin determinar el tamaño de los granos de carbón de un lote. Como es lógico, no hay un tamaño único, sino más bien una distribución de diferentes tamaños, que suelen tener una distribución normal. Un tamaño adecuado del grano es muy importante, y suele venir determinado en las normas.

Si el grano es demasiado grande, se formarán huecos por donde el aire tendrá un paso franco. Si el grano es demasiado pequeño, ofrecerá demasiada resistencia al caudal de aire, pudiendo llevar a sobrecargar un ventilador.

Aunque el tamaño del grano es un parámetro que suele dar el proveedor, el cliente suele pedir un ensayo al L.C.A.

#### **2.1.5.2.1 Resumen del ensayo**

Cada norma fija una manera diferente de hacerlo, pero el grueso común es simple [8]:

Partiendo de una cantidad conocida y significativa de carbón activo, esta es colocada en la parte superior de la serie de tamices patrón, recogándose en cada tamiz la cantidad de carbón activo retenido en el mismo.

Dicho tamiz es en realidad un juego de tamices, siendo el primero el más grueso y el último el más fino. Mediante una tamizadora, (o dispositivo capaz de generar vibraciones), se vibra el tamiz con el carbón en la parte superior de él. Tras un tiempo establecido separa la vibración coma y se verifica cuánto carbón ha quedado en cada tamiz pesándolo.



*Ilustración 26 Tamizadora y tamices homologados, fuente (TECNATOM)*

Para verificar que el ensayo se ha hecho correctamente, se repite varias veces con una misma muestra. Es importante indicar, que la muestra que se recoge debe ser de la parte intermedia del lecho, ya que, por el funcionamiento normal del sistema, los granos más finos suelen acabar depositados en el fondo.

Es importante indicar que este ensayo solamente evalúa el tamaño del grano de carbón, pero no es capaz de identificar el área superficial del grano, lo cual se hará mediante un ensayo de eficiencia del carbón activo.

#### 2.1.5.2.2 Instrumentación de la granulometría

Ya se ha adelantado algo de la instrumentación que se usará:

- Tamizadora/vibradora: maquina sobre la cual se colocan los tamices asegurados, para someterlos a una vibración constante.
- Tamices o filtros: son los diferentes tamices o rejillas que realizarán el filtrado por tamaño de los diferentes granos del carbón.
- Cronómetro: aunque parezca obvio, es necesario tener controlado el tiempo al cual se está sometiendo el tamiz a vibración.

### **2.1.5.3 Ensayo de autoignición**

Como ya se ha mencionado antes el tener toneladas de carbón es un gran riesgo en caso de incendio, Todo cuando en caso de accidente nuclear se sabe que la temperatura ambiental aumenta muchísimo.

Además, es normal que los lechos de adsorción de los sistemas de ventilación y filtrado de las centrales nucleares tengan baterías calefactoras, para reducir la cantidad de humedad que pasa por el lecho, ya que la humedad estropea bastante la capacidad de absorción. Aunque la utilidad de las baterías calefactoras no se puede negar, implica un posible riesgo de incendio en el lecho de carbón activo.

Por ello, se elabora un ensayo para verificar el punto de autoignición del carbón.

#### **2.1.5.3.1 Resumen del ensayo**

Para el ensayo de autoignición, se dispondrá de una cantidad suficiente de carbón activo para realizar varios ensayos. Este ensayo comprende en tener el carbón de muestra introducido en una cámara estanca, salvo por 3 pequeñas penetraciones:

- Penetración para la sonda temperatura
- Penetración para conexión a botella de nitrógeno
- Penetración para válvula de alivio

Esta cámara estará sobre un soporte adecuado para ella, donde estarán ubicadas unas resistencias eléctricas a modo de manta-cinta calefactora que irá calentando el recipiente con el carbón.

Se irá aumentando la temperatura a modo de escalón, y se mantendrá un tiempo fijado por la norma en cada escalón de temperatura. En el momento en el que se observe un aumento súbito de la temperatura, se sabrá que se ha producido la autoignición del carbón. En ese momento, mediante la segunda penetración en la cual se ha conectado una botella de nitrógeno, se inyectará el

nitrógeno para de privar de oxígeno al carbón, mientras ligeramente se va abriendo una pequeña válvula para dar alivio.

#### 2.1.5.3.2 Instrumentación del ensayo de autoignición

Como se ha comentado previamente la instrumentación necesaria para el ensayo es:

- Cámara estanca con penetraciones: en su interior se pondrá la muestra de carbón activo. Las penetraciones son para el resto de instrumentación que hay que instalar.



*Ilustración 27 Cámara estanca para ensayo de autoignición*

- Sonda de temperatura: la sonda de temperatura estará en contacto con el carbón y tendrá un indicador fuera de la cámara donde se podrá leer la temperatura. La sonda tendrá que ser resistente pues se va a someter a altas temperaturas punto.
- Botella de nitrógeno: el nitrógeno es necesario para evacuar todo el oxígeno que hay en la cámara y evitar la combustión del carbón una vez se haya comprobado su autoignición.
- Válvula de alivio: podrá ser automática tarada a la presión de prueba, o admitida por la Cámara, o podrá ser una válvula de accionamiento manual.
- Resistencias eléctricas o cinta calefactora: fuente de calor para la Cámara. Tendrá la potencia necesaria para alcanzar el punto de autoignición que puede llegar por encima de los 250°C.

## 2.2 INSTALACIÓN RADIATIVA

### 2.2.1 Radionucleido

Para los ensayos ya se ha mencionado que se va a utilizar el trazador o radionucleido I-131. Los datos característicos son los siguientes:

#### 2.2.1.1 Características I-131

El I-131 se obtiene por fisión de uranio 235 en un reactor nuclear. El yodo 131 tiene un periodo de semidesintegración de 8,02 días. Al desintegrarse, decae a xénon 131, el cual es estable, emitiendo radiación gamma con energías de: [9]  
[10]

- 365 keV (81,7%)
- 637 keV (7,2%)
- 284 keV (6,1%)
- Radiaciones beta de energía máxima de 606 keV.
- Constante de tasa de exposición: 2,2 R/h y mCi a 1 cm.
- [11]Coeficiente de atenuación lineal para el plomo: 2,530 cm<sup>-1</sup>
- HVL del I-131:
  - Plomo: 3mm
  - Hormigón: 4cm
  - Acero: 3,6 cm (para emisiones de 511keV) [12]
- Constante de tasa de exposición [9] T [(mSv/h)/MBq]: 7,647\*10<sup>-5</sup>
- $\mu$  en cm<sup>-1</sup>: 2,409

Como resumen, se puede decir del radionucleido I-131:

- Su desintegración es mediante desintegración beta, importante para el análisis del blindaje.
- Al desintegrarse, emite radiación gamma, igualmente, importante para análisis de blindaje.
- Su periodo de semidesintegración es de 8,02 días, importante para su tratamiento como residuo.
- La radiación gamma se produce en diferentes canales de energía, aunque mayoritariamente en uno en concreto (365 keV, al 81,7%). Esto

será de utilidad a la hora de contar o detectar el trazador en las muestras de carbón activo.

- El producto de la desintegración es xenón estable, el cual no es nocivo.

### 2.2.1.2 Espectrometría carbón activo con I-131

Se ha desarrollado las principales del radionucleido I-131, en los siguientes espectros se pueden observar diferentes parámetros antes mencionados, para ayudar a su comprensión:

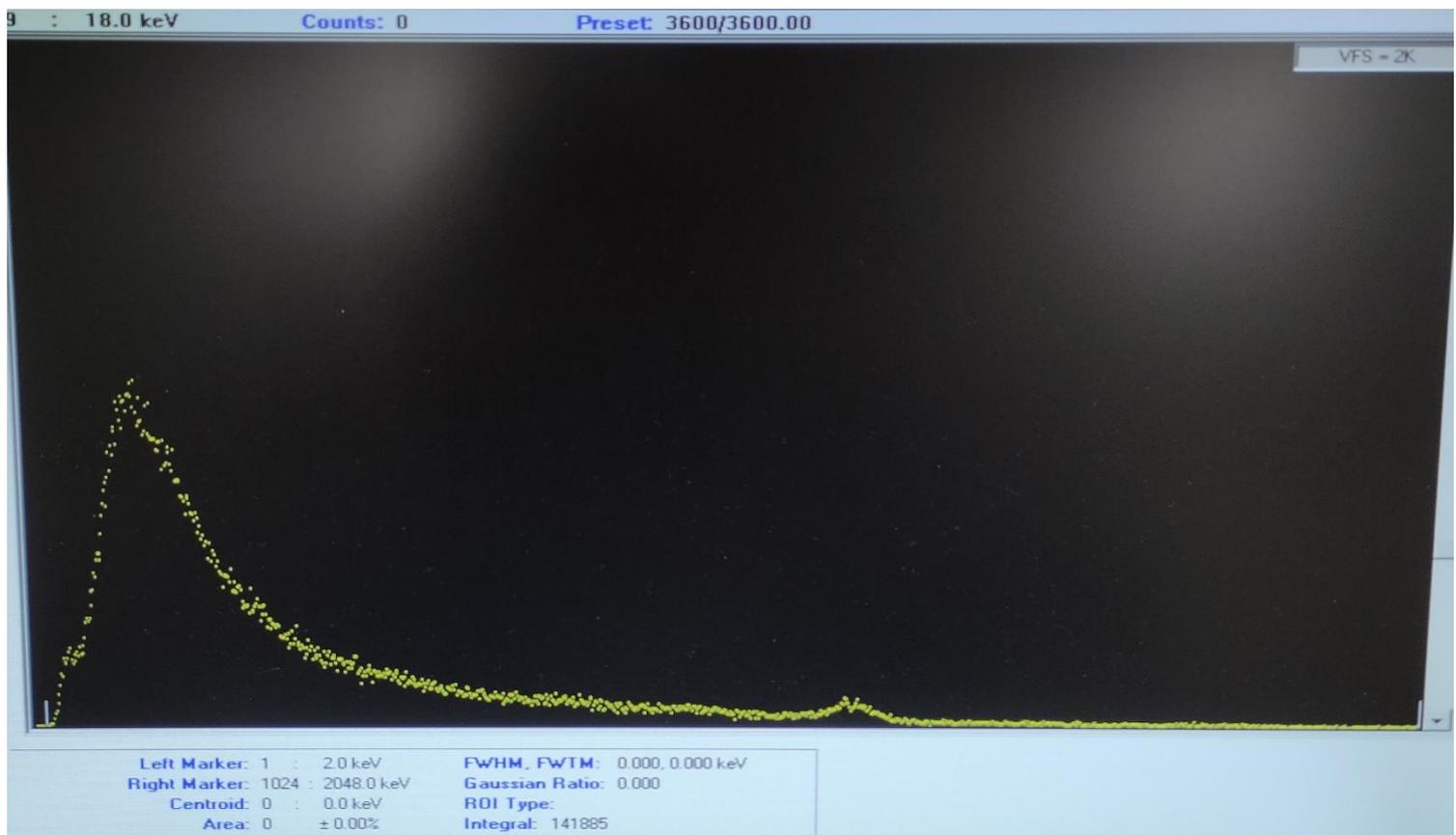


Ilustración 28 Espectrometría de carbón activo con actividad natural, fuente (TECNATOM)

Como se puede observar en la espectrometría del carbón con actividad normal, siempre presenta el mismo espectro, con los mismos picos de actividad natural.

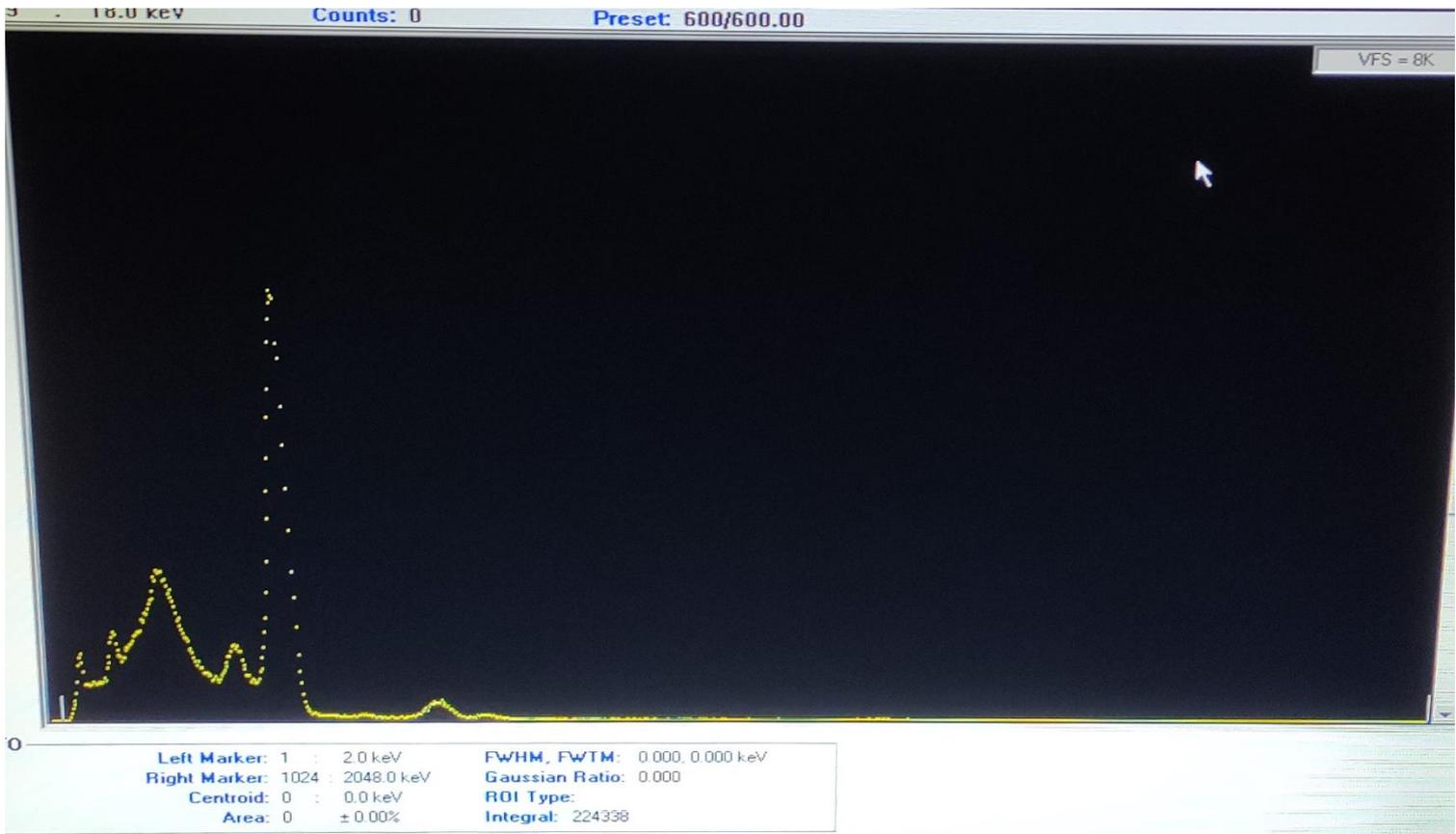


Ilustración 29 Espectrometría del carbón con yodo

El segundo espectro es el mismo carbón, tras un ensayo de eficiencia de carbón activo. Como se puede apreciar, hay una notable diferencia dentro de los dos espectros, ya que el segundo está alterado por la presencia de I-131.

Si refrescamos los canales de energía donde se ubica la radiación gamma:

- 365 keV (81,7%), el pico más predominante.
- 637 keV (7,2%)
- 284 keV (6,1%)

Y teniendo un pico beta de energía máxima a 606 keV, el último pico apreciable.

## 2.2.2 Yoduro de metilo

Salvo casos muy excepcionales, el trazador a emplear será yoduro de metilo marcado con I-131. El yoduro de metilo es un líquido incoloro, que vira a

marrón por la exposición a la luz y humedad. Se evapora a 20°C, por lo que guardará en un recipiente de acero inoxidable. [13]

El yoduro de metilo será el trazador empleado en los sectores de eficiencia de carbón activo, como ya se ha mencionado son los más numerosos en la instalación. Por la actividad radiológica del trazador, y teniendo en cuenta que el I-131 tiene un período de semidesintegración de 8 días, El yoduro de metilo tiene una vida útil máxima de 30 días.

Así que, bien sea porque ha llegado el límite de su vida útil, o porque nivel de ensayos agotado la existencia física del trazador, se necesita disponer de yoduro de metilo constantemente, por lo que una parte importante de la instalación será la elaboración de la reacción química para su obtención a partir del INa marcado con I-131.

### ***2.2.2.1 Reacción de obtención de yoduro de metilo***

Para la obtención del yoduro de metilo, se realizará una reacción con el INa marcado con I-131, cuyo producto destilado es el yoduro de metilo, marcado con I-131. La operación se puede resumir como una reacción, seguida de una destilación simple.

El producto de dicha reacción será el yoduro de metilo marcado con I-131. Se almacena en unos depósitos de acero inoxidable cilíndricos.

Dicho proceso es, desde el punto de vista radiológico, el proceso más peligroso, ya que involucra los siguientes pasos:

#### **2.2.2.1.1 Manipulación de la cápsula de INa**

La cápsula viene en un recipiente que actúa de blindaje. La primera fase de reacción es abrir dicha cápsula para liberar el yoduro sódico, e introducirlo en un matraz de reacción (el encapsulado se desecha para que no participen la reacción). El riesgo de contaminación ambiental y superficial es muy elevado, ya que el yoduro sódico viene en forma de polvo.

El personal que intervenga poseerá de todos los equipos de protección necesarios, incluido protección respiratoria con filtro adecuado para su protección. Además, el sistema de ventilación y filtrado estará arrancado en todo momento. También es necesario que el personal disponga de la licencia de operador de instalaciones radiactivas, especialidad en fuentes no encapsuladas.



*Ilustración 30 Blindaje donde se aloja el INa marcado*



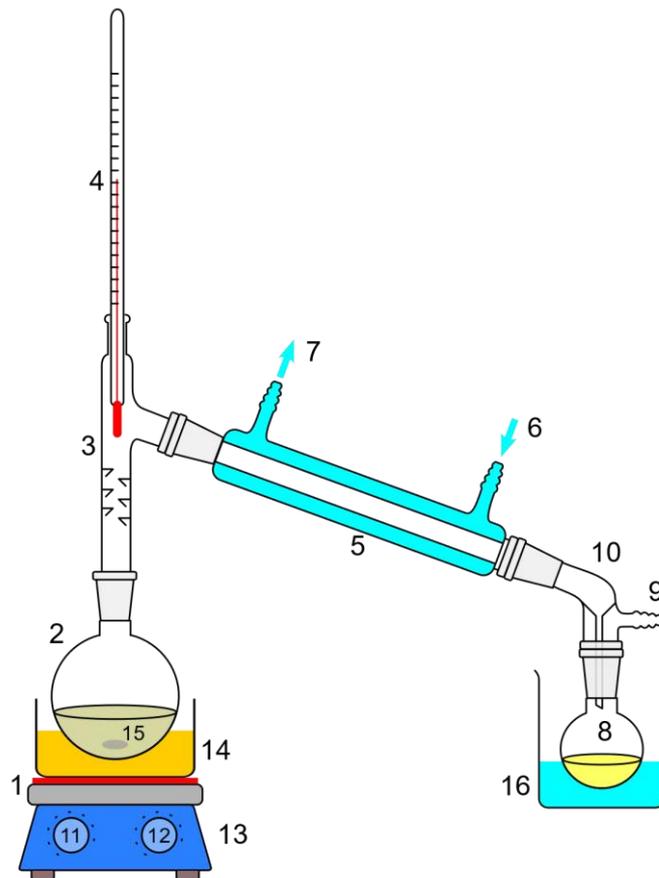
[14]

*Ilustración 31 Gragea tipo donde viene encapsulado el INa*

### 2.2.2.1.2 Reacción química/destilación simple

El momento de la reacción no involucra tanto peligro, ya que el operador apenas tiene que manipular nada. La solución de la reacción es liquida, y su producto gaseoso, por lo que su manipulación aun requiere de máscara de gases. Existe peligro de contaminación interna (inhalación de los vapores la reacción), y de contaminación superficial, en caso de accidente en el que el matraz se caiga, derramando su contenido.

En todo momento, el destilado, yoduro de metilo, debe ser refrigerado, para evitar su evaporación.



*Ilustración 32 Diagrama de destilación simple*

### 2.2.2.1.3 Manipulación del producto de la destilación

El producto de la destilación se recoge en una ampolla de cristal, que estará en todo momento refrigerada. Este producto, yoduro de metilo marcado con I-131, estará en estado líquido, pudiendo evaporarse si aumenta su temperatura. En esta fase, los operadores deberán sellar la cápsula para que quede hermética.

Este proceso entraña un alto riesgo de contaminación interna y externa, al tener que manipular la ampolla existe el riesgo de caída y rotura de la cápsula, produciendo una contaminación superficial, y por su evaporación, ambiental. El uso de protección respiratoria con filtro de gases es obligatorio.

Hay que recordar que durante todo el proceso la obtención del trazador, el sistema de ventilación infiltrado debe estar arrancado y en funcionamiento.

#### 2.2.2.1.3.1 Almacenaje, y presurización del cilindro de reacción

Una vez sellada la ampolla con el yoduro de metilo, se debe de introducir en su cilindro correspondiente. Tras cerrar el cilindro se debe de realizar una prueba de presurización (con nitrógeno seco) y de estanqueidad, para asegurar que no hay fugas hacia el exterior. Durante este proceso, se ha de verificar con un contaminómetro que la cápsula no se ha roto.

Si tras cumplir el periodo de prueba de estanqueidad, la presión del cilindro no ha bajado, se considera que está hermético, procediendo a la ruptura de la cápsula para la liberación del yoduro de metilo. El yoduro de metilo pasará a estado gaseoso, expandiéndose por todo el cilindro. En este momento como se podrá comprobar con el contaminómetro la ruptura de la cápsula como ya que la actividad estará repartida por todo el cilindro.

#### 2.2.2.2 Descontaminación

Es inevitable que los instrumentos empleados en la reacción-destilación se contaminen, al igual que parte del vestuario. Su limpieza se realizará en la vitrina de gases, empleando materiales comprimibles como papel, ayudándose con alcohol.

El beneficio de emplear el I-131 es que su periodo de semidesintegración es de 8 días, perdiendo más del 90% de su actividad en 28 días. El material contaminado se irá chequeando y eliminando como residuo normal, cuando no se detecte actividad.

### 2.2.2.3 Protección radiológica de los operadores

El personal del laboratorio dispondrá en todo momento de los equipos de protección necesarios para esta operación, además de elementos de protección radiológica, DLDs y TLDs, obligatorios para evaluar la dosis recibida por el personal de la instalación.



Ilustración 33 TLD, y DLD (izq. a dcha.), fuente (TECNATOM)

Una vez finalizada toda la reacción y descontaminación de elementos, los operadores que hayan participado se chequearán, primero, con un contaminómetro, y posteriormente en los denominados pórticos beta/gamma, capaces de detectar contaminación superficial.

Posteriormente, procederán a evaluar la existencia de contaminación interna, en un pórtico tipo *Quicky*.



[15]



*Ilustración 35 Estela García, Quicky de TECNATOM*

*Ilustración 34 Portico de detección beta, fuente (catalogo Canberra)*

#### **2.2.2.4 Conclusión**

El proceso de la obtención del trazador es el radiológicamente más delicado, el trazador se encuentra en tres fases diferentes (sólido, líquido, gaseoso), lo cual dificulta su gestión. Además, las operaciones de descontaminación son habituales, por lo que hay que extremar las precauciones.

Para estas operaciones, es necesario ser trabajador expuesto categoría A, y disponer de la licencia de “operador de instalaciones radiactivas: especialidad en fuentes no encapsuladas”.

### **2.2.3 Actividad de la instalación**

#### **2.2.3.1 Solicitud de ampliación de actividad**

La actual autorización de explotación de la instalación permite una actividad máxima de 1mCi, y este proyecto busca ampliar dicha actualización a los mCi. Eso implica que todos los cálculos que se realizan tienen en cuenta la actividad máxima de 2mCi. Aun así, se va a demostrar que, por la metodología de trabajo que se va a emplear, la actividad del laboratorio no superará los 1,6mCi.

### 2.2.3.2 Justificación

La actividad máxima por autorización sería de 2mCi. Pero, como ya se ha explicado en el apartado de “Yoduro de metilo”.

- Por la naturaleza radiactiva del trazador, el yoduro de metilo tiene una fecha de “caducidad”, en la cual ya no tiene actividad.
- La obtención del trazador se realiza mediante una reacción/destilación, proceso complejo.
- La instalación dispone de dos cilindros de reacción, donde se almacena el trazador.

De aquí se han extraído las siguientes conclusiones:

- Por las dimensiones de la instalación, realizar dos reacciones a la vez es complicado, por el espacio limitado de la vitrina de gases. De realizarse, las probabilidades de accidente aumentan.
- Al tener el trazador un tiempo limitado de vida, no es una buena practica la obtención de mucha cantidad, ya que se desperdiciaría mucha actividad.

Tras analizar estas circunstancias, y el ritmo de ensayos del laboratorio, se ha decidido distanciar una semana las dos reacciones de obtención del trazador. De esta manera, se mantiene la seguridad durante la reacción, y se amplía el tiempo del que el LCA dispone de trazador para los ensayos.

Realizando una simulación:

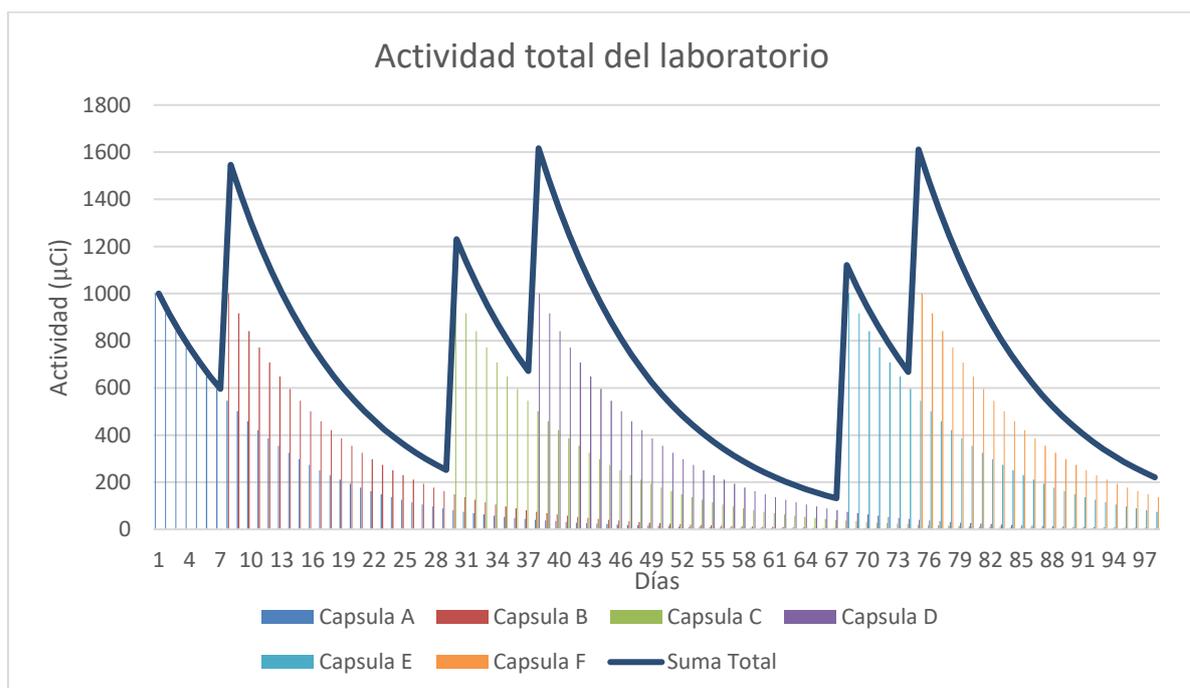
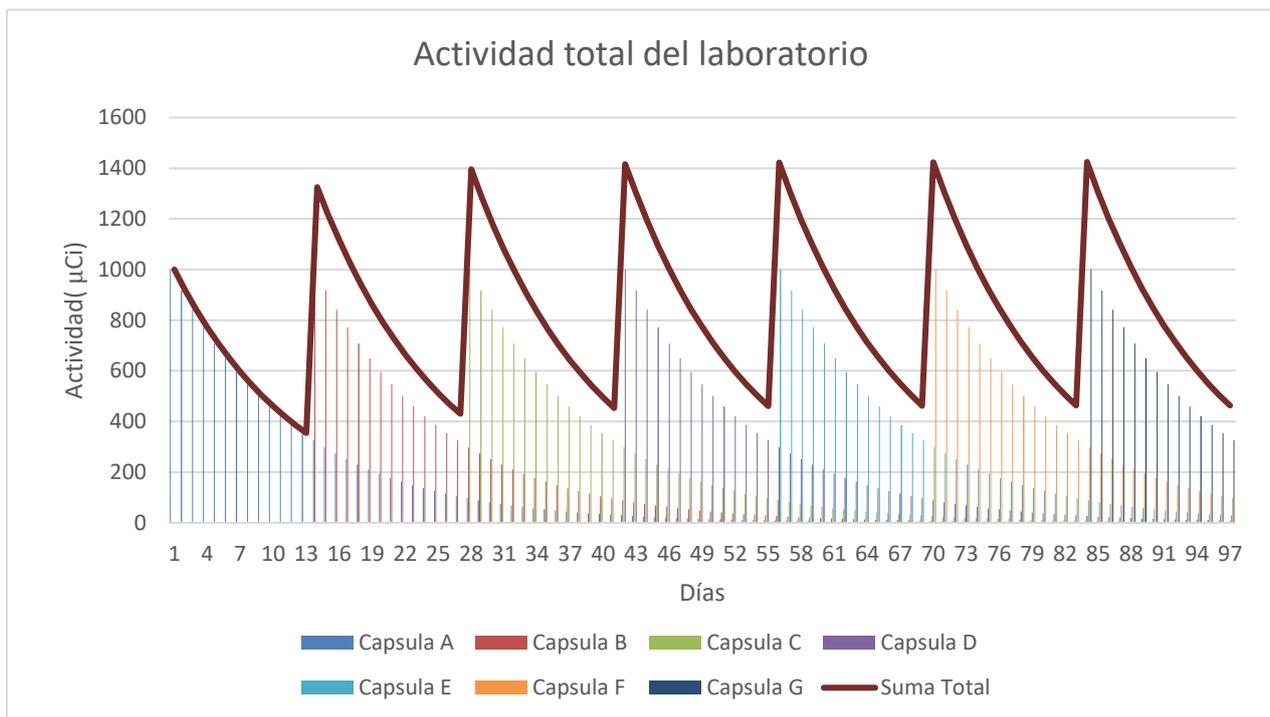


Ilustración 36 Actividad del laboratorio con procedimiento optimizado

Se puede observar que la actividad máxima que se daría en el laboratorio es de 1,616mCi, un 19,2% menor.

Aunque el dimensionamiento de la instalación se hará para 2mCi, reduce mucho la hipotética dosis recibida por los trabajadores en caso de escape, al igual que la recibida durante las operaciones en zona controlada. En resumen, reduce el riesgo por radiaciones ionizantes.

Se ha planteado un plan alternativo, de solicitar una capsula de I-131 cada dos semanas, lo cual reduciría la actividad operacional a 1,424mCi.



*Ilustración 37 Actividad total del laboratorio con procedimiento alternativo*

Se opta por el procedimiento optimizado, por facilitar la gestión interdepartamental dentro de TECNATOM. En los procesos de reacción, se recibe apoyo principalmente por parte de PR, departamento que se ha pronunciado a favor del procedimiento optimizado.

## 2.2.4 Blindaje

El I-131 es un fuerte emisor de partículas beta negativa, y radiación gamma. Por ello, deberá estudiarse la necesidad de emplear blindajes.

### 2.2.4.1 Introducción al diseño de blindajes

Cuando se habla de blindajes, se hace referencia a una estructura, formada por unos materiales concretos, geometrías adecuadas, y espesor determinado,

cuyo objetivo es atenuar la radiación emitida por una fuente radiactiva [1] (un simul muy básico es el del escudo y las flechas, o un chaleco antibalas y un proyectil).

$$\frac{I(x)}{I_0} = e^{-\mu \cdot x}$$

Su principal objetivo es la protección del personal que, por motivos justificados, se ha de exponer a una fuente radiactiva de forma continuada, o de alta actividad. También se emplean para la protección de equipos sensibles a la radiación, como las vasijas de reactores nucleares.

#### **2.2.4.2 Blindaje para el yoduro de metilo con I-131**

##### 2.2.4.2.1 Elección de recipientes para yoduro de metilo

El proveedor de la fuente de I-131 proporciona un blindaje de plomo para su transporte, pero una vez realizada la reacción para obtener el yoduro de metilo marcado con I-131, hay que almacenarlo y blindarlo. La idea es simple, el mismo recipiente o contenedor debe actuar como blindaje. Como el recipiente poseerá un gas presurizado, máximo 15 bares, y debe ser resistente a la corrosión, se elige el acero tipo 304.

Como recipiente, dos cilindros de dicho material, de 3,8 litros de capacidad, y con un espesor de la pared de 6 mm.

Además, se añade un cilindro más pequeño, o cilindro de dilución, del mismo material, pero menor volumen, siendo este de 1 litro, y un espesor de pared de 5mm.

##### 2.2.4.2.2 Justificación de la elección

Mediante un cálculo simplificado, se puede demostrar que los recipientes metálicos son blindaje suficiente para proteger al personal del LCA.

La solicitud de licencia de la instalación es de 2mCi de actividad, de I-131. Eso es una actividad de 74MBq. Se considera que el total de la actividad es puntual (está repartida entre tres cilindros, residuos de ensayos, residuos de reacción).

Si la tasa de exposición del I-131 es  $7,647 \cdot 10^{-5}$  mSv/h por MBq a 1 m [9], se puede calcular la radiación que emitiría la fuente "puntual"

$$7,647 \cdot 10^{-5} \frac{mSv}{h} * \frac{m^2}{MBq} * 74MBq = 0.0056588 \frac{mSv}{h} * m^2$$

Sabemos que, para considerarse zona vigilada, la tasa de dosis debe ser igual o superior a  $3\mu\text{Sv/hora}$  (reglamento salud). Para zona controlada la tasa de dosis debe de ser igual o superior a  $10\mu\text{Sv/hora}$ .

Los cilindros y los residuos, es decir, la actividad del laboratorio, se va a ubicar en la zona controlada. En el supuesto de una fuente puntual ubicada en la vitrina de gases (donde estará la mayor fuente de actividad, se evalúa que radiación será emitida a una distancia de  $0,5\text{m}$  de dichos cilindros (ya fuera de la vitrina de gases, y por tanto, de zona controlada).

La relación entre distancia y radiación es inversamente proporcional al cuadrado, como se vio en los fundamentos de la radiación [1],

$$\frac{I_A}{I_B} = \frac{d_B^2}{d_A^2}$$
$$\frac{0.0056588\text{mSv} * m}{h} * \frac{1^2}{0,5^2\text{m}} = \frac{0.02263512\text{mSv}}{h} = 22,64\mu\text{Sv/h}$$

La tasa de dosis resultante es superior a la dosis límite de zona controlada  $22,64\mu\text{Sv/h} > 10\mu\text{Sv/h}$ , (considerando que la fuente no está blindada, y que es puntual).

Si el HVL del I-131 para el acero es de  $2,2\text{cm}$  [12], y el HVL del plomo es de  $3\text{mm}$ , la actividad emitida desde dentro del cilindro (de  $6\text{mm}$ ) será de  $16,11\mu\text{Sv/h}$ . Se ha atenuado algo, pero no lo suficiente como para llegar a límites de zona vigilada.

Si al blindaje proporcionado por el cilindro, se le suma una plancha de plomo de  $1\text{cm}$ , la actividad emitida se reduciría a  $2,44\mu\text{Sv/h}$ , por debajo del límite de zona vigilada ( $3\mu\text{Sv/h}$ ).

Por la metodología de trabajo del LCA (ver [“Actividad en la instalación”](#)), la actividad máxima que se puede dar es de 1,6mCi. Repitiendo los cálculos con esta nueva actividad, y manteniendo el resto de los parámetros, se obtiene:

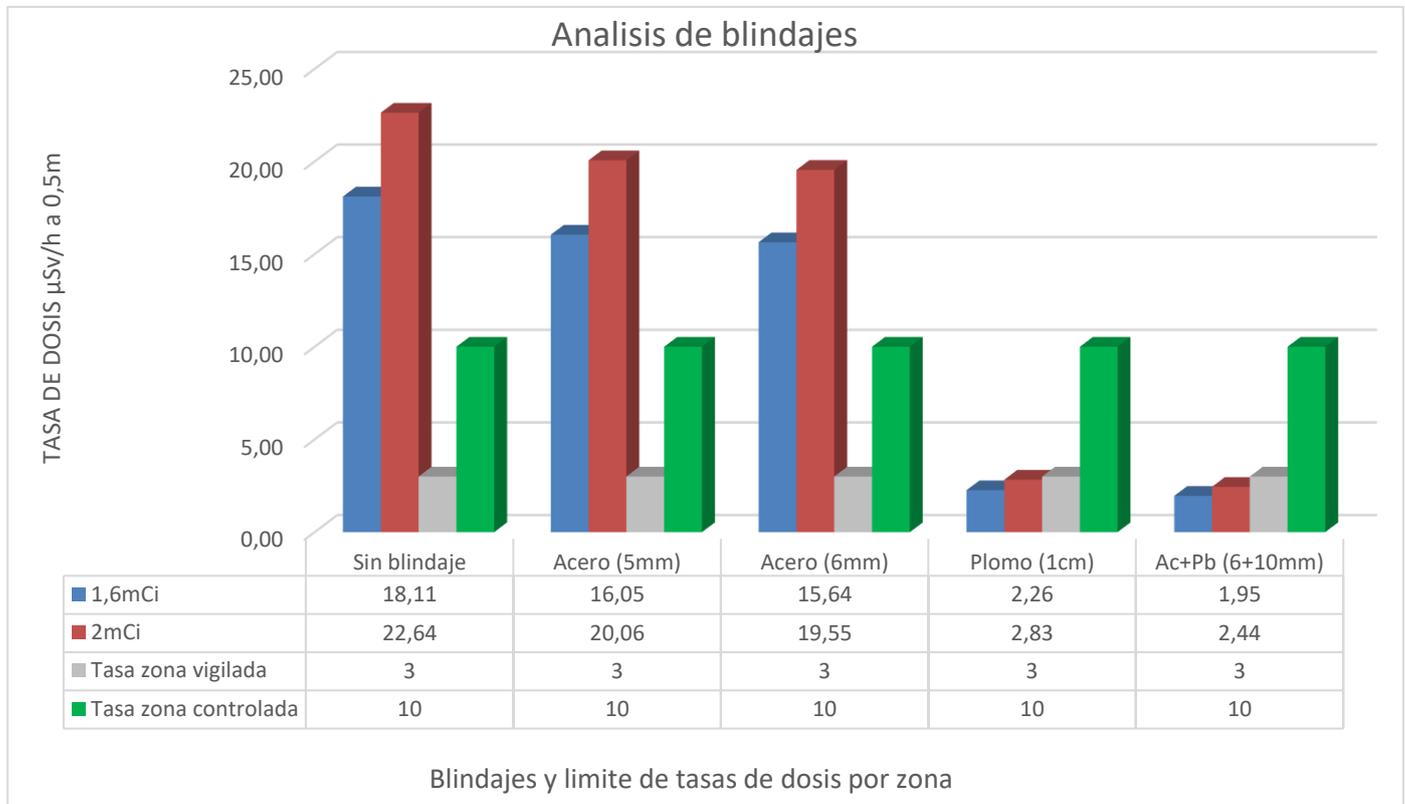


Tabla 6 Analisis de blindaje

Con el propio blindaje de los cilindros no bastaría, y habría que expandir la zona controlada, que actualmente ocupa solo el recinto de la vitrina de gases. Para no cambiar la clasificación de las zonas, se instalarán dos placas de plomo de 1cm de espesor, para blindar la radiación gamma emitida hacia las zonas de operación, dejando sin blindar las zonas colindantes con el exterior (la propia distancia al exterior reduce la dosis emitida).

La zona de residuos (barril estanco de plástico), ubicada en un armario inferior de la vitrina de gases, dispone de una cantidad muy inferior de actividad, aun así, ya dispone de dos planchas de plomo de 6 mm de espesor. En el caso de tener reacciones con muy poco rendimiento, o incluso nulo, el residuo será diluido en agua., y almacenado en dicho barril.

## 2.2.5 Dosimetría del personal del laboratorio

Ya se ha establecido que el personal de la instalación debe ser operador de instalación radiactiva (no confundir con operador del laboratorio), y por ello, personal expuesto a radiaciones ionizantes.

Aplicación	Ocupacional	Público
<b>Dosis efectiva</b>	100 mSv en un período de 5 años oficiales, no superando 50 mSv en un año	1 mSv/año oficial
<b>Dosis equivalente anual en</b>		
Cristalino	150 mSv	15 mSv
Piel	500 mSv	50 mSv
Manos y pies	500 mSv	-----

Aplicación	Ocupacional	Público
<b>Dosis efectiva</b>	100 mSv en un período de 5 años oficiales, no superando 50 mSv en un año	1 mSv/año oficial
<b>Dosis equivalente anual en</b>		
Cristalino	150 mSv	15 mSv
Piel	500 mSv	50 mSv
Manos y pies	500 mSv	-----

Ilustración 38 Limite de dosis, fuente (CSN, Principios de protección radiológica, publicación web)

Por la dosis recibida en las operaciones de la instalación radiactiva del LCA, se podría barajar que el personal fuera personal expuesto de categoría B. Debido a que parte del personal también se desplaza a centrales nucleares, se establece por comodidad de TECNATOM que el personal sea trabajadores expuestos de categoría A (dosis efectiva superior a 6mSv).

En el RD 1029/2022: Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes.

## 2.2.6 Sistema de ventilación y filtrado

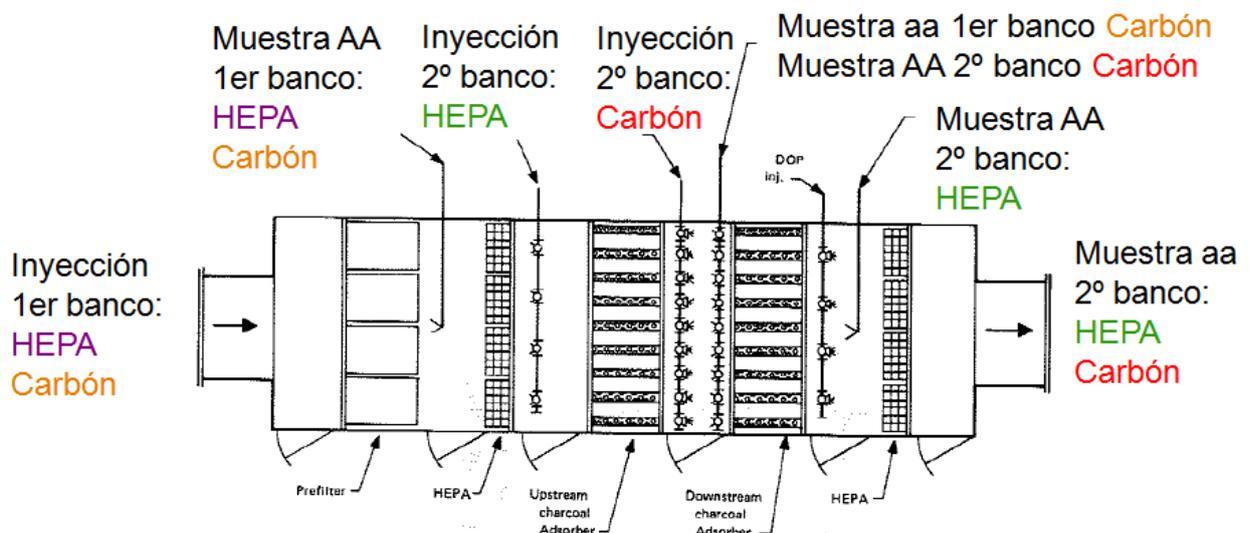
### 2.2.6.1 Estructura del sistema de ventilación y filtrado

La instalación del LCA dispone de un sistema de ventilación y filtrado de clase nuclear. Dicho sistema dispone de:

- Separador de humedad.
- Prefiltro para retener partículas gruesas.
- Banco pre-HEPAs.
- Lecho de carbón activo.
- Banco post-HEPAs.
- Ventilador aguas abajo, para mantener el sistema de presión y evitar fugas al exterior antes de su filtrado.



Ilustración 40 Unidad de ventilación y filtrado de la instalación



GENERAL NOTES

- (a) Injection of DOP/Halide is in inlet duct  
(b) Downstream DOP/Halide sample point may be in outlet duct

Ilustración 39 Esquema de pruebas para el sistema de ventilación y filtrado

### ***2.2.6.2 Pruebas del sistema de ventilación y filtrado***

El sistema, al ser de categoría nuclear, se rige por la misma normativa de los sistemas de planta [4] [16] [17]. Por ello, cada dos años, se hacen las pruebas oportunas, entre las que están:

- Ensayo de eficiencia de carbón activo de su lecho.
- Prueba de fugas de bancos HEPA y de carbón activo.
- Medida de caudal.

Dichas pruebas se realizan por personal interno de TECNATOM.

Tiene un caudal de 1.100m<sup>3</sup>/h, lo que proporciona una renovación total del LCA (150m<sup>3</sup>) cada 8 minutos.

## **3. ESTUDIO DE SEGURIDAD**

### **3.1 Introducción**

Desde el punto de vista radiológico, la instalación es sencilla, ya que por la actividad del laboratorio no hay un riesgo excesivo. El riesgo de la instalación viene por las siguientes circunstancias:

- Riesgo de liberación súbita de la presión en el sistema de alimentación
- Riesgo de liberación de la radiactividad almacenada utilizada en el proceso o considerada como residuo radiactivo
- Riesgo de incendio de los lechos filtrantes, y de quemaduras de los operarios, debido a ensayos que implican altas temperaturas.
- Demás riesgos generales que afectan a cualquier tipo de edificio

#### **3.1.1 Riesgo de liberación súbita de la presión**

Como se describe en la memoria, se dispone de una caldera de vapor, a través de la cual se hace pasar aire comprimido. El sistema de aire comprimido procede de un compresor, el cual llega al laboratorio a través de una canalización. En el laboratorio se dispone de una llave de corte general, para aislar el compresor del resto de la instalación.

Para evitar sobrepresiones, el aire que viene desde el compresor se regula en un cuadro de manorreductores, donde se reducirá la presión de la línea (+/-8 bares) a una presión de funcionamiento de las cadenas (4-6 bares). Los manorreductores son la primera línea en la defensa contra sobrepresiones en el sistema de ensayo. Aun así, se dispondrá de una válvula de seguridad tarada a la presión de la línea del compresor, en caso de que los manorreductores fallen en su función.

Después de los manorreductores se hallan los caudalímetros máxicos; aunque su función principal no sea el control de la presión, debido a su regulación de caudal, cumplen también con ese objetivo.

Hay que añadir que, la presión de funcionamiento de todo el sistema (1bar) es muy inferior a la presión que soporta a las canalizaciones (tubo ASTM A269 135 bares). Como también hay conexiones intermedias y otros elementos tales como el canister o caldera, también se realizará una prueba de presión de hasta una vez y media la presión de diseño de acuerdo con el reglamento

vigente de pruebas de vasijas a presión. Durante el transcurso de esta prueba, se verá las fugas a través del sistema y de informaciones en distintas partes.

De igual forma, se probarán a fuga las juntas que se ha proveerán para el sistema, así como cada una de las válvulas incorporadas, para verificar que, aun soportando la presión, no se producen fugas al exterior, tal y como se indica en el apartado de “verificaciones”.

No obstante, aún en el caso de que se produjese la ruptura súbita de algún componente a presión, el accidente quedaría confinado en el propio laboratorio, en concreto, en la zona vigilada, donde se minimiza el número de trabajos a realizar.

Hay que tener en cuenta que un accidente por sobrepresión no tiene por qué conllevar una liberación de material radiactivo, ya que dicho caso solamente se da durante la inyección del trazador en los ensayos de eficiencia.

### **3.1.2 Riesgo de liberación de radiactividad**

En la instalación solo se manejará el isótopo yodo 131, En forma de solución de yoduro potásico y yoduro de metilo. El yoduro de metilo es volátil, el objetivo es inyectarlo en una corriente de aire húmedo simulando su presencia en la ventilación de una central nuclear, lo cual puede facilitar su escape. También se puede producir derrames de la solución de yoduro sódico, al igual que del yoduro de metilo durante su obtención por reacción.

A continuación, se van a detallar las medidas tomadas para prevenir tales escapes, al igual que los planes de mitigación en el caso improbable de que llegaran a suceder.

#### ***3.1.2.1 Riesgo de derrames y escapes a la recepción***

Como ya se ha indicado, el isótopo se recibe en una cápsula medicinal (polvo o granulado). El transporte recepción de productos se hace de acuerdo con las normas de transporte vigentes, y se efectúan las verificaciones y comprobaciones de acuerdo con lo detallado en [“Verificaciones”](#).

El mayor riesgo de contaminación se da durante la reacción, u obtención del yoduro de metilo. Durante este proceso, como ya se ha explicado, el yodo pasa por diferentes estados (sólido, líquido, gaseoso).

- En caso de desprendimiento sólido, se rociará con una solución acuosa para posteriormente absorberlo con papel. De detectar algún nivel de impregnación (cosa improbable, debido a que los materiales han sido seleccionados para evitar eso), se depositará a carbón activo encima.

- Si el derrame es líquido, la parte volátil será retenida por sistema de ventilación y filtrado, adsorbiéndose en el lecho de carbón activo de alta eficiencia. El yoduro de metilo que se pueda encontrar derramado se absorberá con papel, y en caso de persistir con polvo de carbón activado.
- Si la liberación es puramente gaseosa, el sistema de ventilación y filtrado adsorberá el yodo.

Hay que recordar que estos sucesos, de darse, serían dentro de la vitrina de gases, que al ser de acero evita la impregnación del material radiactivo. Además, al trabajar en la vitrina de gases, el personal tiene la obligación de poseer máscara de gas.

El escape de reactividad al exterior de la vitrina solo puede darse si se produce, de forma simultánea, una avería en el sistema de hermeticidad de la vitrina y en el sistema de ventilación y filtrado. En ningún caso se efectuarán manipulaciones del yodo o yoduro de metilo sin haber comprobado previamente el adecuado funcionamiento de todos los componentes relacionados.

Si aun así se diera el escape de material radiactivo fuera de la vitrina de gases, la contaminación se daría en zona vigilada, donde la pintura y los materiales del suelo están diseñados para evitar la impregnación del contaminante y facilitar la limpieza de una posible contaminación.

### ***3.1.2.2 Riesgos de escapes durante el proceso de ensayo***

durante el proceso de ensayo se puede encontrar el trazador a través de las válvulas que fuguen o fisuras que se hayan podido producir por corrosión u otras causas en el sistema.

Se tomarán todas las medidas posibles para prevenir tales escapes. En primer lugar, el proyecto incluye materiales en todo compatibles con los productos a manejar en las condiciones del experimento. Esta compatibilidad incluye a todos los materiales incorporados a la instalación, así como todos los productos actualizados. El material estructural básico es el acero inoxidable, mientras que los fluidos en su interior son básicamente aire y vapor, además del yoduro de metilo y el yoduro sódico.

Los productos a utilizar no serán corrosivos.

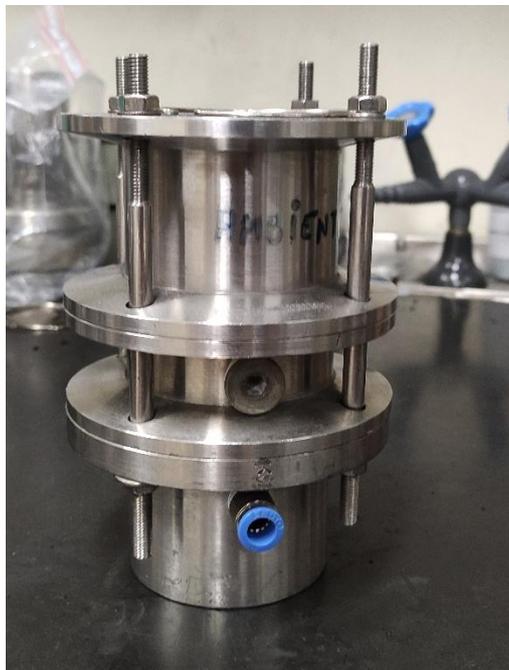
- El yoduro de metilo es un gas muy inerte cuyo comportamiento se ha asimilado al de los gases nobles.
- La solución de yoduro sódico es neutra.

- La mezcla de vapor y aire que se utiliza durante los ensayos tampoco son corrosivas.

Para garantizar la hermeticidad del banco de ensayos, antes de cada prueba se hace una comprobación de la honestidad y buen funcionamiento del aparato, incluyendo la comprobación de fugas a través de los diferentes componentes.

Si a pesar de todas las comprobaciones y verificaciones realizadas, se produjese algún escape de reactividad, ese tendría lugar en la atmósfera de zona vigilada, donde sería extraído a través del sistema de ventilación y filtrado, el cual genera una depresión en el laboratorio favoreciendo la evacuación del aire a través de la vitrina de gases.

Para que el escape se quedará en el laboratorio o se desplazará a otras salas de la empresa, el sistema de ventilación y filtrado no debería de funcionar, situación que se descubriría en la fase de verificación del ensayo, por la cual no se podría realizar este, ya que se ha especificado que no se podrán realizar ensayos si no se dispone del funcionamiento del sistema de ventilación y filtrado. De igual forma, TECNATOM tiene la capacidad de generar un suministro eléctrico estable, en caso de que pierda el suministro eléctrico exterior.



*Ilustración 41 Canister de muestreo ambiental*

### ***3.1.2.3 Riesgos de escape durante el proceso de recuento de actividad en los lechos de ensayo***

Una vez terminado el ensayo, se detiene el caudal de gas de arrastre y se deja enfriar el sistema. Se retira de la estufa la maqueta del lecho de adsorción, o canister de ensayo, para su desmontaje y retirada del carbón para su contaje.

Se traspa el carbón del canister de ensayo a diferentes botes herméticos para su contaje en el espectrómetro gamma. La liberación del trazador durante la manipulación del carbón es altamente improbable, ya que la adsorción es de un muy vínculo muy fuerte. Una vez retenido el yodo 131 en el lecho de carbón, el yodo no se desprende fácilmente. Para ello se requerirían elevadas temperaturas para provocar la regeneración del carbón activo, temperaturas similares a las de un incendio [18].

La probabilidad de que se dé un incendio en el lecho de carbón activo del canister, o maqueta de ensayo, es extraordinariamente remota. Las temperaturas de ensayo más elevadas están muy alejadas de la temperatura de autoignición del carbón. Además, el carbón está sometido a una corriente de aire húmedo, disminuyendo aún más la probabilidad de incendio.

Si aun así, se produjese un incendio, la cantidad máxima del isótopo que se podría liberar, sería de tres décimas de mCi (cantidad máxima permitida para el ensayo). Además, la liberación tendría lugar en el interior de la vitrina de gases, desmontaje del canister de ensayo, o durante el traslado a la sala de contaje, momentos durante los cuales el sistema de ventilación y filtrado está en funcionamiento.

### ***3.1.2.4 Riesgo de escape en el recipiente de residuos***

Una vez que se ha realizado el ensayo de eficiencia de carbón activo, el carbón que ha adsorbido el contaminante se considera un residuo radiactivo. Dicho ensayo se considera un ensayo destructivo, así que el carbón del ensayo, o a partir de ahora, residuo radiactivo, se almacena hasta que se produce el decaimiento asumible del radionucleido, tras el cual se tratará como un residuo peligroso (por el carbón en sí, no por el trazador el cual ya no tiene un nivel de actividad peligroso).

El trazador se encontrará fuertemente unido al adsorbente, y no será desprendible a menos que se le someta a temperaturas elevadas. Por la actividad máxima que se puede dar en el barril donde se almacenan las muestras ensayadas, no es posible que la temperatura se eleve de forma sensible como para producir la desorción del trazador (la desintegración del nucleido produce calor). La única forma la que esto pudiera suceder es si se

diera un incendio en el laboratorio; el calor regeneraría el carbón, liberando la actividad que tiene adsorbida.

### 3.1.2.5 *Riesgo de liberación total de la actividad*

Para que se produjese la liberación total de la actividad contenida en el laboratorio (2mCi por licencia) se deberían de dar los siguientes casos:

- Un incendio que provocará la liberación de la actividad adsorbida en el carbón ensayado.
- Un escape total de los 3 cilindros que contienen yoduro metilo (dos cilindros de reacción y uno de dilución).
- Liberación total de la actividad almacenada en el barril de instrumental contaminado, lo cual solo se puede dar debido a un incendio.

En los 3 casos, el sistema de ventilación y filtrado sería capaz de limpiar la atmósfera del laboratorio, [renovando el aire totalmente cada 8 minutos](#). En el caso más severo, dicho sistema no funcionaría (i.e. corte eléctrico).

Cómo se puede observar, hoy el único accidente que puede provocar la liberación total sería un incendio. Para ello los cilindros deberían de explotar liberando la actividad contenida, lo cual llevaría mucho tiempo, debido a la elección de materiales rígidos, seleccionados expresamente para asegurar la estanqueidad.

Pese a ser un evento extraordinariamente raro, se va a calcular la dosis que podría inhalar un trabajador en caso de escape total.

#### 3.1.2.5.1 Dosis recibida en caso de liberación total de la actividad

La licencia que se solicita al C.S.N. es de 2mCi, así que en el peor de los casos, esa sería la actividad total contenida en el laboratorio. Si se continúa con la hipótesis de caso más desfavorable, toda la actividad del laboratorio estará en forma de yoduro de metilo (se evapora a partir de los 20 °C).

El laboratorio tiene un volumen libre de 150 m<sup>3</sup>.

$$\frac{2mCi}{150m^3} = 0,013 \text{ mCi}/m^3 = 0,493 \text{ MBq}/m^3$$

Si una persona realiza entre 10 y 16 respiraciones por minuto, con un volumen cada vez de medio litro,

$$16 \text{ respiraciones}/\text{min} * 0,5 \text{ litros}/\text{respiración} * 60 \text{ min} = 480 \text{ litros}/\text{hora}$$

Con los coeficientes de dosis por inhalación y factor de ponderación de la tiroides (donde se fija el I-131) [19], se puede evaluar la dosis absorbida efectiva:

Nucleido	Período de semidesintegración	Tipo	Edad ≤ 1 a		Edad	1-2 a	2-7 a	7-12 a	12-17 a	> 17 a
			f <sub>i</sub>	h(g)	f <sub>i</sub>	h(g)	h(g)	h(g)	h(g)	h(g)
I-131	8,04 d	F	1,000	7,2 10 <sup>-8</sup>	1,000	7,2 10 <sup>-8</sup>	3,7 10 <sup>-8</sup>	1,9 10 <sup>-8</sup>	1,1 10 <sup>-8</sup>	7,4 10 <sup>-9</sup>
		M	0,200	2,2 10 <sup>-8</sup>	0,100	1,5 10 <sup>-8</sup>	8,2 10 <sup>-9</sup>	4,7 10 <sup>-9</sup>	3,4 10 <sup>-9</sup>	2,4 10 <sup>-9</sup>
		S	0,020	8,8 10 <sup>-9</sup>	0,010	6,2 10 <sup>-9</sup>	3,5 10 <sup>-9</sup>	2,4 10 <sup>-9</sup>	2,0 10 <sup>-9</sup>	1,6 10 <sup>-9</sup>

Tejido u órgano	Factores de ponderación de los tejidos, wT
Gónadas	0,20
Médula ósea (roja)	0,12
Colon	0,12
Pulmón	0,12
Estómago	0,12
Vejiga	0,05
Mama	0,05
Hígado	0,05
Esófago	0,05
Tiroides	0,05
Piel	0,01
Superficie de los huesos	0,01
Resto del organismo	0,05 (**) (***)

Tabla 7 Coeficiente de dosis por inhalación y factor de ponderación

### Dosis absorbida

$$= \text{Volumen Respirado} * \text{Contaminación ambiental} * \text{Factor de ponderación} * \text{coeficiente por inhalación}$$

$$0,480 \text{ m}^3/\text{h} * 0,493 * 10^6 * \text{Bq}/\text{m}^3 * 0,05 * (2,4 * 10^{-9} \text{ Sv}/\text{Bq}) = 28,42 \text{ } \mu\text{Sv}/\text{h}$$

Por la metodología de trabajo de la instalación, solo habrá 1,6mCi de actividad en la instalación. Si repetimos los cálculos:

$$\text{Dosis absorbida efectiva} = 22,73 \text{ } \mu\text{Sv}/\text{h}$$

Dicha dosis está muy alejada de 1mSv/año que puede recibir personal profesional no expuesto.

### 3.1.3 Riesgo de quemaduras

Tal y como relata la memoria, los ensayos de eficiencia de carbón activo, que son los que emplean un trazador radiactivo, pueden ser de elevada

temperatura, pero en estos casos concretos, los ensayos son de corta duración y siempre están monitorizados por el personal del laboratorio. Otros ensayos que involucran altas temperaturas, como puede ser el ensayo de autoignición del carbón, también son de corta duración y requieren la presencia de operadores.

Con esto se quiere destacar que el riesgo de incendio es mínimo, al haber siempre personal monitorizando estos ensayos.

Que el riesgo de incendios sea mínimo no implica que no exista un riesgo de quemaduras por parte del personal. este caso es especialmente peligroso en la instalación, ya que, si además el accidente conlleva escape de material radiactivo, existiría un camino a través del cual el contaminante podría penetrar en el organismo del operario afectado (a través de la piel dañada).

como ya se ha mencionado, la probabilidad de esta doble contingencia es muy remota, aún así se tomarán las medidas oportunas para evitarlo.

- El personal de explotación de la instalación será adecuadamente entrenado, y será consciente de los riesgos que implican los ensayos con altas temperaturas.
- En los manuales de operación del laboratorio de carbón activo, se indican perfectamente en qué fases y que elementos o instrumentos pueden encontrarse a una elevada temperatura.
- Dichos componentes estarán señalizados con carteles que Indicarán a los operadores del riesgo existente.

Si aun así se produjese alguna quemadura, por las temperaturas empleadas, no sería grave, pudiendo tratarse con primeros auxilios. la instalación dispone de un botiquín con los medios necesarios para el tratamiento y lavado de quemaduras cutáneas, así como para el lavado y descontaminación de estas en caso de posible contaminación (los líquidos de lavado no arrastrarían reactividad de forma significativa). Además, se procedería a un contaje de la actividad de la persona afectada, para evaluar si se ha producido contaminación interna.

aunque el personal del laboratorio está instruido en cómo actuar en caso de algún tipo de emergencia o accidente, estas operaciones serían realizadas por el personal del servicio de protección radiológica de la empresa.

## **3.2 CONCLUSIONES**

Dada la metodología de trabajo de la instalación, se puede afirmar que:

- Con los procedimientos implantados, se detectaría con rapidez cualquier tipo de escape.
- La opción más probable de escape de actividad (durante la fase de inyección del ensayo) está muy mitigada por:
  - La poca actividad empleada, 0,3mCi como máximo.
  - El empleo del sistema de ventilación y filtrado, que genera una depresión en la instalación, arrastrando cualquier fuga.
  - La verificación previa de la estanqueidad del ensayo.
- Como se ha indicado previamente, la actividad máxima que podría quedar en libertad sería, como máximo, la del inventario total de la instalación, que son 2 mCi (suceso extraordinariamente remoto), en cuyo caso los operadores pueden mitigar el accidente durante una hora, recibiendo una dosis muy inferior al límite anual establecido para trabajadores expuestos de categoría A (6mSv/año) [19].

## 4. VERIFICACIONES

### 4.1 Introducción

Tanto en la memoria descriptiva de la instalación con el estudio de seguridad, se han incluido detalles técnicos y análisis de distintos equipos, componentes sistemas, y estructuras De las que constará la instalación.

De acuerdo con los requisitos que establece el CSN para la autorización de funcionamiento de una instalación radiactiva, hay que indicar que verificaciones, pruebas y calibraciones se realizarán en la instalación para su correcto funcionamiento.

Tecnatom, como empresa con gran experiencia y años de recorrido en trabajos del sector nuclear, y con los numerosos laboratorios que dispone, tiene una gran gama de procedimientos internos para garantizar la seguridad así como el correcto funcionamiento de las instalaciones.

Por ello, este apartado está dividido de la siguiente manera:

- Pruebas verificaciones y comprobaciones iniciales: pruebas iniciales necesarias para la puesta en marcha de la instalación
- Pruebas y calibraciones relacionadas con los procesos/ensayos que se realizarán en el laboratorio de carbón activo.
- Verificaciones de carácter periódico: verificaciones y comprobaciones que determinan que se siguen cumpliendo las condiciones iniciales que se dieron en la puesta en marcha de la instalación
- Pruebas y verificaciones relacionadas con la protección radiológica: aquí estarán incluidos los exámenes médicos y controles radiológicos para el personal.

### 4.2 Verificaciones y comprobaciones iniciales

Una vez diseñado y completada la construcción de la instalación, se verificará el correcto funcionamiento de todos sus componentes. Al igual que una vez instalados todos los instrumentos de medida y regulación, se verificará su correcto funcionamiento y su correcta calibración. A su vez, se comprobará el correcto funcionamiento de la instalación en su conjunto.

Para ello, se ha optado por coger como referencia los requisitos descritos en la normativa aplicable a los sistemas de ventilación y filtrado de centrales nucleares de tecnología americana, en concreto, las normas ASME N509, ASME N510 y ASME N511 [16] [17].

- Se comprobará la hermeticidad del banco de pruebas y la ausencia de fugas a través de válvulas y juntas. La norma ASME N 509 [20] determina que la forma de comprobar la hermeticidad de un sistema, es mediante una prueba de estanqueidad realizada a 1,5 veces la presión de operación normal. Para ello, se instalarán dos tomas de prueba, una en cada extremo del sistema,
  - En una toma de prueba, se aportará aire presurizado, mediante una válvula de micro regulación.
  - Por la otra toma de prueba, mediante un manómetro, se tomará la medida de la presión del sistema
  - Las condiciones de ensayo hoy serán a temperatura estándar, y una presión doble la presión normal de operación (1,5 bares).
  - Criterio de aceptación
- Se comprobará el correcto funcionamiento de la vitrina de gases. el caudal de evacuación, extraído por el sistema de ventilación y filtrado, deberá estar comprendido entre 0,5 y 1  $m/s$ .
- Igualmente, se comprobará el correcto funcionamiento del sistema de ventilación y filtrado, empleando la normativa ASME 510. dicha normativa implica la realización de las siguientes pruebas:
  - Medida de caudal: para la correcta filtración del caudal, la velocidad del flujo de aire debe estar en  $1 \pm 10\%$  pero el caudal nominal de la máquina.
- Se calibrarán todos los termómetros, caudalímetros, medidores de presión, balanzas, espectrómetro gamma, de acuerdo con las indicaciones del fabricante, y usando como referencia la norma ASTM D 3803.
- Se comprobará el correcto funcionamiento de los sistemas automatizados de monitorización y control.

## 4.3 VERIFICACIÓN DE PROCESOS

El proceso normal de operación de la instalación consistirá en las siguientes actividades:

- Recepción y almacenaje del isótopo radiactivo I-131
- Preparación de los ensayos de eficiencia de carbón activo, llevando el sistema a las condiciones de presión, temperatura, y humedad de referencia.
- Inyección del trazador radioactivo y realización del ensayo durante el tiempo que previamente se haya especificado.
- Extracción de muestras y recuento de actividad en el lecho de ensayo y lecho de respaldo.
- Eliminación de los lechos medidos (residuo radiactivo).
- Realización de granulometrías, y ensayos de autoignición del carbón.
- Elaboración de reacciones químicas para la obtención del trazador, en su forma necesaria.

Lógicamente, antes de la realización de cualquiera de las actividades anteriormente nombradas, se realizarán las comprobaciones necesarias.

### 4.3.1 Verificaciones en la recepción y almacenamiento del trazador radiactivo

En la recepción del trazador, se verificará

- La documentación sobre el transporte distribución se ajustará para normativa vigente.
- Se medirá el nivel de radiación externa en contacto con la superficie accesible del envase, y a 1 m de distancia, de acuerdo con los requisitos del reglamento de transporte en materia reactivas del OIEA.
- Se realizará un *frotis*, para evaluar la presencia de contaminación externa del paquete, de acuerdo con el mencionado reglamento.

Si todas estas verificaciones son satisfactorias, Tecnatom pasará a ser el responsable del radionucleido. Cuando se extraiga la cápsula con yodo 131 de su envase, se comprobará:

- El nivel de contaminación en el interior del blindaje, para evaluar si ha habido contaminación del desprendible.
- Nivel de contaminación de la superficie externa del blindaje, con el mismo fin.
- Comprobación de que los recipientes contienen las sustancias y documentación necesarias

En caso de que algunas de estas comprobaciones resulten no satisfactorias, se contactará con la empresa de transporte de material radiactivo, para solicitar o bien la documentación que falta o bien la devolución del trazador.

### **4.3.2 Verificaciones previas a un ensayo o series de ensayos**

Antes de cada ensayo, o serie de ensayos, se deberán de realizar las siguientes verificaciones:

- El sistema de ventilación y filtrado del laboratorio funciona de forma correcta, es decir, el caudal y la depresión general en el laboratorio son los necesarios. De no cumplirse no se podrá iniciar el ensayo.
- Los sistemas de automatización y control funcionan de forma correcta: si bien esto no afecta al proceso de inyección, si afectan al resultado del ensayo.
- Para el ensayo de autoignición del carbón, se comprobará que se dispone de todo el material necesario para mitigar cualquier conato de incendio.

### **4.3.3 Verificaciones después de realizado el ensayo**

En los ensayos de eficiencia de carbón activo, tras el ensayo, se verificará que:

- No se han producido contaminaciones anormales en la vitrina de ensayo.
- La cantidad de trazador que se ha inyectado es la correcta.
- Comprobación de contaminación atmosférica.

En caso de que una de estas verificaciones señale un posible problema, se procederá a evacuar el laboratorio, y la revisión del sistema de inyección, previo uso de máscara de gas por parte del operador que ejecute dicha revisión.

En un ensayo de autoignición de carbón se verificará que:

- La temperatura del recipiente de ensayo ha descendido a temperaturas cercanas a la ambiental.

#### **4.3.4 Verificaciones durante la eliminación de las muestras**

##### **contaminadas**

Como ya se ha dicho, tras un ensayo de eficiencia, El carbón ensayado se considera un residuo radiactivo. Con dicho residuo se tomarán las comprobaciones siguientes:

- El recipiente de almacenaje funciona de forma correcta, es decir, su cierre apertura son correctos, además de disponer del blindaje adecuado.
- Los niveles de radiación del recipiente después de depositar las muestras son los adecuados.
- Los niveles de contaminación externa en los alrededores del recipiente son los adecuados.

En caso de que se compruebe del mal funcionamiento del recipiente del residuos, se trasladarán los residuos junto con el aparataje de las reacciones (es decir, a una ubicación con mayor blindaje), y se procederá a la reparación del recipiente.

Si se da el caso de encontrar contaminación superficial en los alrededores del recipiente, se procederá a analizar el por qué, y a la descontaminación con absorbentes, empleando siempre los equipos de protección adecuados (guantes, buzo y protección respiratoria).

#### **4.3.5 Verificaciones de carácter periódico**

Cada seis meses, se realizarán a cabo las siguientes comprobaciones y/o verificaciones:

- Medida del caudal de aire del sistema de ventilación y filtrado del laboratorio.
- Medida de la pérdida de presión en el banco de filtros de carbón activo el sistema de ventilación y filtrado del LCA.
- Comprobación y verificación de los equipos para extinción de incendios.

Cada año, hoy se procederá a una revisión general de la instalación, determinando con minuciosidad el nivel de contaminación del ambiente y de las

superficies de laboratorio. Además, se procederá a realizar un inventario de actividad almacenada en el laboratorio.

Cada 2 años, se realizarán las siguientes comprobaciones:

- Inspección del estado general el sistema de ventilación y filtrado de laboratorio de carbón activo, es decir: [16] [17]
  - Medida de caudal.
  - Medida de pérdida de presión en los bancos de carbón activo, y de filtros HEPA.
  - Delta p del ventilador.
  - Eficiencia del banco del filtro HEPA.
  - Eficiencia del banco del lecho de adsorción de carbón activo.
  - Ensayo de eficiencia de la muestra de carbón activo del lecho del sistema.

Cada 10 años,

- Repetición de las verificaciones necesarias para la puesta en marcha del laboratorio. [17]

#### **4.3.6 Verificaciones del equipo de protección**

Como se ha descrito en la memoria, el LCA está apoyado en el servicio de protección radiológica, y el servicio de prevención de riesgos laborales. una vez al año, los miembros del LCA, junto con personal de PR y PRL, revisaran que se dispone de los equipos siguientes:

- Carteles indicadores.
- Contaminómetros y radiómetros, con la sensibilidad necesaria.
- Dosímetros personales de lectura directa y de termoluminiscencia

Aparte de estas verificaciones puntuales, el servicio de PR, con la periodicidad que establezca la autoridad, realizarán las siguientes comprobaciones:

- Cumplimiento de la normativa vigente de los carteles indicadores
- Calibración de los contaminómetros y radiómetros
- Calibración de los dosímetros de lectura directa, así como la gestión de los dosímetros termoluminiscentes.

- Comprobación de que el servicio de sanidad ambiental del Ministerio de Sanidad y Consumo tiene vigente los certificados de calibración de los aparatos de medida de los dosímetros de termoluminiscencia.
- Junto con el servicio médico, la comprobación de que los historiales médicos y dosimétricos de cada trabajador de la instalación se encuentra el día, y satisface los requisitos del vigente reglamento de protección.

Como resumen, el personal de LCA podrá realizar las labores básicas de protección radiológica del laboratorio, siendo apoyado y supervisado por los responsables de PR y PRL.

Así mismo, el personal del LCA estará formado para el empleo de contaminómetros y radiómetros, siendo el mantenimiento y la calibración de estos responsabilidad de PR.

## **5. PLAN DE EMERGENCIA**

### **5.1 Introducción**

A la hora de desarrollar un plan de emergencia es de vital importancia delimitar a qué va a afectar dicho plan, es decir, en caso de que se produzca una emergencia o un accidente, en este caso, qué parte de la empresa o de las instalaciones se verán afectadas.

La actividad máxima que en un momento determinado se puede encontrar en la instalación se trata de 2 mCi, La actividad máxima que se puede dar durante un ensayo (en caso de que el accidente afecte solamente al aparato del ensayo) es de 3 décimas de mCi.

El escape total de las cantidades anteriores no produciría una situación de emergencia de las instalaciones exteriores de TECNATOM, y muy probablemente la contaminación quedaría confinada en el propio laboratorio, por lo que el plan de emergencia quedará limitado a la propia empresa, y dentro de la empresa al propio laboratorio de carbón activo.

### **5.2 Accidentes radiológicos previsibles**

Una vez se ha visto la actividad que se va a desarrollar en el laboratorio de carbón activo, es más fácil entender qué tipo de accidente o emergencia se puede dar durante la operación de este. Desde el punto de vista radiológico, con independencia de las causas, lo más grave que puede suceder es el escape incontrolado del trazador utilizado (I-131). Dicha circunstancia se puede dar en las siguientes ocasiones:

#### **5.2.1 Recepción y almacenamiento**

El trazador, o mejor dicho, el yodo marcado que se suministra al LCA es entregado al personal del laboratorio en la garita de acceso a la empresa, donde un transporte radiactivo contacta con el operador del laboratorio para entrega documental, y obviamente, del paquete con el trazador.

El paquete deberá recorrer aproximadamente 30 m desde la garita hasta el laboratorio de carbón activo. El paquete viene debidamente protegido, y el operador que los recoja dispondrá de guantes por si se ha dado una contaminación exterior.

El único riesgo posible es la caída del paquete y rotura del blindaje interior donde va la cápsula de I-131, lo cual es altamente improbable.

El riesgo que se puede dar es que el paquete venga contaminado por su procesado, y el paquete no vaya directamente al laboratorio de carbón activo, pudiendo provocar contaminaciones en otras zonas de la empresa.

De darse que el paquete, una vez verificado su estado exterior en el laboratorio, esté contaminación externa, se procederá a evaluar si hay alguna traza de contaminación en el recorrido anteriormente citado.

El trazador, como ya se ha explicado, pasa por diferentes fases. Lógicamente, el riesgo de almacenaje dependerá de su estado:

- Caída cápsula medicinal (polvo): el riesgo es prácticamente nulo ya que cuando está en la capsula medicinal, está situada dentro de un blindaje que a su vez está en una lata protegida dentro de un paquete.
- Manipulación capsula: en el momento de elaborar la reacción, hay que abrir manualmente la cápsula, liberando su contenido en el matraz de reacción. El riesgo puede ser la caída de la cápsula abierta en la campana de gases, derramando su contenido.
- Ampolla de cristal (liquido-gaseoso): momento especialmente peligroso ya que el yodo se encuentra como yoduro de metilo, el cual es gaseoso a temperatura ambiente, pese a estar en forma líquida dentro de la ampolla.
- Derrame accidental de matraz de reacción (liquido gaseoso): dicho matraz contiene la solución líquida de yoduro sódico REACCIÓN

Una vez contemplado los riesgos, las actuaciones serían las siguientes:

- Liberación gaseosa del yodo 131: en el caso más desfavorable, la cápsula que contiene contendrá una actividad máxima de 1 mCi, siendo el volumen de aire máximo que se podría contaminar, de 50 m<sup>3</sup>, el cual es inferior al volumen libre del laboratorio [caso ya contemplado](#).

Como medida de precaución, se procedería a evacuar temporalmente el laboratorio y a esperar que el sistema de filtrado evacúe el aire del laboratorio hasta que se produzca como mínimo una renovación total del aire.

Hay que destacar que el yoduro de metilo es altamente volátil, por lo que en su mayoría sería recogido por el sistema de ventilación y filtrado del laboratorio. Además, para manipular el trazador en estado gaseoso durante la reacción, es obligatorio el uso de protección respiratoria.

- Derrame de la solución: en caso de que durante la reacción, o durante el proceso de limpieza se derramara la solución del matraz de reacción, se procedería inmediatamente a su absorción en papeles y materiales

absorbentes, para lo cual el operador utilizaría guantes y protección respiratoria para su tratamiento.

Dichos absorbentes se almacenarían posteriormente como residuo radiactivo.

- Derrame de polvo: en caso de que, durante la manipulación de la cápsula, se dé una liberación de polvo con el trazador, se procederá a rociarlo con un pulverizador de agua las zonas afectadas, para su posterior absorción con papel o similar. El polvo también puede volatilizarse en el aire, por lo que también se procederá a permitir una renovación total del aire del laboratorio (una vez se haya tratado el residuo en polvo localizable).

De acuerdo con las estipulaciones que figuran en el apartado de “Análisis de blindaje”, la dosis que recibiría el personal sería muy inferior a la máxima previsible para las circunstancias normales de explotación.

### **5.2.2 Liberación de actividad durante el proceso**

se puede dar el caso de que, durante un ensayo, se pierda la hermeticidad del sistema de prueba. La cantidad máxima que se podría liberar sería la correspondiente a un ensayo, la cual está limitada a 3 décimas de mCi. La actividad liberada por esta vía, al estar el sistema de ventilación y filtrado del laboratorio en funcionamiento, nos pasaría por la vitrina de ensayo donde sería extraída retenida en los filtros de dicho sistema.

Para que la radiactividad se propagara a la zona no vigilada del laboratorio requeriría la falla simultánea o sucesiva del sistema de ventilación y la pérdida de hermeticidad del sistema, lo cual se considera altamente improbable.

Incluso en el caso extremo de una liberación total de la actividad de un ensayo, la concentración de contaminantes en el aire del laboratorio sería hasta 5 veces inferior al límite máximo permitido para los trabajadores expuestos profesionalmente.

Aunque no sería necesario evacuar el laboratorio, se llevaría a cabo una evacuación temporal del personal y se procedería a la renovación completa del aire. Posteriormente, se realizaría una verificación del nivel de contaminación residual en el entorno.

### **5.2.3 Liberación de radiactividad del recipiente de residuos**

En el recipiente de residuos radiactivos, la radiactividad está presente en los filtros utilizados en los ensayos. La liberación de los trazadores absorbidos solo puede ocurrir si aumenta la temperatura de los lechos filtrantes o en caso de un incendio.

Se ha establecido que la cantidad máxima almacenada en el recipiente de residuos es de aproximadamente 600 microcurios [21]. En caso de una liberación completa, la contaminación se extendería como máximo a unos 150 m<sup>3</sup> de aire, ante lo cual se procederá a la evacuación del área y la renovación del aire.

En estas circunstancias, se ha previsto poner en funcionamiento el sistema de protección contra incendios. El operador actuará según lo previsto, utilizando guantes y una máscara protectora.

Una vez que se haya controlado la situación de emergencia, se llevarán a cabo las comprobaciones correspondientes y, si es necesario, los procedimientos de descontaminación.

### **5.3 Emergencias de naturaleza no radiológica**

Entre las circunstancias que acaba de explorar figuran inundaciones, fuegos, derrumbamientos de la estructura por terremotos u otras causas, huracanes u otras circunstancias naturales extremas.

Se considera muy poco probable que todas y cada una de dichas circunstancias puedan afectar a la estación relativa de forma catastrófica, ya que se encuentran en el interior de un edificio moderno, que se ha construido de acuerdo con todas las ordenanzas previstas.

- Dispone de un sistema probado de lucha contra incendios
- Su estructura ha sido calculada teniendo en cuenta la sismicidad oficial de la región de Madrid
- También se ha diseñado teniendo en cuenta otras circunstancias naturales extremas como huracanes y tormentas que cabría esperar de la región centro de España

No obstante, y a pesar de la remota posibilidad de un suceso extremo del tipo considerado, la máxima reactividad que se podría liberar sería la máxima prevista en la instalación, es decir 3 mCi, lo que constituye una cantidad insignificante para preocuparse por establecer medidas de precaución para estos casos.

### **5.4 Notificaciones a la autoridad**

A pesar de los bajos riesgos que presenta la instalación y teniendo en cuenta las medidas de emergencia establecidas, es necesario cumplir con las recomendaciones de los organismos internacionales de Energía Atómica, WANO y nuestro propio Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

Por lo tanto, cualquier incidente que ocurra será notificado a las autoridades locales, provinciales, autonómicas y nacionales lo más pronto posible, de acuerdo con los requisitos reglamentarios vigentes. Esta comunicación se realizará con el objetivo de mantener una transparencia total y asegurar la coordinación adecuada en caso de cualquier eventualidad.

## 6. REGLAMENTO FUNCIONAL

### 6.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se van a establecer:

- Las responsabilidades de las diferentes figuras que trabajan o laboran con el LCA. Aunque esté reflejado en los procedimientos internos de TECNATOM, en este proyecto no se van a asociar personas o nombres concretos para cada posición.
- Las operaciones que se realizarán en el laboratorio: aunque se ha hablado del aspecto técnico de los ensayos, las actividades del laboratorio comprenden además las actividades propias de su gestión.
- Garantizar que la operación con el I-131 se realiza de forma correcta, reduciendo al mínimo aceptable el riesgo que implica su manipulación.

Como organigrama de funcionamiento del laboratorio, se tienen las siguientes figuras:

- Jefe de laboratorio: responsable técnico de los ensayos a realizar. Además, es el responsable de velar por el correcto funcionamiento del laboratorio, por lo que estará en contacto estrecho con el personal colaborador de los departamentos que prestan ayuda al LCA (PR, PRL, Servicio Medico, Compras...)
- Operadores: responsables de ejecutar las pruebas y actividades rutinarias de laboratorio, siempre que no manipulen material radiactivo.
- Supervisor de la instalación: disponen de la licencia de supervisor de instalación radiactiva, y velarán por el correcto funcionamiento de la instalación.
- Operadores de la instalación: disponen de la licencia de operador de instalación radiactiva, con la especialidad de manipulación de fuentes no encapsuladas.  
Este personal es el habilitado para todas las operaciones del laboratorio que comprendan ciertos riesgos radiológicos. Por su actividad, serán trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes.
- Colaboradores: pueden prestar ayuda en las actividades de propio laboratorio y de forma puntual, o por tener a otros departamentos cuya colaboración es necesaria para el correcto funcionamiento (PR, PRL...)

Es importante destacar que una persona puede desempeñar más de un rol.

## **6.2 RESPONSABILIDADES**

Se puede diferenciar la responsabilidad de TECNATOM como explotador, y la responsabilidad individual de las diferentes posiciones del personal referido a la instalación radioactiva (supervisores y operadores de la instalación).

### **6.2.1 Responsabilidad del explotador**

1. El explotador será responsable de la seguridad de la instalación y de la protección radiológica del personal. En el caso de TECNATOM, los responsables serán el departamento de PRL y de PR.
2. De prever los Recursos Humanos, técnicos, y económicos necesarios para la correcta operación del LCA.
3. De velar por la correcta operación del LCA, aplicando las medidas necesarias en caso de apreciarse lo contrario.
4. Anualmente, De acuerdo con las normas del LCA, un informe anual sobre la actividad de la instalación, y demás datos requeridos por el C.S.N.
5. De velar por el cumplimiento de la normativa y legislación vigente.
6. De transmitir al personal del laboratorio, todos los requisitos que exigen a TECNATOM como explotador de la instalación.
7. Dar a conocer a todo el personal del laboratorio los datos médicos y dosimétricos que les atañen.

### **6.2.2 Responsabilidad del supervisor de la instalación**

Los supervisores de la instalación serán responsables:

1. De asegurar que la instalación se encuentra en condiciones óptimas para la operación sin riesgo de sus trabajadores y terceras personas.
2. De la correcta aplicación en la instalación de diferentes legislación, normativa y reglamentos, que afecten a la seguridad nuclear y protección radiológica.
3. De llevar al día el diario de operación de la instalación radiactiva, así como redactar el informe anual de la instalación.
4. De recopilar las observaciones y/o recomendaciones de los operadores de la instalación.
5. En caso de emergencia, de llevar a cabo los protocolos marcados, y comunicar la incidencia al director de TECNATOM.
6. También deberá de comunicar al director cualquier incumplimiento de las normas o transgresión de la legislación que haya podido cometer el personal de la instalación.

### **6.2.3 Responsabilidad de los operadores de la instalación**

Los operadores de la instalación serán responsables:

1. Realizar las actividades de la instalación de forma segura y sin riesgo para los propios operadores ni para terceras personas.
2. De cumplir con las normas y legislación que afecten a la instalación.
3. De obedecer las instrucciones del supervisor, siempre y cuando no vayan en contra de normativa o legislación vigente.
4. En caso de accidente o urgencia, notificar la mayor brevedad posible al supervisor.
5. Trasladar al supervisor cualquier incumplimiento de las normas o legislación que se haya podido cometer en la estación, para su pronta reparación.

### **6.2.4 Responsabilidad del personal sin licencia**

El personal sin licencia que colabore o trabaje en la instalación, será responsable de:

1. Conocer y cumplir el reglamento de protección contra las radiaciones ionizantes, y exigir su cumplimiento a los responsables.
2. En caso de accidente, obedecer las directrices que le dé el personal de la instalación.

## **6.3 OPERACIONES DE LA INSTALACIÓN**

Cuando se habla de “operaciones de la instalación”, se habla siempre desde el punto de vista radiológico. Dichas operaciones que se realizan en la instalación se pueden dividir en 3 grandes bloques:

1. Operaciones de la explotación normal de la instalación
2. Operaciones de descontaminación o en zonas contaminadas
3. Operaciones de urgencia

### **6.3.1 Operaciones normales de la instalación**

Como se indica la memoria, las operaciones normales de la instalación son:

1. Recepción del trazador radiactivo.
2. Realización de los ensayos de eficiencia de carbón activo.
3. Eliminación de las muestras ensayadas como residuo radiactivo.

### **6.3.1.1 Recepción del trazador radiactivo**

El supervisor comprobará que los documentos que se entregan cumplen con los requisitos legales, y que coinciden con lo solicitado. Tras verificar la ausencia de contaminación exterior, se procederá a su almacenaje.

### **6.3.1.2 Realización de los ensayos y eficiencia de carbón activo**

Aunque un operador sin licencia puede realizar casi en su totalidad un ensayo de eficiencia carbón activo, no podrá realizar la fase de inyección, en la cual se maneja el yoduro de metilo marcado con I-131.

Además, el operador deberá verificar la instalación antes de un ensayo, es decir:

- Todos los parámetros de monitorización y control son correctos.
- No se aprecia fugas en el sistema de ensayo.
- No se aprecia caída de presión en los recipientes que almacenan el trazador, ni en el cilindro de dilución del trazador.

Durante la inyección, comprobará que no se aprecian fugas en el sistema ni caídas de presión súbitas, además de poder manipular el conjunto de llaves de paso para la correcta inyección.

### **6.3.1.3 Eliminación de las muestras ensayadas como residuo radiactivo**

Una vez realizado el contraste de las muestras ensayadas, se depositará el carbón (o ahora, residuo radiactivo) en el depósito habilitado para ello.

Se medirá la contaminación ambiental en la vitrina de gases, y en la zona vigilada por seguridad. Para ello se empleará una pequeña bomba de aspiración, conectada a un filtro con carbón activo.

Se registrará la actividad empleada en el ensayo en el diario de operaciones, al igual que cualquier tipo de incidencia.

## **6.3.2 Operaciones de descontaminación**

### **6.3.2.1 Contaminación anómala**

En caso de que durante cualquier tipo de operación se detectara contaminación en el ambiente por en alguna superficie, se comunicará la situación a toda la línea jerárquica la autoridad y responsabilidad de la estación. En función del tipo de consideraciones detectadas, se actuará tal y como está reflejado en el "Plan de Emergencia".

Ello implica de forma general, la selección adecuada de equipos de protección, elección correcta del elemento de descontaminación, y evacuación del personal cuya presencia no es necesaria para dicha labor.

La operación de descontaminación solo se dará por concluida cuando los niveles sean equiparables al fondo radiactivo natural. Lógicamente, el material empleado en la descontaminación pasará a ser material contaminado, por lo que se gestionará como tal. Dicha incidencia se anotará en el Diario de Operación, y en colaboración con PR y Servicios Médico, se determinará la dosis interna y externa que haya podido recibir el personal en la intervención.

#### ***6.3.2.2 Contaminación resultado de operación normal***

Hay operaciones que, por su naturaleza, generan contaminación y/o residuos, como puede ser la obtención del yoduro de metilo.

Para dichas ocasiones, la instalación estará perfectamente preparada, siguiendo la filosofía *ALARA*. Se organizarán zonas de paso, se adecuará la protección del personal del laboratorio a las actividades a realizar, se designará un área de residuos generados, y se avisará tanto a PR como a Servicio Médico para que colaboren tanto las tareas de medición y supervisión, como la evaluación de la dosis absorbida por los trabajadores.

#### ***6.3.2.3 Situaciones de urgencia***

En caso de urgencia o accidente que pueda suponer la liberación de gran cantidad de material radiactivo, y por ello la evacuación de la instalación, se procederá tal y como se indica en el “Plan de Emergencia”.

Sin embargo, el personal del laboratorio, antes de la evacuación de la instalación, hará todo lo posible para atenuar la situación.

Tras controlar la emergencia, el supervisor comprobará posible contaminación interna o externa del personal del laboratorio. Tras ello, ofrecerá su apoyo al departamento de PR y PRL por si fuera necesaria su ayuda.



*Ilustración 42 Vitrina de gases*

## 6.4 MEDIDAS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICAS

La instalación se ha diseñado de forma que satisfaga el criterio básico de reducción de dosis del personal de laboratorio, de acuerdo con la filosofía *ALARA*.

Aun así, Se toma las siguientes medidas:

- El personal de la instalación dispone de vestimenta específica de protección.
- El personal dispone de máscaras respiratorias provistas de filtro H.E.P.A. y de carbón activo, para las actividades de mayor riesgo de contaminación interna.
- Se toman las medidas necesarias para reducir al mínimo la dosis externa que puedan recibir los trabajadores por radiación gamma: los residuos están almacenados con blindaje, al igual que el trazador, comprobando que la exposición fuera de zona vigilada está en niveles del fondo natural.



*Ilustración 43 Equipos de protección*

#### **6.4.1.1 Instrumentación de vigilancia radiológica**

Aunque el LCA no dispone de equipos de vigilancia radiológica propios, (salvo el espectrómetro gamma si lo contamos como tal), hoy sí que tiene la formación necesaria para emplear los equipos prestados por el departamento de protección radiológica (PR).

##### 6.4.1.1.1 DLD y TLD

##### Dosímetros de lectura directa y de termoluminiscencia.

En el primero sirve para evaluar la dosis absorbida en tiempo real, aparte de indicar la tasa de dosis de la zona en la que uno está ubicado.

El segundo sirve para llevar a un control dosimétrico oficial.

##### 6.4.1.1.2 Contaminómetros y radiómetros

El contaminómetro es capaz de detectar radiación gamma, por ello tiene gran utilidad para detectar contaminación sobre los objetos.

Este detector de ionización está constituido por un recinto lleno de gas a presión, en el cual hay dos electrodos con una tensión de polarización, creando un campo eléctrico en el interior. El gas en su interior es aislante, por lo que no circula corriente eléctrica entre ambos electrodos. En el momento en el que una partícula ionizante altera el campo eléctrico del gas se originará un impulso de corriente que puede ser medido, indicando la detección de radiación ionizante [1]

El radiómetro es capaz de evaluar tasa de dosis, instrumento muy adecuado para la protección radiológica del laboratorio, pues así se verifica que los blindajes funcionan correctamente y que las zonas están bien clasificadas.



*Ilustración 44 Radiometro y contaminometro n(izq. a dcha.)*

## 7. EQUIPOS

Para los ensayos de granulometría y autoignición, por la naturaleza de los ensayos, se emplearán equipos mecánicos sencillos.

En cambio, los ensayos de eficiencia de carbón activo conllevan el control de numerosos parámetros, vinculados entre sí.

Sin ningún tipo de duda, el ensayo más solicitado por el laboratorio es el de eficiencia de carbón activo, que es a su vez el más complejo que se realiza. Este ensayo afecta directamente para la seguridad de las plantas, y los plazos para realizarlos, por normativa y ETFs, son muy reducidos. Si a esto se le añade que se trata de un ensayo destructivo, hay que minimizar el riesgo de declarar un ensayo nulo.

---

Por todo lo anterior, el laboratorio dispone de 2 líneas de ensayo, que se van a ampliar a 3.

Además, dicho ensayo tiene la misma cultura de seguridad que las centrales nucleares, lo cual implica, que los sistemas se diseñarán con la siguiente filosofía en mente:

- **Compatibilidad:** al disponer de tres cadenas de ensayo, los equipos han de ser versátiles, capaces de comunicarse entre sí, y fáciles de reemplazar.
- **Sencillos:** para facilitar el mantenimiento, y evitar complicaciones.
- **Robustos:** pese a que las condiciones del laboratorio son óptimas (temperatura, humedad, limpieza), son equipos que van a funcionar muchas horas de forma continua.

## 7.1 COMPONENTES DE AUTOMATIZACIÓN Y

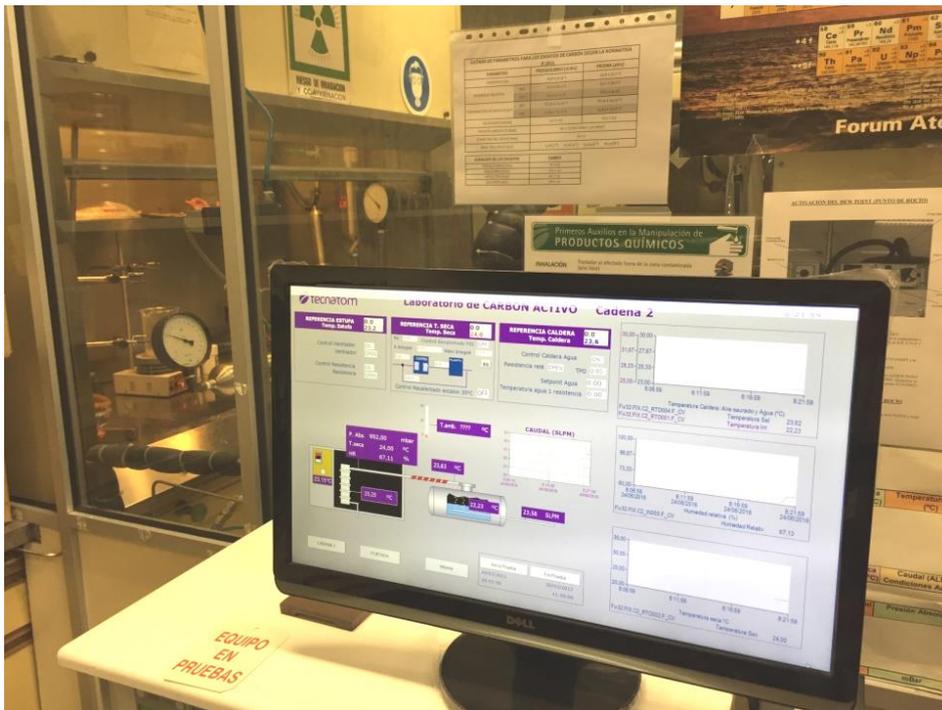
### CONTROL

Se ha descrito en la memoria que los ensayos de eficiencia de carbón activo, requieren de una fuerte presencia de monitorización, control, y automatización, debido a su larga duración.

Se trata de un sistema compuesto por un PLC, y varios actuadores que responden a las diferentes señales que llegan del sistema, todo ello controlado mediante el software SCADA.

Todo ello está controlado desde un puesto de control, situado en la zona de trabajo.

Para garantizar la redundancia de los sistemas, se decide que cada línea de trabajo, o cadena de ensayo, disponga de su propio juego de PLC más componentes.



*Ilustración 45 Sistema de control*

## 7.2 INSTRUMENTACIÓN

### 7.2.1 CAUDALIMETRO MÁSIKO Y/O FLUJOMETROS

En relación con los ensayos, se necesita poder regular y medir el caudal másico que pasa por el cannister.

- **Control:** para los ensayos de eficiencia de carbón activo; el caudal es un factor fundamental. Para ello se ha pensado en controladores de caudal másico térmico. Su respuesta es muy rápida, y pueden trabajar de forma continua con poco desgaste. Disponen de opción de trabajar con un CPU como maestro, o con una controladora multicanal, de la misma marca. Se decide emplear dos controladoras, disponiendo de CPUs de otro departamentos como backup.  
Se elegirá de la marca Brooks/Bronkhorst, muy empleados por TECNATOM, pudiendo poseer repuestos/sustitutos de forma rápida en caso de ser necesario.
- **Medición:** se pueden usar caudalímetros térmicos, pero, al ser solo un componente de verificación, se pueden usar turbinas con señal analógica, o incluso flujómetros con indicación visual.



Ilustración 47 RS: Flujómetro 1-50 l/min

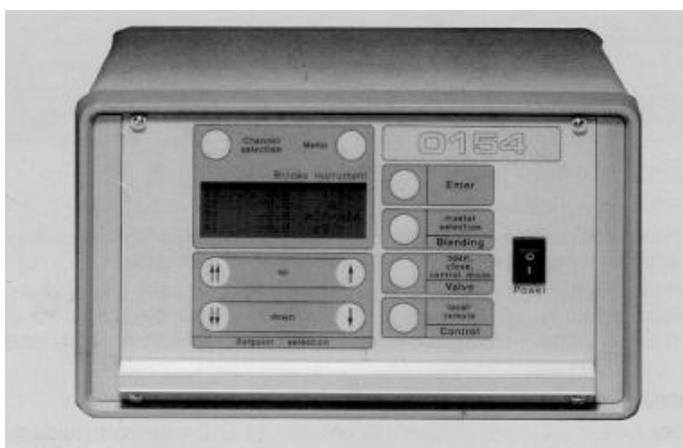


Ilustración 46 Brooks: Controlador de caudal



*Ilustración 48*

*Molbox: turbina de flujo*



*Ilustración 49 Microprocesador  
para caudalímetros Brooks*

### 7.2.2 Fluómetros de inyección

Dada la poca cantidad de yoduro de metilo que hay que emplear durante la inyección, y del amplio margen que permite la norma en la cantidad inyectada, se ha decidido el uso de flujómetros de regulación manual. Son económicos, robustos y fiables.



*Ilustración 50 Dwyer: Flujometro con regulación manual*

### 7.2.3 Manorreductores

La presión proporcionada por el compresor es demasiado elevada para el correcto funcionamiento de los sistemas de ensayo. Para ello, se decide instalar un manorreductor por línea de ensayo.

Como se ha determinado, serán robustos. No requieren de calibración, ya que, con una simple verificación, cumplen correctamente con su función.



*Ilustración 51 Festo: manorreductor 16 bar*

## 7.2.4 Calderas de generación de vapor

Debido a las condiciones específicas y peculiaridades del ensayo, y para la reducción de componentes adicionales que puedan generar fallos, TECNATOM diseñó en su momento dos calderas generadoras de vapor, con resistencias integradas, por lo que solo deberá [fabricar una caldera adicional](#) para la ampliación.

Dichas resistencias estarán controladas desde el PLC de control.

## 7.2.5 Estufas

Para simular las condiciones ambientales de temperatura para el ensayo, se emplean estufas. Dichas estufas pueden disponer de regulación local, ventilador + resistencias eléctricas, aunque se configurarán para trabajar según órdenes del PLC correspondiente. Deben de poder alcanzar temperaturas de hasta 120°C.



*Ilustración 52 Proeti:estufa con control e indicador digital*

## 7.2.6 Manómetros

La inyección del trazador debe realizarse a una presión determinada, así que se ubicarán en las respectivas líneas de presión. Podrían no estar calibrados, pero para evitar problemas de liberación del trazado del ambiente, se van a calibrar.



*Ilustración 53 Wika:  
manómetro analógico para  
inyección*

## 7.2.7 Higrómetros

Uno de los parámetros más importantes en los ensayos de eficiencia de carbón activo es la humedad. Para monitorizarlo se van a emplear higrómetros con transmisor de humedad adicional, para poder insertarlo en la línea de ensayo.

Se busca que la señal de salida sea analógica, para su posterior tratamiento en el PLC correspondiente.



*Ilustración 54 Higrómetro, fuente (Vaisala)*

### 7.2.8 Punto de Rocío

Aunque el sistema ya disponga de higrómetros, su precisión no se ajusta a lo que marca la norma. Por ello, el higrómetro convencional para la función de soporte de medida, pero la regulación se realizará mediante la medida realizada por el equipo medidor de punto de rocío, en concreto, un equipo de punto de rocío mediante espejo enfriado.

Debido a su alta precisión, será uno de los equipos más caros del laboratorio, siendo necesario uno por sistema más uno de respaldo.



*Ilustración 55 MBW: punto de rocío de espejo*

Como ya se ha comentado, se empleará como punto de medida la regulación de la humedad, Es un parámetro importante a la hora de determinar el éxito del ensayo, por lo que deberá disponer de una salida para el registro de datos.

### 7.2.9 Espectrómetro

Para emplear un trazador radiactivo en los ensayos, es necesario un equipo que sea capaz de detectar y cuantificar la cantidad de actividad de una muestra de carbón activo. La norma no especifica qué tipo de equipo es necesario para ello, ya que puede haber contadores brutos de actividad gamma (cuentan toda la actividad sin discriminar los canales de energía de los radionúclidos de la muestra), o espectrómetros gamma (capaces de contabilizar toda la actividad de una muestra y asociarla a un canal de energía concreto).

Aunque sería más económico emplear un contador bruto de actividad gamma, debido a la multitud de pruebas ensayos que hace TECNATOM, y teniendo en cuenta que son equipos de coste elevado, TECNATOM se decantó por un

espectrómetro gamma, al cual otros departamentos pueden dar uso, al ser más completo.

No solo es fundamental para la realización de ensayos, sino que además, colabora en el control radiológico, al poder realizar mediciones de los *frotis* de las superficies de la instalación.

El LCA solo necesitaría calibrar en espectrómetro en actividad, solo nos interesa que sea capaz de evaluar con exactitud la energía de una muestra. Pero, por otras actividades de TECNATOM, también se calibrará en energías, para discriminar que tipo de actividad tenemos, y poder detectar radionucleidos.

Esto hace que el laboratorio obtenga un valor añadido, ya que es capaz de discriminar actividades en muestras ya contaminadas de origen, y con que contaminante.

### **7.2.9.1 Peculiaridades del espectrómetro**

#### 7.2.9.1.1 Temperatura

Debido a la utilización de un cristal de INa, para la captación de energía, se ve altamente afectado por la temperatura a la hora de discriminar canales de energía.

Está dentro de la zona de ensayos, la cual dispone de climatización independiente, para mantener el laboratorio en condiciones ambientales controladas.

#### 7.2.9.1.2 Blindaje

El LCA no es la única instalación radiactiva de TECNATOM, y dada la larga duración de los contajes de las muestras, el fondo de las otras instalaciones puede afectar a la medida.

Por ello, TECNATOM elaboró un blindaje con material sin *fading*



*Ilustración 56 Blindaje de espectrómetro gamma multicanal*

## 8. CONCLUSIONES Y FUTURAS

### LÍNEAS DE TRABAJO

A la conclusión de este proyecto, se concluye que se dispone de todo lo necesario para realizar la solicitud de ampliación, o en definitiva, la solicitud de la nueva estación reactiva, ya que se ha recopilado toda la información que demanda el CSN.

- Se ha realizado la memoria descriptiva de la instalación, indicando cuáles son las operaciones que se van a llevar a cabo en ella.
- Se ha realizado un estudio de seguridad, evaluando todos los riesgos que conlleva la operación normal de la instalación, e incluso alguno extraordinario.
- Se ha elaborado un plan de verificaciones, asegurando que se podrá detectar cualquier fallo a la mayor brevedad posible.
- Se ha establecido un reglamento de funcionamiento: aparte de la larga experiencia del personal del laboratorio, cuya primera licencia fue otorgada en 1984, la filosofía de Cultura de seguridad y de mejora continua de TECNATOM, ha mantenido actualizados los procedimientos de trabajo.
- Se ha establecido el personal necesario y sus cualificaciones.
- Se ha realizado un plan de emergencia interior, donde se dispone de las contingencias necesarias para cualquier tipo de incidencia.

También se ha recopilado el *KNOW-HOW* del laboratorio, pudiendo iniciar el proceso de ampliación y mejora técnica.

Por desgracia, a fecha de presentación de este proyecto, aún está en proceso la obtención de los equipos necesarios para dicha ampliación, además de la reforma estructural necesaria en el laboratorio para alojar dichos componentes.

## 9. ANEXO

El hecho se puede encontrar documentación de la puesta en marcha original de la instalación, de algunas fotografías de la instalación hoy en día.

En el caso del sistema de ventilación y filtrado no ha sido modificado y solamente se ha mantenido.

Y la instalación ha experimentado algún cambio menor en su distribución, pero no ha variado su planta.





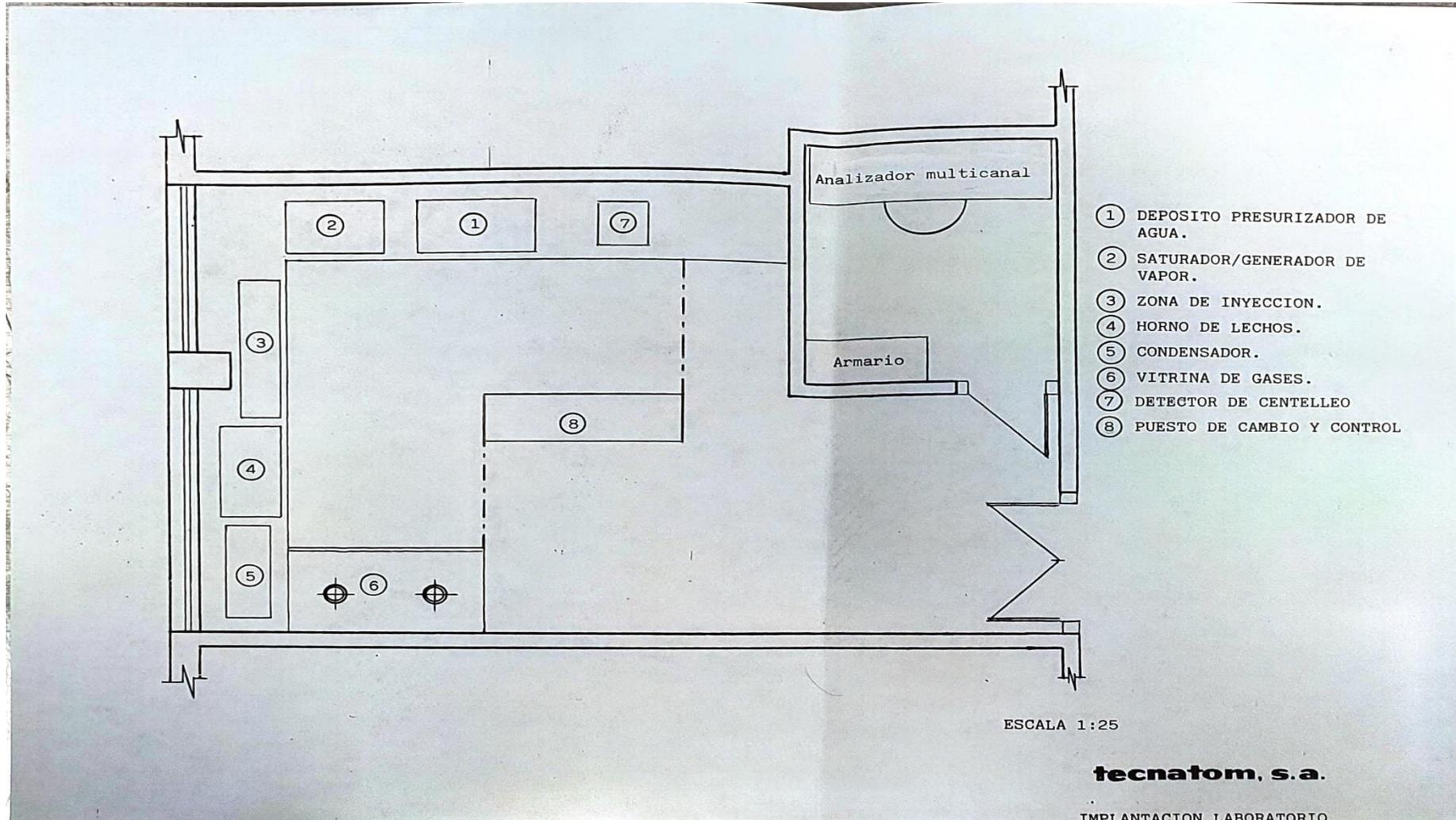


Ilustración 59 Esquema de la instalación (1984)

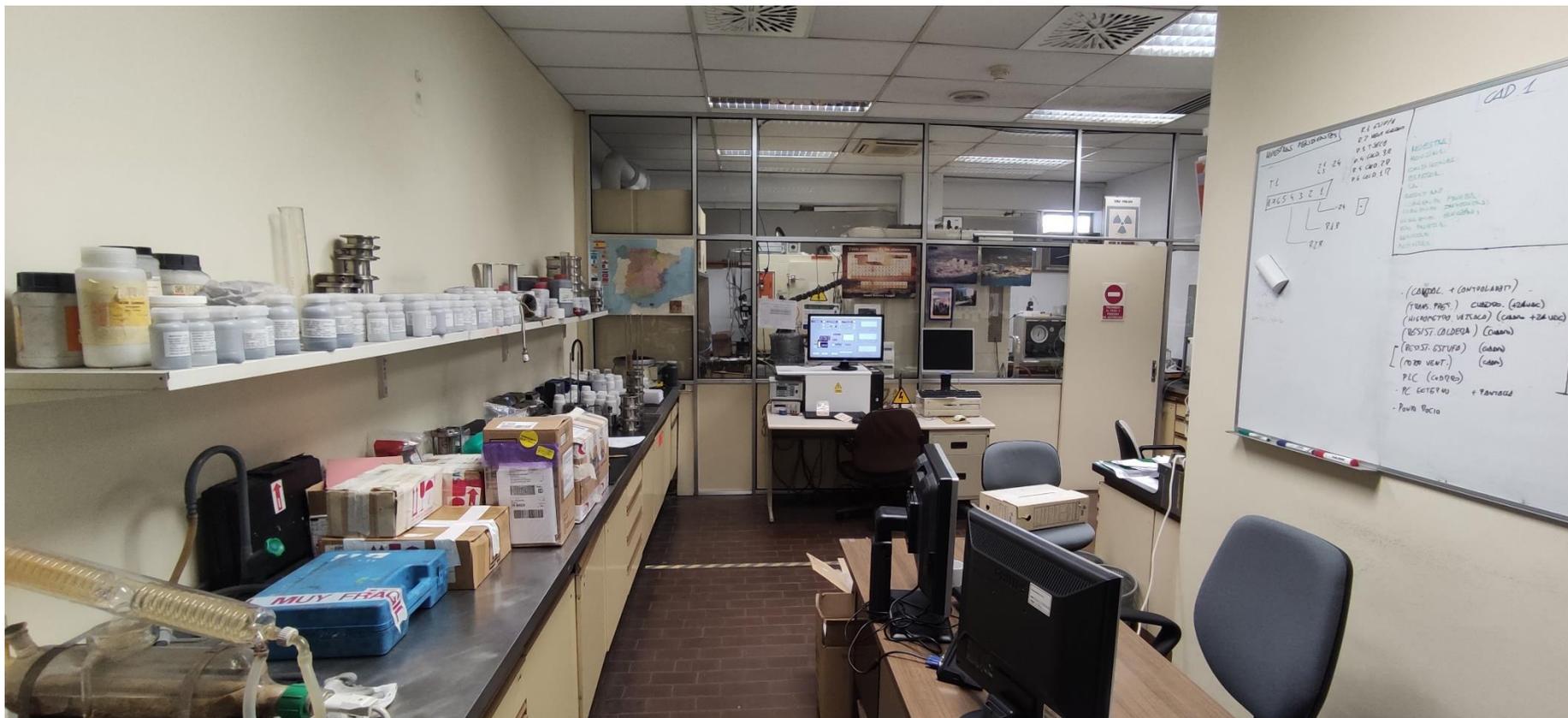
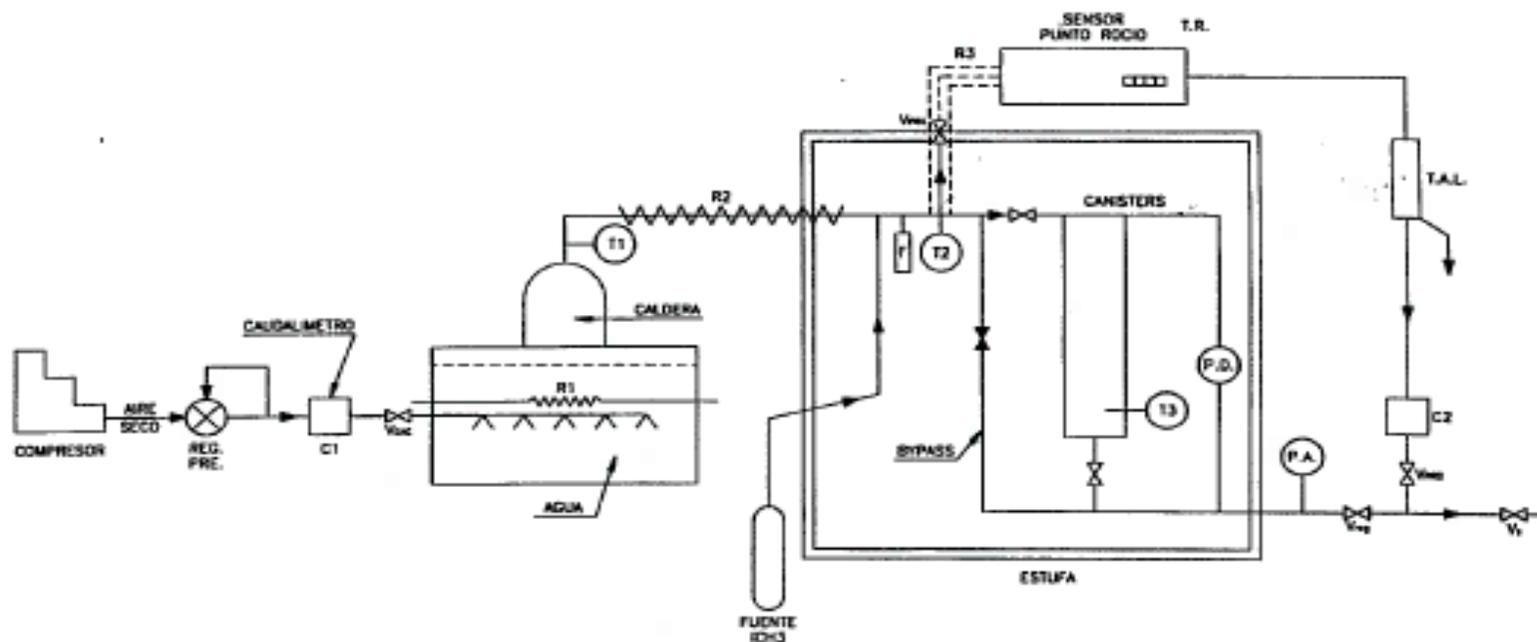


Ilustración 60 Fotografía del LCA



*Ilustración 61 Cadenas de ensayo, y vitrina de gases*



- LEYENDA:**
- C1 : CAUDALIMETRO MASICO
  - C2 : CAUDALIMETRO MASICO
  - R1 : RESISTENCIA CALIENTE AGUA
  - R2 : RESISTENCIA CALENTAMIENTO AIRE HUMEDO
  - R3 : RESISTENCIA ADICIONAMIENTO AIRE DE MEDIDA DE TEMPERATURA DE ROCIO
  - TR : SENSOR DE PUNTO DE ROCIO DE ESPEC.0 EMPARADO
  - T1 : TEMPERATURA A.H. SALIDA CALDERA
  - T2 : TEMPERATURA SECA AIRE DE ENSAYO
  - T3 : TEMPERATURA SECA AIRE SALIDA CANISTERS
  - PD : PRESION DIFERENCIAL CANISTERS
  - PA : PRESION ABSOLUTA EN LA LINEA
  - T.A.L. : TRAMPA AGUA LIQUIDA
  - V6c : VALVULA ENTRADA AIRE CALDERA
  - F : FILTRO DE AIRE
  - Vreg : VALVULA REGULACION
  - Vsen } VALVULA AIRE SENSOR PUNTO DE ROCIO
  - V6 : VALVULA SALIDA AIRE LIBRE

Ilustración 62 Esquema de montaje para ensayos de eficiencia de carbón activo

## 10. Bibliografía

- [1] INFOCITEC, Curso de Capacitación para Operadores de Instalaciones Radiactivas, 2018.
- [2] CSN, IRD-OP-GR-10, 2009.
- [3] D. Y. L. H. S. K. C. R. K. Hyun Chul Lee, «Performance evaluation of TEDA impregnated activated carbon under long term operation simulated NPP operating condition,» *Nuclear Engineering and Technology*, 2020.
- [4] ASTM D 3803, «Standard Test Method for Nuclear-Grade Activated Carbon,» 1989.
- [5] F&J SPECIALTY PRODUCTS, INC., «Methyl Iodide Retention Efficiency Vs. Flow Rate,» 2016.
- [6] S.-B. K. J. M. B.-K. S. Byung-Seon Choi, «Evaluation of decontamination factor of radioactive methyl iodide on activated carbons at high humid conditions,» *Nuclear Engineering and Technology*, 2020.
- [7] P. P. Ronald H.Howell, P. William J. Coad y J. P. P. Harry J.Sauer, Principles of Heating Ventilating and Air Conditioning, Atlanta, 2017.
- [8] ASTM-D-2862 , Standard Test Method for Particle Size Distribution of Granular Activated Carbon, 2022.
- [9] B. Shleien, The Helath Physics and Radiological Health Handbook, 1992.
- [10] nchps.org, «Nuclide Safety Data Sheet,» [En línea]. [Último acceso: 04/March/2023].
- [11] M.S.D.Smith, Exposure rate constants and lead shielding values for over, 2012.
- [12] Canada's Nulear Regulator, «Radionuclide Information Booklet,» 2017.
- [13] International Labour Organization, Ficha técnica del yoduro de metilo, 2018.
- [14] Freepik.es, «Freepik.es,» [En línea].

- [15] Publicación en RR.SS. de la Sociedad Española de Protección Radiológica, 2020.
- [16] ASME, ASME N510 testing of nuclear air treatment systems, 1989.
- [17] ASME, ASME N511 In service Testing of Nuclear Air-Treatment, Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems, 2017.
- [18] H. K. A. S. K. K. Gatot Suhariyono, «Absorption Life Time of Iodine-131 in Charcoal Filter on the Airborne Measurement in Stack Before Released into the Environment,» de *ASTECHNOVA 2014 International Energy Conference*, Yogyakarta, 2014.
- [19] B.O.E.-A-2001-1455, «Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes,» 2001.
- [20] ASME, «ASME N509 Nuclear Power Plant Air-Cleaning Units And Components,» 1989.
- [21] TECNATOM, «Control Radiológico del LCA,» 2023.
- [22] CIEMAT, Curso de SUPERVISORES de instalaciones radiactivas (IR).