



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
(ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS

Autor: Francisco Herrera García
Director: Javier Bárcena Risueño

Madrid
Junio de 2017

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Francisco Herrera García DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e

intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

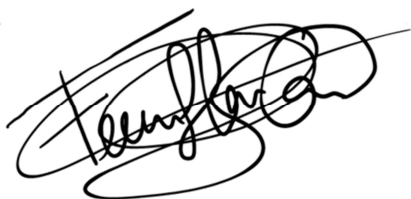
6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 27 de JUNIO de 2017

ACEPTA



Fdo.....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

--

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO
DE RESIDUOS RADIATIVOS.**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2016/2017 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Francisco Herrera García Fecha: 19 / Junio / 2017

Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Javier Bárcena Risueño

Fecha: 19 / Junio / 2017



FRANCISCO HERRERA GARCÍA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
(ICAI)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS

Autor: Francisco Herrera García
Director: Javier Bárcena Risueño

Madrid
Junio de 2017

DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS.

Autor: Herrera García, Francisco.

Director: Bárcena Risueño, Javier.

Entidades Colaboradoras: Empresarios Agrupados, ICAI - Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

1. Introducción.

Este proyecto da solución al problema de la acumulación de residuos sólidos radiactivos de baja actividad producidos por organizaciones y empresas relacionadas con la actividad nuclear de un país genérico, debido a que el país no posee de los centros adecuados para el tratamiento de este tipo de residuos. El diseño de un Edificio Tecnológico de Tratamiento de residuos radiactivos de baja actividad realizado propone una respuesta aplicable a países con una utilización media de las tecnologías nucleares (con varios reactores nucleares en operación y centros de investigación, además de instituciones médicas y centros industriales que también contribuirán a la generación de residuos).

El Edificio Tecnológico tendrá que ser capaz de tratar residuos de distinta naturaleza recibidos en un mismo contenedor, que tendrán que clasificarse y procesarse según sus características para alcanzar el nivel de seguridad del residuo final requerido (según Criterios de Aceptación del Almacén Final).

De todas las tecnologías existentes para el tratamiento de residuos de baja actividad se procede a evaluar cada una según los ciertos criterios derivados del estado de la técnica de cada tecnología, de su seguridad y cumplimiento de la normativa del sector y finalmente de los criterios económicos fijados por el presupuesto del proyecto. De la evaluación se obtienen las tecnologías a implantar en el edificio. Se define también la maquinaria auxiliar a utilizar en el edificio, todo ello destinado a hacer una integración real de los equipos en el layout del edificio una vez esté diseñado.

Con el fin de elegir los proveedores de los equipos se ha de conocer la capacidad de procesamiento necesaria por cada uno. Esto depende del volumen de residuo a tratar. En este proyecto se realiza un estudio a nivel europeo de las fuentes de residuos radiactivos sólidos de baja intensidad más comunes y, a partir de los datos recolectados, se realiza un inventario nacional de residuos para un país hipotético. Esto definirá el volumen de producto a tratar por año, clasificado según sus características.

Una vez se sepa la cantidad de residuo anual a tratar se dimensionan los equipos y se realiza un exhaustivo análisis de los proveedores existentes. De los resultados del análisis de proveedores se escogerán los que van a suministrar los equipos a instalar en el edificio tecnológico.

En la siguiente fase se pasa al diseño puro del edificio. Se parte de una planta impuesta y se adapta esta, diseñando la disposición y tamaño de las distintas salas necesarias. Además de las salas destinadas a equipos se tienen en cuenta otras muchas necesidades que aplican al edificio tecnológico diseñado, como las salas destinadas a sistemas auxiliares, salas de tránsito de personas, salas de seguridad, etc. Del estudio de requerimientos y espacios disponibles y siempre teniendo en cuenta los requisitos de seguridad que regulan el sector, se realiza una propuesta del layout final del edificio, que tendrá que ser validada por el departamento de ingeniería civil en fases posteriores del proyecto.

Uno de los mayores retos en el diseño de un Edificio Tecnológico para el tratamiento de residuos es conseguir integrar las diversas líneas de procesado de los distintos residuos. También se propone una integración de las diferentes líneas de proceso de residuos llevadas a cabo en el edificio, calculando además el tiempo que tarda el residuo en ser procesado en cada una de esas líneas.

Finalmente se hace una valoración del resultado obtenido, de la efectividad del diseño y de los aspectos que podrían mejorarse con vistas a las siguientes fases del proyecto.

2. Estado de la cuestión.

En el estado de la cuestión se analizan las técnicas técnicas generales de tratamiento de residuos radiactivos. Las técnicas de tratamiento de residuos radiactivos tienen como fin último el acondicionamiento de dichos residuos para poder ser almacenados de forma segura en los repositorios de destino. Las técnicas suelen basarse en métodos de reducción de volumen al máximo posible para optimizar el espacio de almacenado, así como de la inmovilización de los residuos para asegurar su completo aislamiento del exterior. Las técnicas analizadas son:

Técnicas de reducción de volumen

-Tratamientos térmicos

- Incineración
- Plasma
- Pirolisis

-Compactación

Técnicas de inmovilización

- Vitricación
- Cementación

También se analizan las técnicas de tratamiento utilizadas por los países punteros (Estados Unidos, Francia, Rusia, Reino Unido) y por los países de interés para el proyecto (Eslovaquia, Bulgaria, Lituania). También se estudia la situación de España y se indentifica la que va a ser obra de referencia para este proyecto: El centro de tratamiento de residuos radiactivos de “El Cabril”.

3. Definición del Edificio Tecnológico.

En este apartado se definen las características del edificio tecnológico. También se especificarán sus criterios de aceptación, hipótesis de partida y demás aspectos técnicos relevantes para llevar a cabo el proyecto.

Primero se definen los criterios de aceptación del edificio tecnológico, para así poder hacer un mejor estudio de las fuentes de residuos que enviarán su producción al edificio.

En resumen, los residuos que se tratarán son residuos sólidos de baja actividad, recibidos en recipientes normalizados (bidones de 220L y contenedores CE-2a).

Después del estudio de los inventarios sobre diferentes países de referencia, que están en proceso de entrada o acaban de entrar en la unión europea (Eslovaquia, Lituania, Bulgaria, Serbia, Ucrania, Turquía, España y Francia) se definen los siguientes productores principales de residuos:

- Centrales nucleares: actividades operación y desmantelamiento
- Centros de investigación radiológica
- Reactores de investigación nuclear
- Residuo histórico y acondicionamiento del terreno

Se calculan las cantidades de residuo generadas por cada uno y se clasifican según el tipo de residuo. Finalmente se llega a la cantidad de residuo que se recibirá para ser tratado en el edificio tecnológico, como indica la Tabla 1.

	Unidad de medida	TOTAL	Incinerable	Compactible	Metal	No procesable
TOTAL recibido en ET	m ³ /año	4510,8	127,884	1401,232	200,204	2781,48

Tabla 1. Volumen total de residuos radiactivos que son recibidos en el edificio tecnológico

Cuando se sabe la cantidad de residuo de cada tipo que va a ser tratado en el edificio tecnológico puede pasarse a la elección y dimensionado de los equipos necesarios.

Para la elección de los equipos más adecuados en este proyecto se utiliza la técnica del análisis multiatributo ponderado, que consiste en definir unos criterios según los requerimientos del edificio y asignarles unos pesos. Todas las tecnologías existentes (que ya fueron descritas en el estado de la cuestión) son evaluadas con una nota del 1 al 10 según su nivel de cumplimiento con los criterios fijados. Se evalúan criterios técnicos, no técnicos (seguridad y legislación) y económicos de cada tecnología. El resultado del análisis multiatributo revela las siguientes tecnologías como los candidatos finales elegidos:

- Para residuos compactables: La supercompactación es la tecnología más adecuada.
- Para residuos incinerables: la incineración en cámaras de combustión es la más adecuada.
- Para la inmovilización de residuos: la cementación es la tecnología más adecuada. Este proceso permite inmovilizar también las cenizas obtenidas de la incineración, al igual que posibles líquidos derivados de otros procesos.

Con las tecnologías de tratamiento ya elegidas, se continúa dimensionando los equipos. Atendiendo al volumen de residuo recibido para tratar por los distintos equipos, las capacidades necesarias son:

- Supercompactadora : 40 bidones/día
- Incineradora: 4 bidones/día
- Cementadora: 6 contenedores / día

Se realiza una hoja de especificaciones técnicas de estos equipos y de los demás equipos necesarios y se eligen los proveedores cuyos productos dan respuesta a las solicitudes indicadas.

4. Diseño del Edificio Tecnológico.

En este apartado del proyecto se idea la integración de los equipos elegidos en el apartado anterior, se diseñan las líneas de proceso y se integran en el layout del edificio. Se parte de la estructura de un edificio previamente construido. El trabajo, que es uno de los alcances del proyecto, es aprovechar el espacio disponible en el edificio para distribuir las distintas salas necesarias de modo que se favorezca el flujo de residuos por todas las líneas. El edificio del que se parte es el representado en la Figura 1.

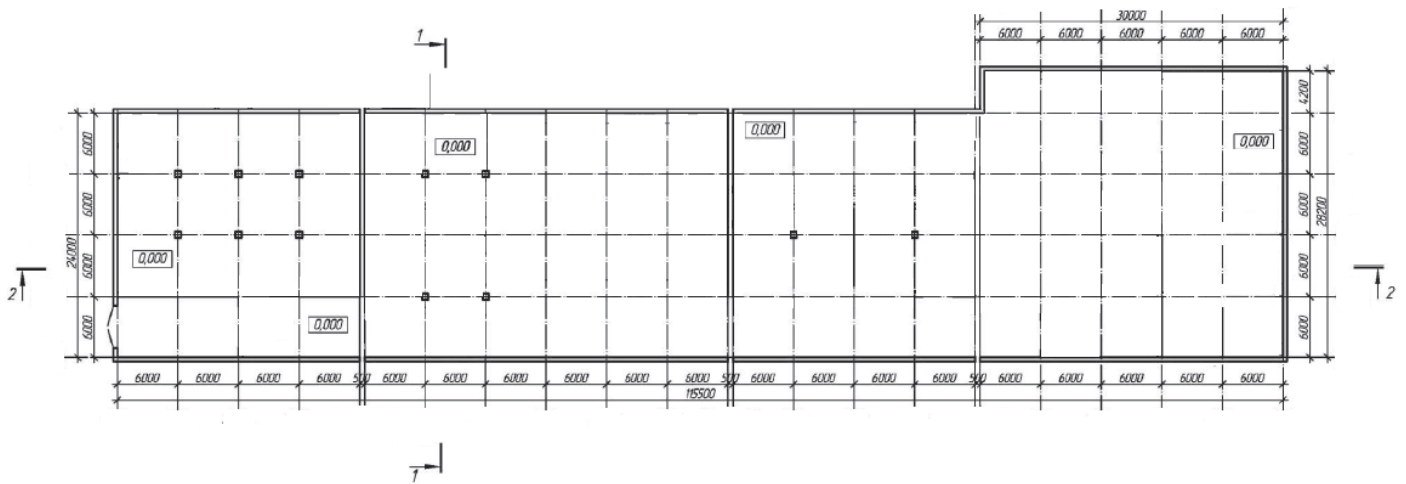


Figura 1. Planta del edificio inicial en el que integrar los procesos.

Después de analizar el espacio, el camino requerido por las distintas líneas y las obligaciones de diseño que impone la normativa aplicable tanto a la edificación en general como a la seguridad en construcciones dedicadas al ámbito radiactivo, se llega a la solución mostrada en la Figura 2.

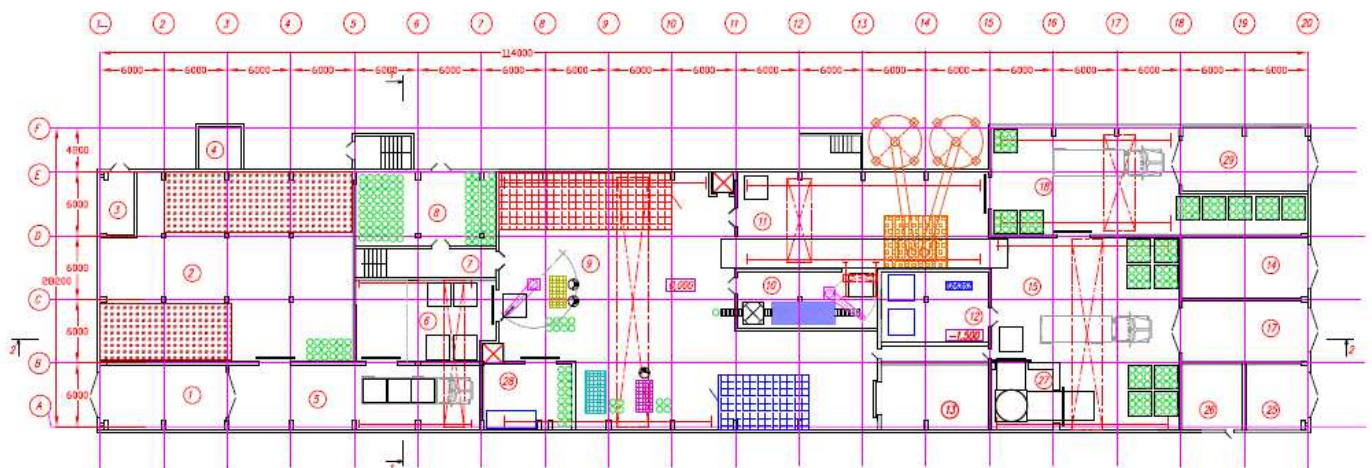


Figura 2. Diseño final del layout del Edificio tecnológico, con los equipos integrados

Sobre este layout final se integran las líneas de proceso y se calculan los tiempos de tratamiento de los residuos que las siguen.

5. Conclusiones.

Después de haber realizado todo el diseño del edificio y haber analizado la eficiencia del mismo, se concluye en que el proyecto no reporta muchos beneficios económicos que pueden medirse del ahorro de espacio que supone tratar los residuos en el edificio tecnológico en vez de cementarlos directamente (tratándolos se ahorra un espacio de 230 contenedores sobre los 1253 que se tienen que tratar anualmente). Sin embargo resulta una solución adaptable, efectiva y segura para el tratamiento de residuos sólidos de baja actividad. El proyecto ofrece no solo una solución, sino un

procedimiento a seguir para países que necesiten instalaciones de este tipo. Este es un modelo de proyecto que puede ser adoptado por los nuevos países que quieran incorporarse a la unión europea y tengan que cumplir con los requisitos que esta dictamina en materia de tratamiento de residuos nucleares sin tener instalaciones adecuadas para ello.

DESIGN OF A TECHNOLOGICAL BUILDING FOR TREATING RADIOACTIVE WASTE.

Author: Herrera García, Francisco.

Director: Bárcena Risueño, Javier.

Collaborating Organisations: Empresarios Agrupados, ICAI - Universidad Pontificia Comillas.

ABSTRACT

1. Introduction.

This project solves the problem of the accumulation of low-level radioactive solid waste produced by organizations and companies related to the nuclear activity of a generic country, because the country does not have adequate centers for the treatment of this kind of waste. The design of a low-level radioactive waste treatment technology building proposes a response applicable to countries with a medium use of nuclear technologies (with several nuclear reactors in operation and research centers, as well as medical institutions and industrial centers that also will contribute to the generation of waste).

The Technological Building will have to be able to treat waste of different nature received in the same container, which will have to be classified and processed according to its characteristics to reach the level of safety of the final waste required (according to Final Storage Acceptance Criteria).

Of all existing technologies for the treatment of low-level waste, each one is evaluated according to certain criteria derived from the state of the art of each technology, its safety and compliance with the sector's regulations and finally the economic criteria set by the project budget. The evaluation provides the technologies to be implemented in the building. It also defines the auxiliary machinery to be used in the building, all intended to make a real integration of the equipment in the layout of the building once it is designed.

In order to choose the suppliers, the processing capacity required by each one of the equipments has to be known. This depends on the volume of waste to be treated. This project carries out a study at a European level of the most common sources of low-level solid radioactive waste and, based on the data collected, a national inventory of waste is estimated for a hypothetical country. This will define the volume of product to be treated per year, classified according to its characteristics.

Once the amount of annual waste to be treated is known, the equipment is dimensioned and an exhaustive analysis of the existing suppliers is made. From the results of the analysis of suppliers will be chosen those who will supply the equipment to install in the technological building.

In the next phase the project moves to the pure design of the building. It departs from an imposed plant to be adapted, designing the layout and size of the different rooms needed. In addition to the equipment rooms, there are many other needs that apply to the designed technological building, such as rooms for auxiliary systems, people's transit rooms, security rooms, etc. From the study of the requirements and available spaces, and always taking into account the safety requirements that regulate the sector, a proposal is made for the final layout of the building, which will have to be validated by the civil engineering department in later phases of the project.

One of the biggest challenges in the design of a Technological Building for the treatment of waste is to be able to integrate the different lines of processing of the different residues. It also proposes an integration of the different lines of waste processing carried out in the building, also calculating the time it takes the residue to be processed in each of these lines.

Finally, an evaluation of the solution is made. The effectiveness of the design is assessed and the aspects that could be improved in the following phases of the project are identified.

2. State of the art.

The state of the art discusses the general techniques of treatment of radioactive waste. The radioactive waste treatment techniques have as final purpose the conditioning of residues in order to be stored safely in the destination repositories. The techniques are usually based on methods of volume reduction to the maximum possible to optimize the storage space, as well as the immobilization of the waste to ensure complete isolation from the outside. The techniques analyzed are:

Volume reduction techniques:

Thermal treatments

- Incineration
- Plasma
- Pirolisis

Compaction

Immovilization techniques

- Vitrification
- Cementation

The treatment techniques used by the leading countries (United States, France, Russia, United Kingdom) and the countries of interest to the project (Slovakia, Bulgaria, Lithuania) are also analyzed. We also study the situation in Spain and identify what will be the reference work for this project: The radioactive waste treatment center of "El Cabril".

3. Definition of the technological building.

In this section the characteristics of the technological building are defined. It will also specify its acceptance criteria, starting hypotheses and other relevant technical aspects to carry out the project.

First, the criteria for acceptance of the technological building are defined, so that a better study can be made of the sources of waste that will be sent to the building.

In short, the waste to be treated is low-level solid waste, received in standard containers (220L containers and CE-2a containers).

After the study of the inventories of different reference countries, which are in the process of entry or have just entered the European Union (Slovakia, Lithuania, Bulgaria, Serbia, Ukraine, Turkey, Spain and France), the following main producers of waste are identified:

- Nuclear Power Plants: operation and decommissioning activities
- Radiological research centers
- Research Nuclear reactors
- Historical waste and ground conditioning

The amounts of waste generated by each one is calculated and classified according to the type of waste. Finally, we reach the amount of waste that will be received to be treated in the technological building, as indicated by the Exhibit 1.

	Measurement unit	TOTAL	Incinerable	Compactible	Metal	Non processable
TOTAL waste received at TB	m ³ /year	4510,8	127,884	1401,232	200,204	2781,48

Exhibit 2. Total volumen of radioactive waste received at the technological building.

When the amount of waste of each type that is going to be treated in the technological building is known then the project can move to the choice and dimensioning of the necessary equipment.

For the selection of the most suitable equipment in this project a multi-attribute weighted analysis technique is used. This technique consists in defining some criteria according to the requirements of the building and assigning a few weights. All existing technologies (which have already been described in the state of the art) are evaluated with a score from 1 to 10 according to their level of compliance with the criteria set. Technical, non-technical (safety and legislation) and economic criteria of each technology are evaluated. The result of the multi-attribute analysis reveals the following technologies as the chosen final candidates:

- For compact waste: Supercompaction is the most suitable technology.
- For incinerable waste: incineration in combustion chambers is the most appropriate.
- For the immobilization of waste: cementation is the most appropriate technology. This process also allows the ash obtained from the incineration to be immobilized, as well as possible liquids derived from other processes.

With the treatment technologies already chosen, the equipment can be dimensioned. Given the volume of waste received to deal with different equipment, the necessary capacities are:

- Supercompactor : 40 barrels/day
- Incinerator: 4 barrels/day
- Cementator: 6 containers / day

A sheet of technical specifications of these equipment and of the other necessary equipment is produced and the suppliers whose products respond to the indicated requests are elected.

4. Design of the Technological Building.

In this section of the project, the integration of the teams chosen in the previous section is conceived, the process lines are designed and integrated in the layout of the building. It is part of the structure of a building previously built. The work, which is one of the scope of the project, is to take advantage of the space available in the building to distribute the different rooms needed to favor the flow of waste across all lines. The building of which it is part is the one represented in Figure 1

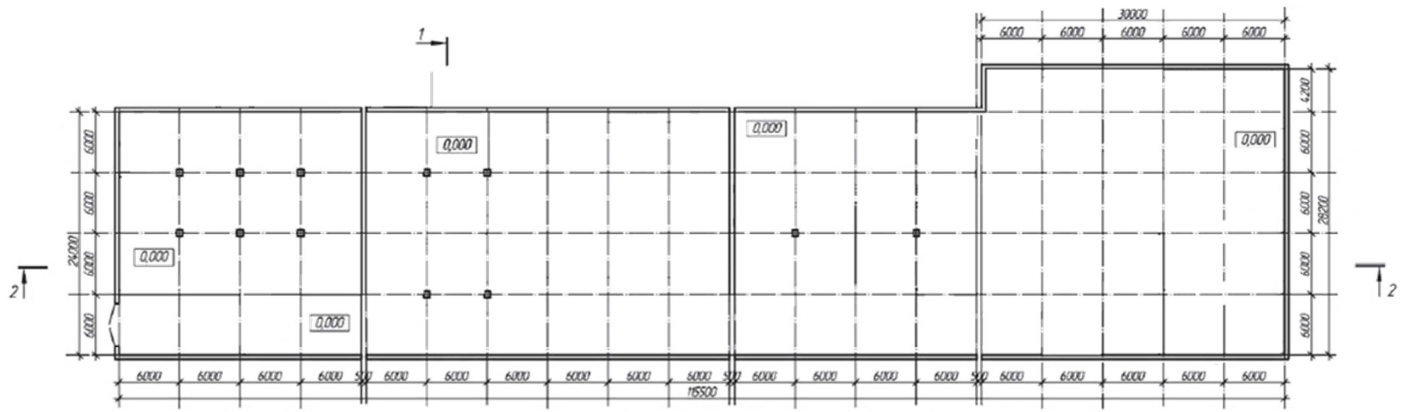


Figure1. Initial structure of the technological building.

After analysing the space, the path required by the different lines and the design obligations imposed by the regulations applicable both to building in general and to safety in constructions dedicated to the radioactive field, we arrive at the solution shown in Figure 2.

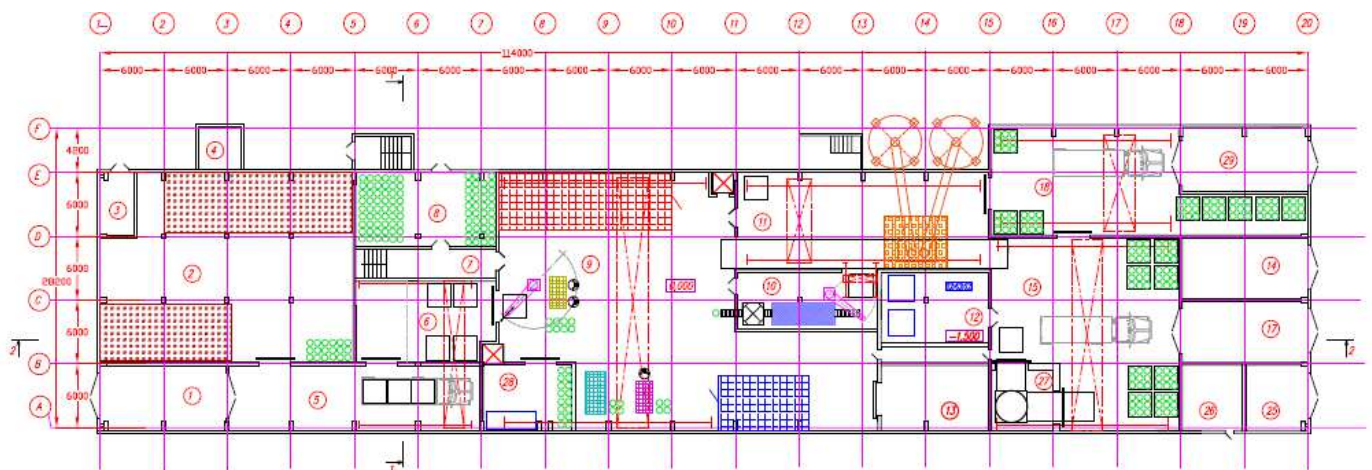


Figure 4. Final design of the layout of the technological building with the equipment integrated into it.

On this final layout the process lines are integrated and the processing times of the waste that follow are calculated.

5. Conclusions.

After having completed all the design of the building and analyzed the efficiency of the same, it is concluded that the project does not report many economic benefits that can be measured from the space saving that involves treating the waste in the technological building instead of cementing them directly (Treating them saves a space of 230 containers over the 1253 that have to be treated annually). However, it is an adaptable, effective and safe solution for the treatment of low-level solid waste. The project offers not only a solution, but a procedure to be followed for countries that need installations of this type. This is a model project that can be adopted by the new countries that want to join the European Union and have to comply with the requirements that it dictates in the matter of nuclear waste treatment without having adequate facilities for it.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
(ICA I)

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS

Autor: Francisco Herrera García
Director: Javier Bárcena Risueño

Madrid
Junio de 2017

Índice general

DOCUMENTO I: MEMORIA DESCRIPTIVA	7
Capítulo 1. Introducción.....	9
1.1. Justificación del proyecto. Objetivos.	11
1.2. Alcance del proyecto.....	11
1.3. Estado del arte	12
1.3.1. Nociones previas sobre radiactividad	12
1.3.2. Clasificación de los distintos residuos radiactivos.....	14
1.3.3. Técnicas de tratamiento de residuos radiactivos.....	19
1.3.4. Prácticas internacionales de tratado de residuos	27
Europa del este	31
España.....	34
Resumen sobre los países estudiados	35
Capítulo 2. Definición del Edificio Tecnológico.	37
2.1. Hipótesis de partida.	37
2.1.1. Definición de la actividad nuclear del país.	37
2.1.2. Definición de los criterios de aceptación del Edificio Tecnológico.	38
2.2. Inventario de residuos radiactivos del país.....	39
2.3. Selección de tecnologías.	44
2.3.1. Criterios de selección.	44
2.3.2. Métodos de selección: Matriz multiatributo.	44
Definición de los distintos criterios de evaluación	44
Asignación de pesos a los diferentes factores.....	48
Elaboración del análisis multiatributo	51
2.4. Cálculo de la capacidad de los equipos.....	55
2.5. Selección de proveedores.	57
2.5.1. Equipos necesarios	57
2.5.2. Evaluación y elección de proveedores	61
2.5.3. Presupuesto estimado.....	65
Capítulo 3. Diseño del Edificio Tecnológico.	69



3.1. Diseño de las líneas principales de proceso.....	71
3.1.1. Línea de proceso de recepción y verificación.....	72
3.1.2. Línea de proceso de clasificación y fragmentación.....	73
3.1.3. Línea de proceso de compactación.....	75
3.1.4. Línea de proceso de incineración.....	76
3.1.5. Línea de residuos procedentes de las centrales nucleares.....	77
3.1.6. Línea de cementación.....	78
3.1.7. Línea de proceso de salida de contenedores.....	79
3.2. Sistemas auxiliares necesarios.....	80
3.2.1. Sistema de drenaje-desagüe.....	80
3.2.2. Sistema de suministro de agua sanitaria.....	80
3.2.3. Sistema de protección contra incendios.....	81
3.2.4. Sistema de descontaminación.....	81
3.2.5. Sistema de aire comprimido.....	81
3.2.6. Sistema de ventilación.....	82
3.2.7. Sistema eléctrico.....	83
3.3. Layout del edificio.....	83
3.3.1. Criterios de diseño.....	83
3.3.2. Solución final del layout.....	85
3.3. Integración de las líneas de proceso en el edificio.....	96
3.3.1. Línea integrada de residuo compactable.....	98
3.3.2. Línea integrada de residuo incinerable.....	102
3.3.3. Línea integrada de residuo metálico y no procesable.....	106
3.3.4. Línea integrada de residuo procedente de centrales nucleares.....	109
3.3.5. Línea integrada de flujo de personas.....	112
Capítulo 4. Conclusiones.....	115
DOCUMENTO II: PLANOS.....	119
Referencias bibliográficas.....	134

Índice de figuras

<i>Figura 1. El Cabril. Ejemplo de Centro Tecnológico para el tratado de residuos radiactivos.</i>	10
<i>Figura 2. Clasificación de los distintos tipos existentes de radiación nuclear.</i>	13
<i>Figura 3. Imagen resumen de la clasificación de los residuos radiactivos según la IAEA</i>	16
<i>Figura 4. Esquema de proceso de una planta de incineración de residuos radiactivos. Imagen cortesía de Japan Atomic Energy Agency.</i>	20
<i>Figura 5. Esquema del proceso de pirolisis. Cortesía de IAEA.</i>	22
<i>Figura 6. Esquema de una instalación de plasma con detalle del funcionamiento de la cámara de plasma. Imagen cortesía de IAEA.</i>	23
<i>Figura 7. Compactación en barril. Imagen cortesía de easyrack.org</i>	24
<i>Figura 8. Supercompactadora. Cortesía de Nukem Technologies</i>	25
<i>Figura 9. Esquema del proceso de vitrificación de residuos radiactivos. Cortesía de Areva.</i>	26
<i>Figura 10. Ejemplos del resultado (izquierda) y el proceso (derecha) de cementación</i>	27
<i>Figura 11. Análisis multiatributo para las técnicas de tratamiento de residuos compactables.</i>	52
<i>Figura 12. Análisis multiatributo para las técnicas de tratamiento de residuos incinerables.</i>	53
<i>Figura 13. Análisis multiatributo para las técnicas de tratamiento de inmovilización de residuos.</i>	54
<i>Figura 14. Datos de partida para el cálculo del coste de operación de los equipos</i>	65
<i>Figura 15. Costes anuales asociados al proceso de supercompactación</i>	65
<i>Figura 16. Costes anuales asociados al proceso de incineración.</i>	66
<i>Figura 17. Costes anuales asociados al proceso de cementación.</i>	66
<i>Figura 18. Costes de los equipos de clasificación y fragmentación.</i>	66
<i>Figura 19. Costes de los equipos de transporte.</i>	67
<i>Figura 20. Diagrama de la línea general de proceso de tratamiento de residuos radiactivos en el centro tecnológico.</i>	71
<i>Figura 21. Línea de proceso de la recepción y verificación de residuos</i>	72
<i>Figura 22. Medidas de los camiones que transportan residuos al centro tecnológico.</i>	72
<i>Figura 23. Línea de proceso de la clasificación y acondicionamiento (fragmentación) de los residuos a granel recibidos.</i>	74
<i>Figura 24. Línea de proceso de la compactación de los bidones de residuos.</i>	75
<i>Figura 25. Línea de proceso de incineración del residuo recibido.</i>	76
<i>Figura 26. Línea de proceso de los residuos procedentes de la operación y desmantelamiento de centrales nucleares</i>	77
<i>Figura 27. Línea de proceso de cementación de contenedores.</i>	78
<i>Figura 28. Línea de proceso de salida de contenedores del edificio tecnológico.</i>	79
<i>Figura 29. Disposición final de las salas en el edificio tecnológico</i>	86
<i>Figura 30. Integración de los equipos en el layout del edificio tecnológico</i>	96
<i>Figura 31. Línea de proceso del residuo compactable integrada en el layout del edificio tecnológico.</i>	100
<i>Figura 32. Línea de proceso del residuo incinerable integrada en el layout del edificio tecnológico.</i>	104



Figura 33. Línea de proceso del residuo metálico y no procesable integrada en el layout del edificio tecnológico.	107
Figura 34. . Línea de proceso del residuo procedente de las centrales nucleares integrada en el layout del edificio tecnológico.	110
Figura 35. Línea de tránsito de personas integrada en el layout del edificio tecnológico.	113



Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación a nivel operacional de los residuos según la IAEA.	17
Tabla 2. Clasificación del residuo radiactivo en función de su nivel de exención.....	17
Tabla 3. Clasificación de residuos radioactivos sólidos según su actividad específica	18
Tabla 4. Clasificación general de los residuos radiactivos según sus distintas características.	18
Tabla 5. Predicción de los residuos producidos por el país objeto de estudio hasta 2067	40
Tabla 6. Inventario de residuo anual a recibir en el Edificio Tecnológico	41
Tabla 7. Pesos de los criterios no técnicos del análisis multiatributo.....	49
Tabla 8. Pesos de los criterios técnicos del análisis multiatributo.	50
Tabla 9. Pesos de los criterios económicos del análisis multiatributo.	51
Tabla 10. Capacidades necesarias de los equipos principales del edificio tecnológico	55
Tabla 11. Dimensiones de los distintos recipientes utilizados para el tratamiento de residuos radiactivos, definidos por ENRESA.	56
Tabla 12. Requisitos técnicos necesarios para la incineradora del edificio tecnológico.	58
Tabla 13. Requisitos técnicos necesarios para la supercompactadora del edificio tecnológico.	58
Tabla 14. Requisitos técnicos necesarios para la incineradora del edificio tecnológico.	59
Tabla 15. Requisitos técnicos necesarios para la los puentes grúa del edificio tecnológico.	59
Tabla 16. Requisitos técnicos necesarios para las grúas de pórtico utilizadas en el edificio tecnológico.	60
Tabla 17. Estudio de los proveedores de las tecnologías a implantar en el edificio tecnológico.	62
Tabla 18. Normas y regulaciones internacionales a seguir para el diseño del layout del edificio.....	84
Tabla 19. Listado de salas del layout final del edificio tecnológico.....	87
Tabla 20. Datos iniciales considerados para el cálculo de tiempos de las líneas de proceso.	98

DOCUMENTO I:

MEMORIA DESCRIPTIVA

Capítulo 1.

Introducción.

La tecnología nuclear ha experimentado una gran evolución en las últimas décadas. Son muchas las aplicaciones de esta tecnología, y se empieza a investigar cada vez más cómo aplicarla de forma segura a sus potenciales usos.

Quizá uno de los usos más conocidos de las tecnologías nucleares es la obtención de energía eléctrica. En las centrales nucleares se utilizan las reacciones nucleares para conseguir vapor de agua a altas presiones que al ser turbinado proporciona energía eléctrica. El combustible de las reacciones nucleares suele ser el isótopo de uranio U-235. En ese proceso de obtención de energía se producen residuos nucleares derivados de distintos procesos (combustible gastado, utensilios contaminados por radiación, etc.) que es preciso tratar y acondicionar para que no supongan un riesgo para las personas y el medio ambiente.

La tecnología nuclear está siendo introducida cada vez más en el ámbito industrial. Aquí toma protagonismo por sus aplicaciones en el control de procesos: controles de calidad, de mantenimiento de maquinaria y estudio de procesos de alta velocidad. En estos casos se utiliza la radiación de partículas para obtener radiografías de los posibles defectos estructurales que pueda tener una máquina dentro de un proceso y que son imperceptibles a simple vista. El uso de fuentes de radiación y el propio material radiado son residuos que necesitan de un tratamiento de acondicionamiento una vez hayan sido utilizados. Otras aplicaciones industriales emergentes son la esterilización de instrumental de un solo uso o la fabricación de caucho artificial y plásticos. Estas aplicaciones también producen residuos radiactivos.

Otro de los campos de aplicación bien conocido de las tecnologías nucleares es el sector militar. La tecnología nuclear se usa aquí con fines armamentísticos, como la fabricación de bombas atómicas que utilizan el potencial energético nuclear con fines destructivos. Otro de los usos en este campo es para la propulsión de máquinas de guerra como pueden ser submarinos o buques de guerra. Ambas aplicaciones producen residuos, en los dos llegando a residuos de alta y muy alta actividad debido al enriquecimiento del uranio hasta niveles del 90% para aplicaciones armamentísticas.

En medicina se usan las radiaciones nucleares, los isótopos radiactivos y otras características radiológicas para la prevención (esterilización), diagnóstico (radiografías, TAC) y terapia (radiación de agentes patógenos). También existen numerosas aplicaciones potenciales que están siendo objeto de investigación.

Además de las aplicaciones comentadas, las tecnologías radiactivas se utilizan en otros muchos campos como la agricultura (control de plagas), la industria alimentaria (conservación de alimentos por irradiación), aplicaciones medioambientales y muchas más. Todos los campos de aplicación mencionados anteriormente dan una idea del amplio espectro de utilización de la radioactividad y la justifican la gran inversión en investigación y desarrollo que se está haciendo en ella.

Como se ha podido ver en la mayoría de ejemplos de aplicaciones, la explotación de las tecnologías nucleares lleva asociada la generación de algún tipo de residuo radiactivo que es preciso tratar. Si bien el uso de estas tecnologías promete ser relevante en los próximos años, también hay que desarrollar tecnologías que permitan tratar adecuadamente los residuos derivados de ellas para poder hacer un uso sostenible de ellas. Este factor es en el que se enfoca este proyecto, en el tratamiento de residuos radiactivos de media y baja actividad provenientes de las principales fuentes de residuos actuales que puedan coexistir en un país. Es un proyecto que pretende ayudar a la gestión nacional de residuos radiactivos proponiendo un edificio con tratamientos especializados para cierto tipo de residuos que pueda integrarse en un complejo mayor.

Este tipo de proyectos ha despertado el interés de muchos organismos de la Unión Europea (INSC, EURATOM). Desde ellos se promueven proyectos que mejoren las capacidades técnicas en materia de seguridad de países miembros. Esta iniciativa está impulsando la implantación de centros de tratamiento y almacenamiento de residuos en países con una experiencia limitada en estos campos.

Los Países de la Unión Europea poseen gran cantidad de empresas, organizaciones o instituciones relacionadas con la tecnología nuclear que generan una gran cantidad de residuos radiactivos que necesitan ser tratados para poder garantizar la seguridad de su almacenaje. La gran mayoría de estos proceden de los reactores nucleares, pero otra parte se generan por pequeños productores como son los centros de investigación, instituciones médicas o centros industriales.

Este proyecto por lo tanto tiene como objetivo el exponer las mejores prácticas internacionales, evaluar técnica y económicamente las alternativas tecnológicas disponibles actualmente y realizar el diseño un Edificio Tecnológico para el tratado de determinadas fuentes de residuos radiactivos dentro de un país tipo que se definirá en los próximos apartados.



Figura 1. El Cabril. Ejemplo de Centro Tecnológico para el tratado de residuos radiactivos.

1.1. Justificación del proyecto. Objetivos.

Una descripción global del objetivo principal de este proyecto es diseñar un Edificio Tecnológico que sea capaz de procesar y acondicionar unas corrientes determinadas de residuos de baja y media actividad procedentes de diferentes actividades de manera efectiva para su posterior almacenamiento temporal o definitivo. Se deben evaluar las mejores técnicas disponibles para este fin, desarrollando una metodología que sirva para justificar técnica y económicamente las tecnologías que han de implantarse en el Edificio Tecnológico. Más detalladamente se busca dar solución a los siguientes puntos:

- Identificación de las corrientes de residuos radiactivos que van a poder tratarse en el Edificio Tecnológico. Estimación inicial de los residuos de baja y media actividad y de corta vida, procedentes de los distintos centros de producción de residuos radioactivos mencionados anteriormente y que se tratarán en el Edificio. Se definirán unos flujos anuales de esos residuos para así poder seleccionar las tecnologías adecuadas para su tratamiento.
- Estudio de las tecnologías empleadas en otros países para el tratamiento de las distintas corrientes de residuos nucleares.
- Evaluación y selección de las tecnologías a incluir en el Edificio Tecnológico para poder tratar la mayor parte del residuo considerado en el alcance del proyecto. Análisis de las posibles tecnologías y elección de las más adecuadas siguiendo los procesos específicos propios del tratamiento de residuos nucleares (reducción de volumen, necesidad de tratamientos secundarios, capacidad de procesado, seguridad de operación, coste, etc.). Definición de sus especificaciones técnicas y comprobación del cumplimiento de las normativas internacionales.
- Diseño básico del Edificio Tecnológico: definición de las diferentes líneas de tratamiento de residuos según su clasificación, distribución en planta de los equipos e integración de las líneas de proceso. Adaptación de las líneas de proceso a una estructura exterior del edificio prefijada.

1.2. Alcance del proyecto.

El alcance de este proyecto incluye el estudio de la técnica, la identificación de tecnologías de tratamiento de residuos radiactivos, su evaluación según los requerimientos del Edificio Tecnológico, la realización de un inventario tipo de residuos basándose en las fuentes de residuos típicas de los países de la Unión Europea, la evaluación de las tecnologías a fin de elegir las más adecuadas para el tratamiento de los residuos, el estudio de los proveedores, la recopilación de información de los equipos de dichos proveedores incluyendo precios orientativos, el diseño de la distribución de salas del edificio tecnológico para ubicar cada proceso, situar cada máquina en su sala correspondiente,

diseñar las líneas de proceso e integrarlas en el layout del edificio tecnológico y realizar un estudio orientativo de tiempos de las líneas de proceso.

En resumidas cuentas, el proyecto tiene como alcance analizar la problemática de tratamiento de residuos de baja actividad en los países del entorno de la unión Europea y ofrecer un diseño preliminar de un Edificio Tecnológico que sea una solución real, factible y efectiva.

No entran en el alcance del proyecto el diseño de la obra civil del edificio, ni la verificación de la viabilidad del reparto de salas diseñado para el mismo. Esta será otra fase del proyecto que de ser llevada a cabo por un equipo de ingeniería civil que analice e identifique los posibles problemas encontrados a la propuesta dada en ese proyecto.

Queda fuera del alcance de este proyecto el diseño de los sistemas auxiliares del edificio tecnológico necesarios para su puesta en funcionamiento (véase sistemas de ventilación, sistemas eléctricos, sistemas de protección contra incendios, sistemas de suministro de agua y demás sistemas necesarios). Si bien se identifican y se diseñan las salas necesarias para albergar sus equipos, en ningún momento se entra en detalle en esos sistemas. El diseño de estos sistemas es una labor posterior que corresponderá a los distintos equipos de ingeniería a los que se asigne el proyecto.

El proyecto recoge información de proveedores mediante un contacto directo con ellos. En el sector nuclear los equipos utilizados suelen estar hechos a medida según los requerimientos de los clientes. Al ser un proyecto en fase de diseño todos los datos de los equipos recopilados son orientativos. Queda fuera del alcance del proyecto especificar de forma detallada los parámetros de cada equipo con tal de realizar órdenes de compra de los mismos para el suministro al proyecto. Este proceso se llevará a cabo en fases venideras del proyecto una vez se hayan validado las características técnicas de los equipos.

1.3. Estado del arte

En este apartado se definirán los conceptos generales que se aplicarán en el proyecto. Siguiendo un enfoque deductivo se expondrán la clasificación de los distintos tipos de residuos, los procedimientos de tratado de estos mismos y las prácticas internacionales llevadas a cabo por distintos países, para ir sentando las bases sobre las que se apoyará el proyecto. Cada apartado irá perfilando el alcance del Edificio Tecnológico.

1.3.1. Nociones previas sobre radiactividad

Antes que nada conviene recordar los tipos de radiación ionizante que son causa de la contaminación radiactiva. Existen tres tipos de radiación principales asociados a la industria nuclear ([Figura 2](#)) [1]

- Radiación alfa

Esta radiación está constituida por partículas alfa, que son núcleos de Helio. Estos núcleos de Helio están constituidos por dos protones y dos neutrones, pero carecen de la corteza de electrones que equilibra su carga eléctrica. Por tanto, las partículas alfa poseen una carga netamente positiva, lo que las confiere un gran poder de ionización, además de ser partículas de una gran masa atómica. Sin embargo tienen bajo poder de penetración ya que debido a

su gran cantidad de masa y carga son frenadas con facilidad. El peligro de estas partículas reside en su adhesión a los elementos con los que entren en contacto. Para el ser humano es muy peligrosa su inhalación, ingesta o demás procesos que impliquen la introducción de estas partículas en el organismo.

- Radiación Beta

La radiación beta no es más que una partícula subatómica cargada eléctricamente (electrón o positrón) que es irradiada como producto de una desintegración atómica. Este tipo de radiación tiene un poder ionizante menor que la radiación alfa ya que su carga neta es de menor valor, sin embargo posee un mayor poder de penetración debido a su menor masa. La radiación beta puede ser frenada por una hoja de papel de aluminio. En cualquier caso tiene poder de penetración suficiente como para atravesar la piel humana e introducirse en el organismo, donde debido a su poder ionizante puede causar graves daños. Habrá que prestar especial atención a los emisores de este tipo de radiación, protegiéndolos de manera que la radiación quede confinada dentro de un espacio delimitado.

- Radiación Gamma

La radiación gamma está formada por fotones de alta energía que son producto de procesos atómicos de desintegración o fenómenos atómicos que impliquen gran cantidad de energía, como la transición de un núcleo de un nivel de excitación alto a otro más bajo. No poseen un gran poder de ionización, pero debido a su gran cantidad de energía cinética poseen un inmenso poder de penetración, pudiendo ser frenadas tan solo con grandes cantidades de masa de estructura muy compacta. Ese poder de penetración hace que sean capaces de destruir cualquier núcleo celular que encuentren a su paso, siendo muy perjudiciales para cualquier organismo. Su confinamiento se realiza en paredes de hormigón de gran espesor para asegurar que la radiación no pueda salir al exterior.

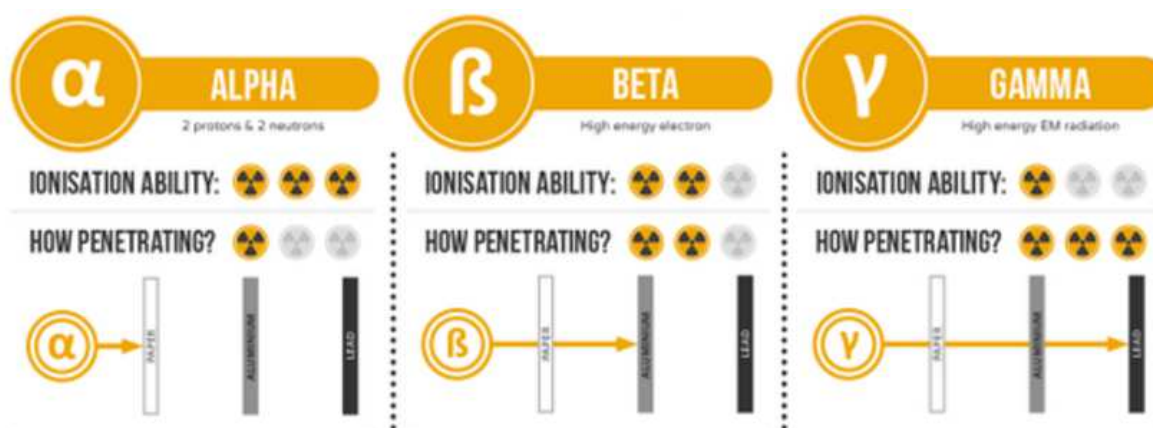


Figura 2. Clasificación de los distintos tipos existentes de radiación nuclear.

El tipo de radiación es un factor crítico a la hora de clasificar un residuo radiactivo dentro de una u otra categoría. La clasificación depende del tipo de radiación que emita el radionucleido que es clasificado como residuo [2]. También del tipo de radiación por el que haya sido contaminado el material que es considerado residuo pero no emisor. Para este proyecto se considera la clasificación

adoptada por todos los países miembros de la Agencia Internacional de la Energía Atómica (IAEA en inglés), una de los organismos internacionales más reconocidos en el sector nuclear y del cual se tomará toda la normativa aplicable al proyecto.

1.3.2. Clasificación de los distintos residuos radiactivos

Uno de los primeros aspectos a clarificar es la forma en la que se van a clasificar los residuos Radiactivos. La clasificación que se siga marcará la definición de los residuos que vayan a ser aptos para su tratado en el Edificio tecnológico.

La IAEA establece la siguiente clasificación de residuos, según su nivel de actividad y su periodo medio de desactivación:

Residuo exento (Exempt waste, EW)

El residuo exento contiene una concentración muy pequeña de radionucleidos emisores la cual no se considera perjudicial. Por tanto el EW no necesita ser tratado en plantas especiales, puede almacenarse directamente en emplazamientos destinados al almacenaje de residuos convencionales.

Los valores límite de actividad del EW derivan de la radiación recibida por el personal que trabaje en los centros de almacenaje de este residuo. Un residuo se clasificará como EW si la dosis de radiación recibida por una persona expuesta a ese residuo es menor que 10 μSv en un año.

Residuo de muy corta vida (Very Short Lived Waste,VSLW)

El residuo VSLW contiene radionucleidos con un periodo de semidesintegración muy corto pero con niveles de actividad que están por encima de los niveles de exención. Al tener un corto periodo de desintegración, estos residuos pueden ser almacenados hasta que su actividad desaparezca, momento en el cual dejarán de considerarse como residuo peligroso y podrán ser tratados como residuo convencional. Suelen aparecer como producto de investigaciones médicas y de aplicaciones industriales, asociados al uso de fuentes nucleares como el Ir ¹⁹² o el Tc ⁹⁹.

El aspecto principal que caracteriza a este tipo de residuos es el periodo de semidesintegración. Al ser un periodo muy corto no necesitan de un almacenamiento prolongado, tan solo el suficiente como para que su actividad se vea reducida y pueda ser tratado como residuo normal. Suele considerarse residuo VSLW al residuo con un periodo de semidesintegración menor de 100 días.

Residuo de muy baja actividad (Very Low Level Waste, VLLW)

Muchos de los utensilios y materiales con los que se trabaja en centros de alta exposición radiológica, como centrales nucleares, acaba recibiendo unas dosis de radiación suficientes como para que exceda en nivel de exención fijados por la normativa nuclear. Este tipo de residuo son muy comunes también en labores de desmantelamiento de centrales nucleares. El residuo radiado necesita un tratamiento específico para poder ser almacenado cumpliendo con los requerimientos de protección y seguridad.

Para determinar si un tipo de residuo puede ser clasificado como VLLW ha de atenderse a su actividad media. Si está por encima de los niveles de exención es candidato a ser catalogado como

VLLW. Luego dependiendo de los criterios de aceptación del centro de tratamiento se fijará un nivel de clasificación superior. A veces estos residuos suelen incluirse con los residuos de baja actividad para su tratamiento conjunto, sin hacer distinciones. En otras ocasiones existen plantas de tratamiento exclusivo de residuos VLLW donde el límite entre residuos de muy baja actividad y de baja actividad está perfectamente definido, aunque suele depender de la especificación de cada centro.

Residuo de baja actividad (Low Level Waste, LLW)

Anteriores clasificaciones de residuos definían el residuo LLW como aquel que no precisaba de ningún encofrado especial durante las operaciones de manipulación y transporte. Este criterio sigue utilizándose en la actualidad, pero completado con especificaciones enfocadas a la seguridad del almacenamiento de residuo a largo plazo.

En la actual clasificación se caracteriza el residuo LLW como aquel que es apto para su almacenamiento geológico superficial (hasta 30m de profundidad). Esto quiere decir que su actividad queda totalmente controlada mediante medios de confinamiento en contenedores de hormigón y aislamiento del residuo durante varios cientos de años, sin necesidad de almacenamiento geológico profundo.

La variabilidad del tipo de residuos englobados en esta categoría es muy grande. El tratamiento de este tipo de residuos dependerá de su naturaleza y composición, pero siempre atendiendo a asegurar un perfecto control de su actividad. Cada tratamiento específico será tarea del centro de tratamiento en el que se acondicione el residuo. Dependiendo del nivel de actividad dentro del rango de clasificación de LLW, podrían almacenarse junto a residuos de actividad intermedia para un mejor aprovechamiento de las instalaciones.

Residuo de media actividad (Intermediate Level Waste, ILW)

Los residuos de media actividad se definen como residuos que contienen radionucleidos de larga vida que necesitan un mayor nivel de confinamiento que el proporcionado por el almacenamiento geológico superficial. La profundidad necesaria varía de 30m a 300m bajo tierra. De esta forma se aísla completamente el residuo de la biosfera. Puede permanecer almacenado en ese emplazamiento de forma segura durante cientos de años.

Aunque poseen mayor actividad que los residuos de baja actividad, todavía no generan una cantidad significativa de calor.

Residuo de alta actividad (High Level Waste, HLW)

Como residuos de alta actividad (HLW) son considerados aquellos que contienen grandes concentraciones de radionucleidos de alto grado de emisión radiológica, ya sean de corta como de larga vida. Debido a este factor los residuos de alta radioactividad emiten calor, pudiendo llegar a temperaturas de 120°C. El residuo proveniente del combustible gastado en las centrales nucleares que no puede reprocesarse, entre otros, es ejemplo de este tipo de residuo.

La emisión de partículas radiactivas es tan grande en estos residuos que necesitan de un confinamiento especial extremadamente controlado con el fin de asegurar el completo aislamiento del residuo con el exterior. El confinamiento de los residuos HLW se realiza en matrices de un material como vidrio u hormigón compactado que aseguren la completa estabilidad del residuo dentro de ellas. Posteriormente se aísla de toda posible interacción con la biosfera por medio de un almacenamiento geológico profundo a 500m bajo tierra, en una instalación avanzada que certifique la completa estanqueidad de las galerías. [3]

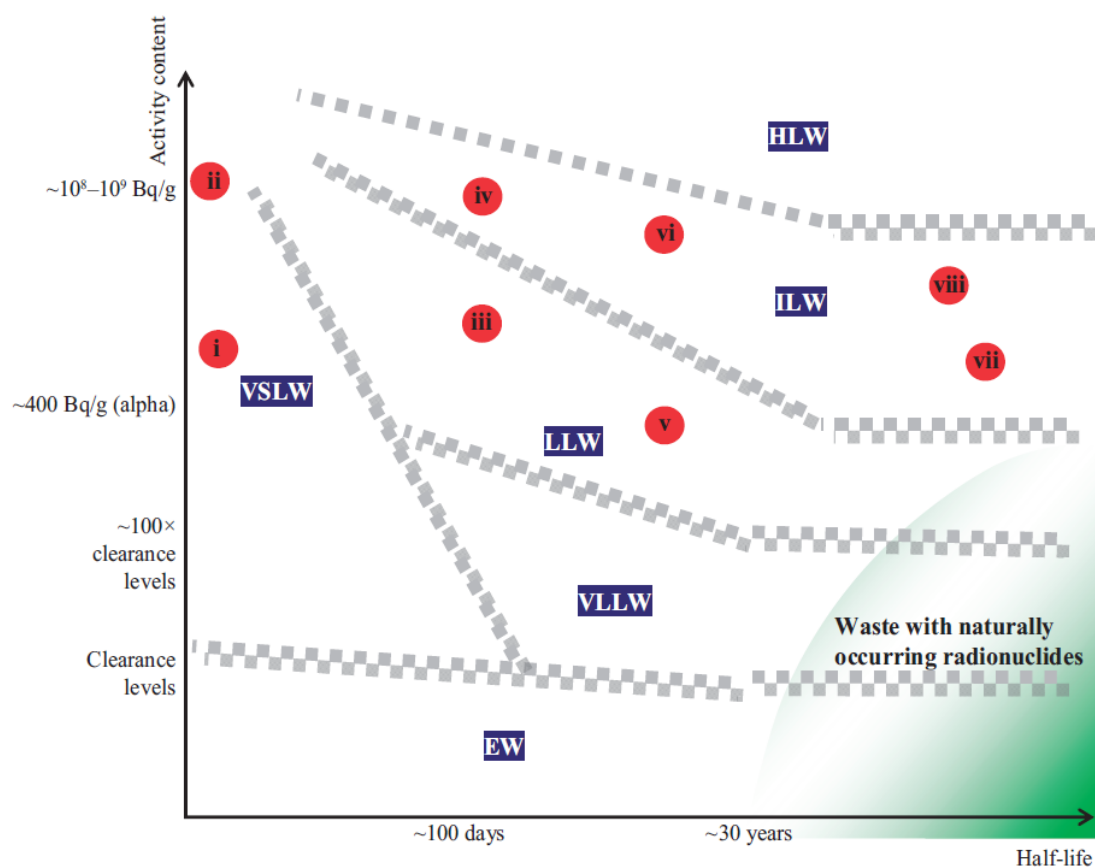


Figura 3. Imagen resumen de la clasificación de los residuos radiactivos según la IAEA

A fin de completar la información sobre la clasificación de residuos se incluyen a continuación una serie de tablas que detallan los diferentes límites entre tipos de residuos.

En la Tabla 1 se especifica la clasificación a nivel operacional que hace la IAEA de los residuos radiactivos. En esta tabla se indican también las opciones de almacenamiento para cada tipo de residuo. Cabe destacar que en esta clasificación se incluyen los residuos radiactivos de larga duración, que son considerados como muy peligrosos y deben ser almacenados igual que los de alta actividad.

Clase de residuo	Opciones de almacenamiento
Residuo exento (EW)	Sin restricciones radiológicas
Residuos de baja y media actividad (LILW)	Almacenamiento superficial o bien geológico profundo
Residuo de corta vida (LILW-SL)	Almacenamiento superficial o bien geológico profundo
Residuo de larga duración (LILW-LL)	Almacenamiento geológico profundo
Residuo de alta actividad (HLW)	Almacenamiento geológico profundo

Tabla 1. Clasificación a nivel operacional de los residuos según la IAEA.

También resulta interesante conocer los límites de radiación específica manejados para los diferentes tipos de residuos y que determinarán su clasificación. En la tabla se especifican los niveles a partir de los cuales se considera que un residuo es radiactivo dependiendo de la naturaleza de su radiación. En esta misma tabla se clasifican los residuos en grupos que serán mencionados en la siguiente tabla. En la Tabla 3 se muestran los niveles de cada tipo de residuo en kBq/kg.

Grupo de residuo	Residuo sólido	Nivel de exención kBq /kg
1	Radionucleidos transuránicos – emisores alfa	0,1
2	Otros radionucleidos – emisores alfa	1
3	Radionucleidos emisores beta- gamma	10
4	H-3, C-14, Cl-36, Ca-45, Mn-53, Fe-55, Ni-59, Ni-63, Nb-93m, Tc-99, Cd-109, Cs-135, Pm-147, Sm-151, Tm-171, Tl-204	100

Tabla 2. Clasificación del residuo radiactivo en función de su nivel de exención

Categoría de Residuo	Rango de actividad específica de residuo sólido medido en kBq/ kg			
	Radionucleidos alfa		Radionucleidos beta-gamma	
	Grupo			
	1	2	3	4
Baja actividad	$>10^{-1} <10^1$	$>10^0 <10^2$	$>10^1 <10^3$	$>10^2 <10^4$
Media actividad	$\geq 10^1 <10^5$	$\geq 10^2 <10^6$	$\geq 10^3 <10^7$	$\geq 10^4 <10^8$
Alta actividad	$\geq 10^5$	$\geq 10^6$	$\geq 10^7$	$\geq 10^8$

Tabla 3. Clasificación de residuos radioactivos sólidos según su actividad específica

Las características de cada grupo de residuos varía mucho de unos a otros y por tanto sus técnicas de tratamiento son muy diferentes. Es por esto que los centros de tratamiento suelen especializarse en cierto tipo de residuos para poder dar una solución precisa y eficiente según el tipo de residuo a tratar. En el edificio tecnológico diseñado en este proyecto se limitará el tratamiento de residuos a residuos sólidos de muy baja u baja actividad, pudiendo así centrarse en diseñar las líneas de tratamiento específicas para este tipo de residuo. Los criterios específicos de aceptación del centro se detallaran más adelante. No obstante, y teniendo en cuenta la poca delimitación entre grupos de residuos, se tiene en cuenta que puedan recibir residuos de media actividad que rondan los niveles frontera entre baja y media, así como residuos líquidos de forma excepcional que provengan de pequeños productores y puedan introducirse en la línea sin causar alteración alguna (orgánicos incinerables, activos para cementación, etc.) [3]

Clasificación de residuos radioactivos			
Según Actividad	Según Vida	Según Composición	
Baja Actividad (LLW)	Muy Corta Vida (LLW) < 100 días	Sólido	Compactable
			No Compactable
Media Actividad (ILW)	Corta Vida (SLW) < 30 años	Líquido	Orgánico
			Acuoso
Alta Actividad (HLW)	Larga Vida (LLW) > 30 años	Biológico	

Tabla 4. Clasificación general de los residuos radiactivos según sus distintas características.

1.3.3. Técnicas de tratamiento de residuos radiactivos

En este apartado se exponen las técnicas generales de tratamiento de residuos radiactivos, sin particularizar en los procesos de tratamiento para el tipo de residuos que van a tratarse en el edificio tecnológico. Será después del estudio del estado del arte cuando se realizará una evaluación de las tecnologías con el fin de elegir las más adecuadas para el diseño del edificio.

Las técnicas de tratado de residuos radiactivos tienen como fin último el acondicionamiento de dichos residuos para poder ser almacenados de forma segura en los repositorios de destino. Las técnicas suelen basarse en métodos de reducción de volumen al máximo posible para optimizar el espacio de almacenado, así como de la inmovilización de los residuos para asegurar su completo aislamiento del exterior. Atendiendo a estos objetivos puede realizarse una primera clasificación de los métodos en métodos de reducción de volumen y métodos de inmovilización. No todos los residuos pueden ser sometidos a una reducción de volumen. La posibilidad de someterlos a este tratamiento depende de su naturaleza. Residuos orgánicos, por ejemplo, podrán ser buenos candidatos para ser incinerados. Residuos metálicos en cambio no podrán someterse a ningún método de reducción de volumen convencional. Es por esto que a los métodos de reducción de volumen también se les llama pretratamientos. A continuación se realiza una clasificación de ambas técnicas, especificando las diferentes modalidades que existen dentro de ellas y los residuos que son capaces de procesar [4].

Técnicas de reducción de volumen

Los tratamientos previos al almacenamiento definitivo de los residuos. Su objetivo es reducir el volumen de estos para así aumentar la capacidad de almacenaje de los repositorios finales. Según el tipo de tratamiento pueden obtenerse reducciones de volumen con un factor de 1:100. Solamente cierto tipo de residuos son susceptibles de ser pretratados para reducir su volumen. Dependiendo de la naturaleza del residuo podrán ser sometidos a uno u otro tratamiento. A continuación se exponen los distintos tipos de tratamiento existentes:

Tratamientos térmicos:

Los tratamientos térmicos son aptos principalmente para residuos de composición orgánica. La combustión de residuos orgánicos es el método que ofrece una mayor reducción de volumen de los residuos, convirtiéndolos en cenizas que se añadirán al proceso de cementación para su inmovilización definitiva. Existen distintos tipos de tratamientos térmicos según la tecnología usada. Algunos de ellos llevan utilizándose años, como la incineración. Otros son el resultado de la investigación en este campo, y su uso comercial se encuentra limitado. Lo principales tipos de tratamientos térmicos que se utilizan en la actualidad son los siguientes [5].

Incineración

La incineración es el proceso típico de quemado de residuos en una cámara de combustión mediante aporte de calor producido por la combustión de carburante, Normalmente fuel-oil

o gas (o una mezcla). Es un método que ofrece una gran reducción del volumen de los desechos (de hasta 100 veces). El producto que resulta de la incineración, las cenizas, es muy estable y apto para su traslado al proceso de inmovilización. Las instalaciones de incineración ofrecen un funcionamiento continuo en el que se pueden introducir todo tipo de residuos combustibles, sólidos y líquidos. Es un método muy efectivo para el tratamiento de residuos contaminados por radiación alfa, siendo también efectivo para residuos contaminados por otros tipos de radiación. Es un método apropiado para residuos de baja y media- baja actividad, ya que la inversión en equipos que puedan tratar este tipo de residuos es baja y los resultados son muy buenos. Para residuos de mayor actividad la construcción se vuelve más costosa ya que hay que incorporar sistemas de aislamiento y control de radiación especiales.

La combustión de los residuos suele hacerse con exceso de aire en tres cámaras separadas. En la primera se realiza un precalentamiento del residuo con ayuda de un calentador eléctrico. En la segunda se realiza la combustión propiamente dicha, se queman los residuos. En la tercera se mantienen los residuos a una temperatura de hasta 1200 °C durante varios segundos para asegurar la completa destrucción del residuo orgánico.

Uno de los inconvenientes de la incineración es la necesidad de un sistema de tratamiento de los humos / gases producto de la combustión mediante filtrado con filtros EPA y enfriado de los gases. La integración de este sistema junto al incinerador confiere al equipo unas dimensiones considerables (25m largo x 10m ancho x 20m alto), lo que puede suponer un problema si el espacio es limitado.

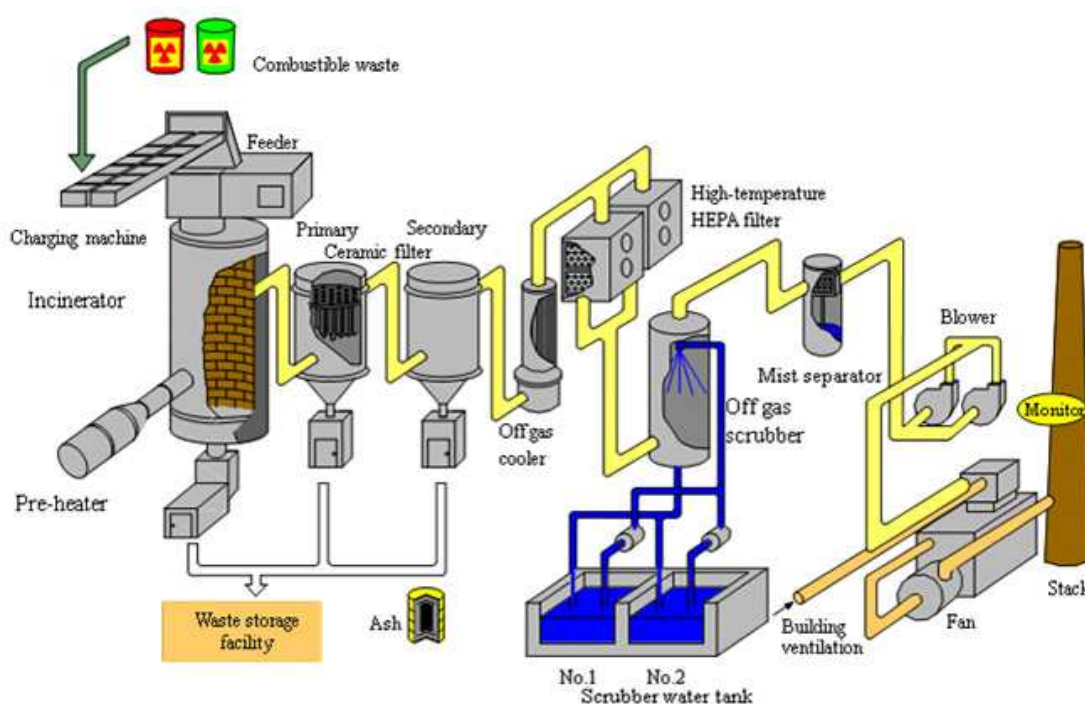


Figura 4. Esquema de proceso de una planta de incineración de residuos radiactivos. Imagen cortesía de Japan Atomic Energy Agency.

Pirolisis

La pirolisis consiste en un proceso de descomposición térmica de residuos orgánicos en una atmosfera inerte. Se suele utilizar rutenio para obtener las condiciones de atmosfera inerte que permiten que la temperatura de operación sea menor que en otros tratamientos térmicos (del orden de 500 °C). El reactor utiliza una mezcla de queroseno, agua e hidróxido de calcio, que introducido en una cámara precalentada a 400°C que contiene bolas de trióxido de dialuminio. En la cámara es donde se produce la descomposición de todos los componentes con ayuda de las bolas, cuya función es aumentar el coeficiente de transferencia de calor para favorecer la desintegración. Como la reacción se realiza en ausencia de oxígeno, los gases producidos son menos contaminantes, por lo que se necesita un sistema más sencillo para el tratamiento posterior de los mismos, simplificando el sistema. La pirolisis es un proceso muy eficiente de transformación de residuos orgánicos en un producto químicamente inerte.

Las ventajas de la pirolisis son una alta eficiencia de descontaminación de los residuos radiactivos, al reducirlos a sus partículas elementales, una baja sensibilidad del proceso a la composición de los residuos orgánicos a tratar, una reducción del producto final del proceso (cenizas) completamente inerte y listo para ser cementado. Otra ventaja ya mencionada es la simplicidad de su sistema off gas que reduce las dimensiones de la instalación.

Las desventajas de los sistemas de pirolisis es que es una tecnología cara que lleva asociada un consumo de energía grande al mantener la temperatura del sistema con calentadores eléctricos. Aunque la naturaleza de los residuos tratados puede ser sólida, líquida y gaseosa, si se desean unas características concretas del producto resultante de la pirolisis (requerimientos para su inmovilización) se debe diseñar el sistema específico para cada tipo de residuo. Este proceso también comparte con otros procesos térmicos la desventaja de que solo sirve para tratar residuos orgánicos [6].

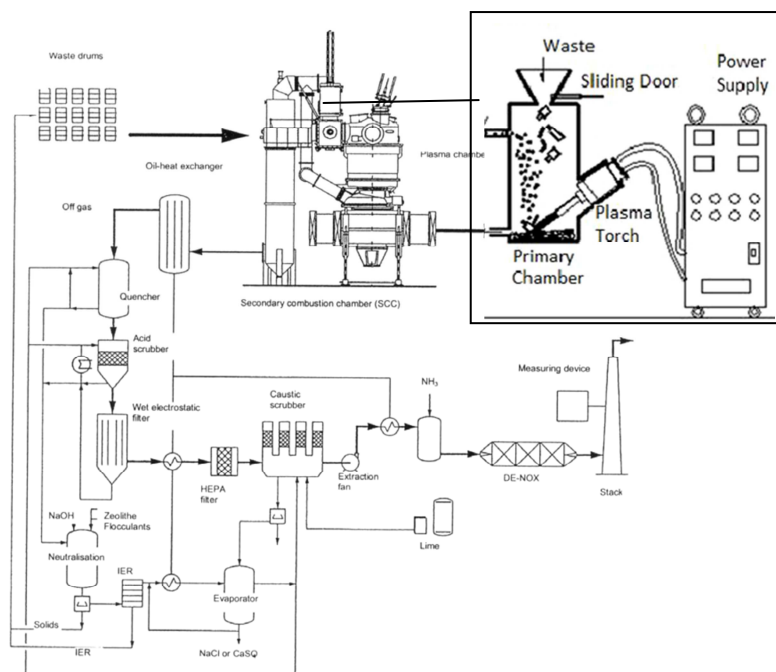


Figura 6. Esquema de una instalación de plasma con detalle del funcionamiento de la cámara de plasma. Imagen cortesía de IAEA.

Compactación:

Para aquellos residuos radiactivos que no sean susceptibles de ser descompuestos mediante tratamientos térmicos existe otro método de reducción de volumen: la compactación. Este proceso consiste en compactar los residuos con ayuda de una prensa hidráulica para así reducir el espacio que ocupan y aumentar la eficiencia del almacenado posterior. El coeficiente de reducción de volumen es mucho menor que el de los tratamientos térmicos, llegando a poder reducirse en 10 veces el volumen original del residuo. La ventaja de este método es que es apto para tratar casi todo tipo de residuos cuyo volumen pueda ser reducido (algunos residuos metálicos no son aptos para ser compactados). Según como se realice el prensado de los residuos se diferencian dos tipos de compactación:

Compactación en barril:

Se trata de una compactación de los residuos directamente dentro del barril. Se abre el barril de residuos normalizado (200 L) y se introduce el émbolo de la prensa en él. El émbolo desciende compactando los residuos que se encuentran en el barril al máximo posible. Este método de compactación suele estar enfocado a barriles donde se desee realizar una cementación directa del residuo en su interior. Se rellenará el espacio liberado dentro del barril gracias a la compactación de mortero para inmovilizar el residuo radiactivo. A continuación se volverá a colocar la tapa del barril y se transportará este al almacén correspondiente.

Es un proceso sucio que requiere ser realizado en una sala protegida (celda caliente, sala de guantes) ya que se destapan bidones de residuos radiactivos que pueden emitir radiación al

exterior y contaminar sus alrededores. También en el proceso de prensado pueden producirse derrames de los líquidos que puedan surgir de la compactación de los residuos.

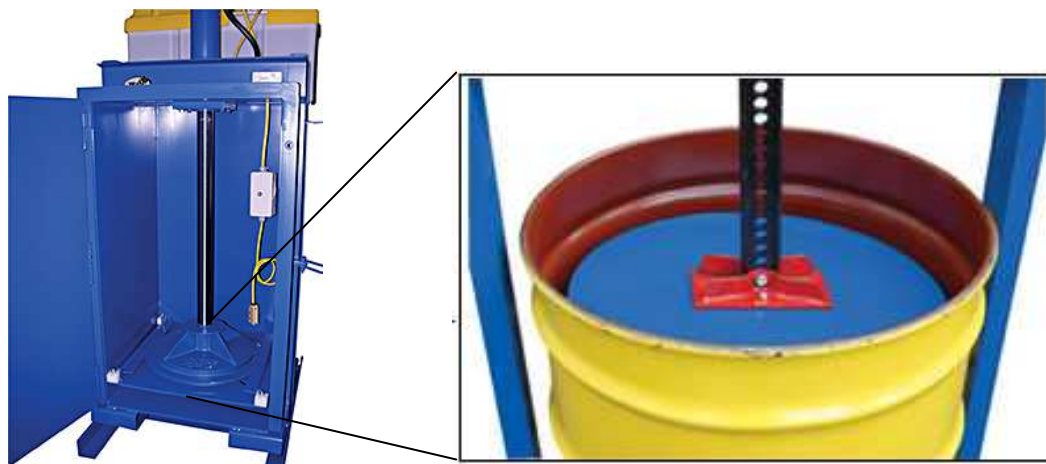


Figura 7. Compactación en barril. Imagen cortesía de easyrack.org

Supercompactación:

La supercompactación es un proceso en el que los residuos radiactivos se compactan directamente con el barril, obteniéndose un residuo llamado pellet, y que suele ser de un tamaño entre 3 y 5 veces menor que el barril original. Para la compactación se utilizan prensas hidráulicas que pueden ejercer fuerzas de hasta 20000 kN. Es un proceso que puede tratar todo tipo de residuos compactables, ofreciendo una gran reducción de volumen y un producto final que es fácil de almacenar. El único problema que existe en compactar los bidones a tan altas fuerzas es que aumenta el vertido de residuos líquidos al exterior del barril, con lo que tiene que diseñarse un sistema de drenajes capaz de tratar el líquido radiactivo expulsado.

Los supercompactadores están diseñados para un funcionamiento totalmente automatizado. Una vez se adaptan a la línea de alimentación de barriles están listos para su funcionamiento en continuo. Se debe prestar especial atención al sistema automático de colocación de los barriles en la plataforma de compactación, ya que se requiere que estos se coloquen en una posición específica para que la compactación se realice correctamente. Como en todos los procesos de tratado de residuos nucleares, la supercompactación tiene que estar monitoreada por un sistema de vigilancia. Es un sistema efectivo (ya que el producto del proceso es un residuo limpio de fácil transporte y almacenaje y con un buen coeficiente de reducción de volumen) que requiere poco espacio de instalación ($L \times A \times H = 4 \times 2.5 \times 4.5$ metros) y relativamente barato comparado con otros métodos.

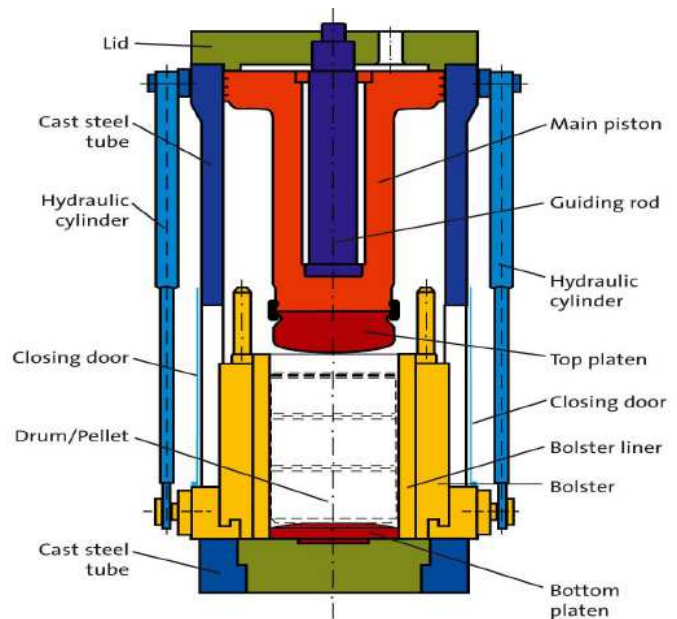
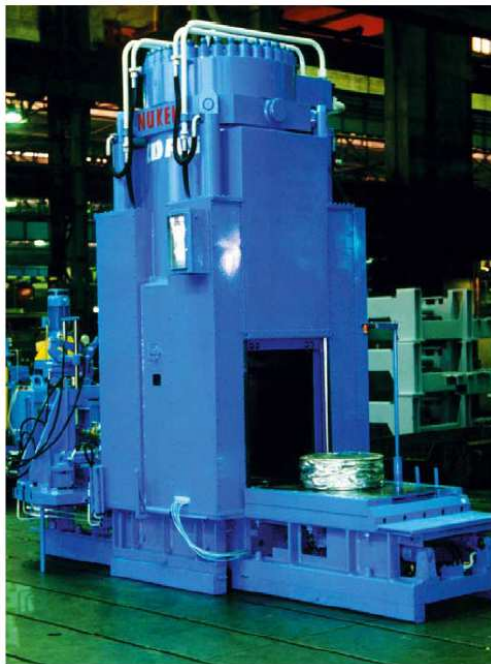


Figura 8. Supercompactadora. Cortesía de Nukem Technologies

Técnicas de inmovilización

Vitrificación:

El proceso de vitrificación consiste en inmovilizar el residuo dentro de una matriz de gran estabilidad formada por arenas de sílice fundidas. Las arenas más adecuadas para este uso son los borosilicatos amorfos y arenas de estructura similar. EL material vitrificante es calentado en hornos a alta temperatura (1150 °C) hasta que se funde, convirtiéndose en una masa fluida. Cuando se alcanza ese estado se añade el residuo radiactivo que se desea inmovilizar. El cristal líquido mezclado con los residuos es introducido en vasijas especiales de acero inoxidable que facilitan su enfriamiento a la vez que proporcionan un recubrimiento de contención más. Dichas vasijas pueden llevarse directamente al lugar de almacenaje final, ya sea en repositorios superficiales o profundos.

El método de vitrificación ofrece un producto final que es totalmente estable, gracias al confinamiento del material radiactivo en la matriz de vidrio. Su estabilidad y seguridad son mucho mayores comparadas con la inmovilización por cementación. Es por eso que es el tratamiento más adecuado para inmovilizar residuos de alta actividad (HLW). Países como Francia, Estados Unidos y Japón utilizan este método como el principal en el tratamiento de residuos de alta actividad, como los residuos procedentes del combustible gastado de las centrales nucleares. Sin embargo a la hora de inmovilizar residuos de baja y media actividad (LLW, ILW) su eficiencia no es tan grande al ser un método más costoso que otros que ofrecerían un resultado similar para ese tipo de residuos.

Una de las limitaciones de este proceso es que el residuo que se incorpora al vidrio fundido tiene que estar totalmente seco y reducido a las partículas más pequeñas que puedan conseguirse para que la mezcla con el líquido matriz sea lo más homogénea posible. A esto se

le añade el gran coste de la instalación y del proceso en sí, con lo que se deben hacer estudios económicos minuciosos para saber en qué caso este tratamiento es rentable [8].

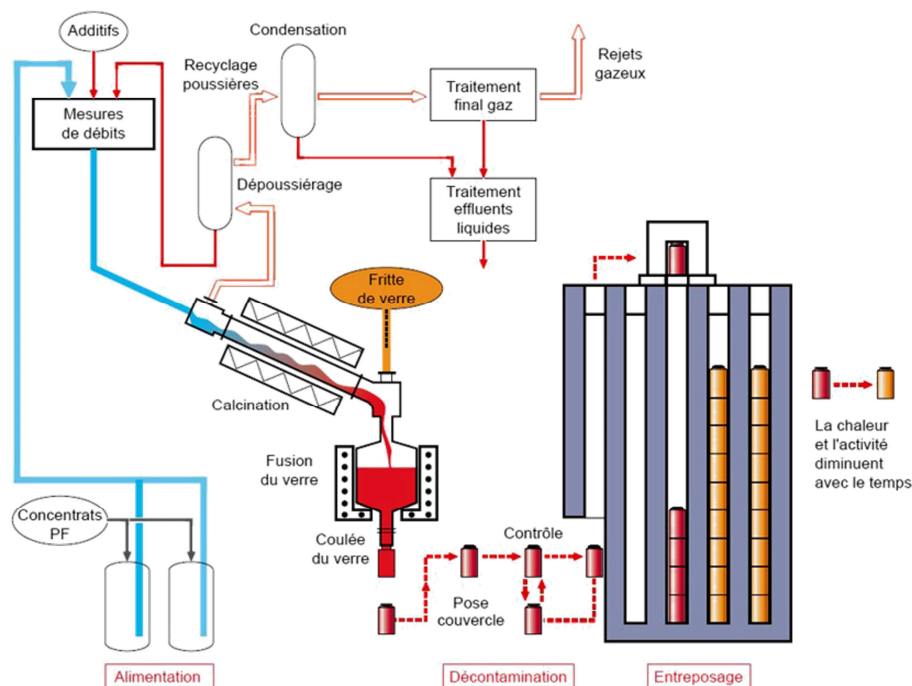


Figura 9. Esquema del proceso de vitrificación de residuos radiactivos. Cortesía de Areva.

Cementación:

La cementación es el proceso de inmovilización de residuos más comúnmente usado. Es un método barato y efectivo de confinar residuos de todo tipo, de líquidos a sólidos de toda naturaleza. El cemento ofrece una matriz estable que aísla cualquier tipo de radiación existente en el residuo del exterior. La composición del cemento puede variarse dependiendo del residuo a cementar, pudiendo así regular el PH del residuo en caso de necesitarse o añadir cualquier aditivo químico que se necesite para tratar las singularidades del residuo.

El proceso de cementación en sí mismo consiste en verter el mortero mezclado con los aditivos necesarios directamente en el contenedor de residuos. Es un proceso que se adapta muy bien a cualquier requerimiento, pudiendo cementar desde barriles de 200 litros a contenedores más grandes según se desee. Un parámetro importante a controlar en el cemento es su viscosidad. Para residuos que no puedan mezclarse con el cemento con ayuda de mezcladores se usará un cemento menos viscoso (más líquido) a fin de que penetre entre los huecos entre residuos para que la matriz quede repartida por todo el volumen de cemento [9].

Las ventajas del proceso de cementación son numerosas:

- o El cemento es un producto barato y fácil de encontrar.
- o La tecnología de cementación es bien conocida: existen numerosos métodos para tratar los distintos tipos de residuos a cementar
- o Las instalaciones no requieren de mucho espacio; pueden construirse fijas o móviles y son fácilmente adaptables a la distribución de la planta en la que se desee instalar.
- o Es un proceso totalmente automático compatible con la mayoría de contenedores normalizados.

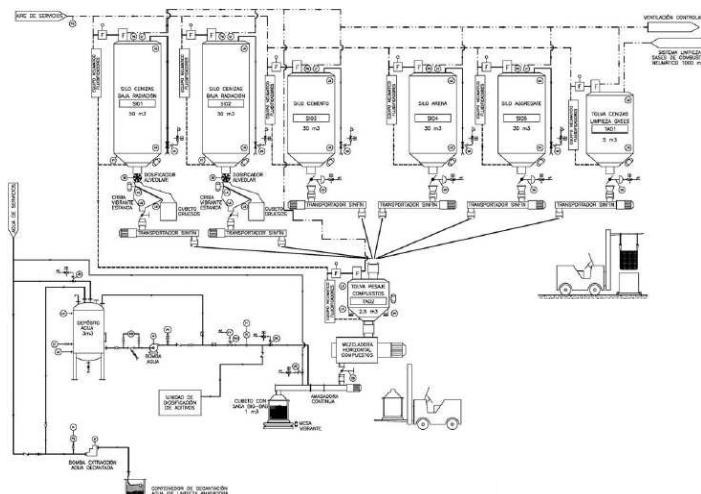


Figura 10. Ejemplos del resultado (izquierda) y el proceso (derecha) de cementación

1.3.4. Prácticas internacionales de tratado de residuos

Se ha realizado un estudio de las tecnologías utilizadas en países con especial relevancia para este proyecto. Hay países con una tecnología avanzada, con plantas de gran capacidad como las que se encuentran en EEUU Francia o Reino Unido. Estos países poseen los sistemas más avanzados de tratamiento de residuo. Son capaces de tratar los residuos generados en su territorio e incluso los generados por otros países. Otro grupo de países de especial interés son aquellos que debido a su entrada en la Unión Europea han tenido que cesar gran parte de su actividad nuclear, como es el caso de Bulgaria, Lituania y Eslovaquia. En estas ciudades se está llevando a cabo un desmantelamiento de las centrales nucleares y los centros de investigación que han tenido que ser cerrados. Estas tareas se realizan con la última tecnología y se dirigen a centros de tratamiento de nueva construcción que también poseen las más novedosas técnicas de procesado de residuos. Esto ha sido posible gracias a que los proyectos han sido subvencionados por la Unión Europea. La tecnología utilizada en esos nuevos centros de tratamiento de residuos puede usarse de referente para este proyecto. Asimismo, un proyecto referente en toda Europa en cuanto al tratamiento de residuos radiactivos se refiere es el centro de “El Cabril” localizado en la sierra de Córdoba. Tanto su tecnología como su capacidad van a ser el gran referente de este proyecto debido a las similitudes que comparten. Dicho esto se pasa a un análisis más detallado de las distintas tecnologías utilizadas por cada grupo de países [10].

EEUU, Francia y Reino Unido

El interés en el estudio de estos países reside en las tecnologías de reducción de volumen que utilizan. Normalmente estos países tienen grandes plantas para el tratamiento de los residuos, por lo que sus capacidades no pueden ser tomadas como referencia. Lo que sí es interesante es el factor de reducción de volumen que consiguen las tecnologías que utilizan.

Centrando la atención en Francia (el verdadero referente europeo en tratamiento de residuos) se observa como todas las empresas relacionadas con la energía nuclear son propiedad del estado: EDF como generador, Areva como gestor del ciclo de combustible, el CEA y ANDRA como gestor de los almacenes de residuos). Eso provoca que cada institución se especialice en una parte del proceso, teniendo plantas dedicadas especialmente a clasificación de los residuos, a tratamiento de líquidos radiactivos, grandes plantas de cementación... Toda esta red está destinada a cumplir en última estancia los criterios de aceptación de los almacenes a donde van a ir a parar los residuos tratados en cada una, ya que Francia trata residuos de otros países que poseen sus propios criterios.

Aunque los diferentes países de este grupo sigan diferentes estrategias, lo que sí tienen en común es la tecnología utilizada. Sus características principales se describen a continuación

Incineración

- Cámaras de combustión utilizadas: 2-3
- Temperatura de combustión: 850-950 °C en la cámara de combustión. Hasta 1200 °C en la cámara de postcombustion.
- Principales residuos incinerados:
 - Residuos sólidos compactos como restos de ropas de protección, guantes y plásticos varios como PVC. También residuos orgánicos como cadáveres de animales congelados procedentes de los centros de investigación.
- Ratio de reducción de volumen: 100:1

Supercompactación

- Presión de compactación típica: 2500MPa
- Fuerza de compactación máxima: 45MN (Bear Creek, EEUU)
- Ratio de reducción de volumen: de 4:1 a 10:1
- Suelen combinarse con cementación en una última fase de compactación para llenar los vacíos existentes en la nueva estructura compacta.

Merece la pena destacar las diferentes tecnologías en las que se está especializando cada país, ya que las tecnologías en las que estos se enfoquen serán las tecnologías que mas vayan a desarrollarse en un futuro.

Francia

Francia es uno de los países más avanzados en cuanto al reciclaje de residuos nucleares. Su política de ciclo cerrado de combustible hace que reprocesen todo el combustible usado en los reactores de sus centrales. Actualmente Francia tiene 58 centrales nucleares operativas. Todo el combustible es

enviado al centro de La Hague, construido y gestionado por Areva. En este centro se recicla el combustible usado, pudiendo recuperarse hasta un 95% de combustible que puede ser reutilizado en los reactores (MOX). El resto son residuos transuránicos y actínidos, todos ellos residuos de alta actividad (HLW). Francia domina el tratamiento de estos residuos. Utiliza técnicas de inmovilización (vitrificación y cementación) para minimizar la radioactividad y aumentar la seguridad en el almacenaje de los residuos generados. Una vez los residuos son inmovilizados son dispuestos en centros de almacenamiento profundo.

Con respecto a los residuos de media y baja actividad (L-ILW), el procedimiento no está tan claro. Muchas centrales tienen centros de tratamiento de residuos en sus instalaciones para tratar equipamiento de protección contaminado (por incineración). Sin embargo, los residuos provenientes de laboratorios y centros médicos no tienen unas directrices de tratamiento tan definidas como los residuos de alta radioactividad. ANDRA es la agencia gubernamental encargada de gestionar los residuos radioactivos en Francia. Gestiona todos los centros de almacenamiento definitivo y se encarga de transportar los residuos ya tratados a estos centros.

La gran mayoría de los residuos de media y baja actividad son mandados a los centros de almacenamiento superficial gestionados por ANDRA:

- Centro de l'Aube: almacena residuos de baja y media actividad. Este centro fué registrado en 1989. Cerca de este centro se encuentra el centro de Morvilliers. Es un centro dedicado al almacenamiento de residuos de muy baja actividad (<10 Bq/g) y lleva en servicio desde 2003. Aquí se tratan también residuos contaminados por Radio y partes de grafito contaminadas.
- Existe otro centro de tratamiento de LILW en Marcoule gestionado por Centraco/Socodei. Esta planta es de las únicas existentes en Francia que se dedica exclusivamente al tratado de residuos enfocado en reducir su volumen y radioactividad. En la planta hay equipos de incineración para la quema de residuos líquidos y sólidos, equipos de fundición de metales contaminados y módulos de inmovilización de los residuos resultantes de esos procesos.

Como puede extraerse se este análisis, existen pocos centros dedicados en exclusiva al tratamiento de L-ILW. En los centros en los que estos se tratan las tecnologías utilizadas son principalmente la incineración y la inmovilización del residuo, o bien por medio de vitrificación o por medio de cementación [11].

Estados Unidos

En los EEUU existen operativas 103 centrales nucleares que suman una potencia de unos 100 GWe. En la actualidad la política de combustible de los Estados Unidos es de ciclo cerrado. Reciclan y tratan el combustible gastado en las centrales nucleares así como los desechos producidos. Pero esta política lleva vigente tan solo desde 2009 y todavía hoy no está implantada del todo. Desde 1977, el tratamiento de residuos radiactivos estaba prohibido en Estados Unidos debido a la política de no proliferación adoptada por aquel entonces. El miedo remanente tras el uso de la tecnología nuclear en las guerras hizo que la aplicación de esta tecnología en el campo de la energía en EEUU se frenase en seco. Desde 1977 todo el residuo nuclear que se generase se dirigía a su inmovilización e inmediatamente posterior almacenamiento profundo. No se hacía distinción entre tipos de residuos. En la actualidad esto ha cambiado y el gobierno del país es consciente de la necesidad de tratar dichos residuos de una forma adecuada. Para poner en práctica la política de tratamiento de residuos, las agencias nucleares de estados unidos encargadas de ello (NRC, DOE) están tomando como referencia a Francia. La única diferencia es que EEUU está dando más importancia a la vitrificación como solución válida para la inmovilización de residuos, ya sean de baja o alta radiactividad. Se ha demostrado que el vidrio consigue formar una matriz muy estable y con grandes propiedades aislantes de la radioactividad, lo que convierte a la vitrificación en la tecnología de inmovilización más segura, pero a la vez la que más costes implica.

Una de las plantas de referencia en el tratado de residuos radiactivos mediante vitrificación es la situada en Hanford (Hanford VitPlant). En ella se inmovilizan mediante vitrificación tanto residuos de de alta como de baja actividad mediante las técnicas más avanzadas de fundición de óxidos de silicio en grandes hornos. Primero se separan los residuos según su radioactividad. En el siguiente paso se elimina todo el líquido contenido en los residuos. A continuación se mezcla el residuo con arena de óxidos de silicio vitrificada a 1150 °C y se deja enfriar en unas vasijas de acero inoxidable. Una vez enfriado el residuo está listo para su almacenamiento en repositorios profundos [8].

En estados unidos existen empresas dedicadas especialmente al tratamiento y almacenamiento de residuos nucleares. Una de estas empresas, punteras en el sector de tratamiento de residuos nucleares en EEUU, es Energy Solutions. Bajo la gestión de esta empresa se encuentran centros como el centro de procesamiento de residuos nucleares de Bear Creek (Oak Ridge, Tennessee). En él se tratan todo tipo de residuos. Los residuos recibidos son clasificados según su naturaleza y radiación mediante equipos de rayos X y gamma. Según esa clasificación los residuos son conducidos a diferentes líneas de tratado [12]

Compactación: Se compactan los residuos para reducir su volumen en una relación de hasta 20:1.

- Incineración: Los residuos aptos para ser incinerados reducen su volumen mediante este tratamiento hasta una relación de 200:1.
- Tratamiento específico para metales contaminados (fundición). Los residuos metálicos se funden y se reciclan para posteriores usos en la industria nuclear.
- Tratamientos de inmovilización. Los residuos procedentes de los demás procesos son inmovilizados para su correcto almacenamiento definitivo.

Otros ejemplos de plantas dedicadas al tratamiento de residuos de baja y media actividad en Estados Unidos son:

- Barnwell, South Carolina – operado por Energy Solutions;
- Richland, Washington – operado por American Ecology Corporation
- Clive, Utah - operado por Energy Solutions
- The Texas Compact Facility.

Europa del este

Los países de Europa del este poseen un gran interés ya que son de los últimos donde se han llevado a cabo proyectos de instalaciones para el tratado de residuos radiactivos. Unos por la necesidad de cumplir con las políticas europeas con vistas a entrar en la Unión, como Bulgaria, Eslovaquia o Lituania. Otros, como Rusia, merecen atención por su dilatada experiencia en materia nuclear.

Rusia

Actualmente Rusia no posee ninguna instalación que incluya todos los procesos necesarios para tratar los residuos nucleares generados por el país. Rusia se ha centrado en el tratamiento de combustible gastado de las plantas nucleares, tratando los residuos provenientes de estas en las mismas centrales con ayuda de distintas tecnologías.

En la central de Kalinin, por ejemplo, se utilizan tecnologías de incineración y compactación para tratar los residuos sólidos. Estas mismas tecnologías son utilizadas en la planta de Kolsk para el acondicionamiento de los residuos que genera su actividad. Las centrales nucleares de Leningrado y Kursk también confían en estas tecnologías para tratar sus residuos. Parece ser que la incineración en cámaras de combustión y la compactación (ya sea en dos tiempos o supercompactación) son las tecnologías más fiables para el acondicionamiento de residuos radiactivos.

Otras tecnologías más novedosas son utilizadas en otros centros de tratamiento de residuos, pero no son tan comunes. En la planta nuclear de Novovoronezh utilizan la tecnología de plasma para tratar los residuos sólidos. El horno de plasma es capaz de tratar 250 kg/h de residuos, con una reducción de volumen de entre unas 20 y 40 veces el volumen inicial. El residuo resultante es una resina

vitrificada que se dirige a cementación. Esta relativamente nueva tecnología es efectiva, pero no tan madura como la incineración tradicional.

Se están llevando a cabo investigaciones en el centro de investigación Radon de Moscú para incrementar el rendimiento de la tecnología de plasma y hacerla más atractiva. Los últimos experimentos se han llevado a cabo con una cámara de combustión cerámica con una antorcha de plasma en una atmosfera compuesta de ciertos químicos para aumentar su potencia de desintegración. Se intenta integrar esta tecnología con la vitrificación para el tratamiento del residuo final. Es un horno pequeño, con una capacidad de 60 kg/h que permite tratar tanto residuo sólido como líquido. Su finalidad ahora mismo es experimental.

También existen instalaciones pioneras en el tratamiento de residuos metálicos que normalmente son difíciles de tratar y suelen direccionarse a inmovilización ya que su tratamiento suele ser caro. En la planta Ekomet-S los residuos metálicos se funden en un horno de inducción que posee una capacidad de 5000 toneladas/año. Se sigue estudiando si este tipo de tecnología sale rentable para tratar residuos metálicos, o si es mejor simplemente inmovilizarlos con cemento [10].

Eslovaquia, Bulgaria y Lituania

Estos tres países son un ejemplo de país al que va dirigido este proyecto. Son países con limitadas infraestructuras para el tratado de residuos, que para entrar en la unión europea fueron obligados a dismantlar todos sus reactores RBMK y VVER. A fin de llevar esto a cabo tuvieron que construir nuevos centros que permitiesen que el dismantelamiento se realizase de una forma segura.

En Eslovaquia, por ejemplo, se aprovechó la oportunidad para implementar nuevas tecnologías y así probar su funcionalidad real. El centro de tratamiento de residuos radiactivos de Bohunice es un magnífico ejemplo del tipo de infraestructuras que se desarrollaron. Este centro contiene todas las tecnologías necesarias para el tratamiento de residuos nucleares en una sola localización: Una zona de clasificación de los residuos recibidos, una zona de compactación con prensa de alta presión, una instalación de incineración para residuos tanto sólidos como líquidos y una instalación de cementación para el acondicionamiento final de los residuos. El resultado del paso de los residuos por el centro son contenedores de hormigón reforzado que contienen todos los productos de los residuos tratados perfectamente inmovilizados en cemento y listos para ser transportados a los repositorios nacionales de almacenamiento de residuos radiactivos.

Otra planta que dio muy Buenos resultados a la hora de tratar residuos líquidos es la planta de bituminización del mismo centro de Bohunice. Se puede utilizar la experiencia en este campo para tratar los residuos líquidos que puedan obtenerse como producto no deseado de otros procesos como la compactación.

En Bulgaria se experimentó con una instalación revolucionaria por aquel entonces (año 2007), una instalación de arco de plasma para el tratamiento de residuos radiactivos. La instalación de Kozloduy utiliza un haz de plasma a aproximadamente 5000 °C para desintegrar tanto material orgánico como inorgánico y convertirlo en un fango vidrioso que contiene los isótopos radiactivos. Este horno de plasma de 500 kW de potencia es capaz de tratar 250 toneladas /año de desechos.

Acerca de Lituania cabe destacar que la construcción de sus instalaciones fue la más austera pero más efectiva. En la central nuclear de Ignalina se construyó un pequeño centro de tratamiento de residuos radiactivos que incluía una instalación para la cementación de residuos con cemento activo y una instalación de compactación de residuos mediante una prensa de baja fuerza de prensado. Esta sencilla instalación permite tratar 450 m³ de líquido radiactivo al año por medio de cementación. Además la pequeña prensa de 70 toneladas permite tratar residuos contaminados como algodón, papel, fragmentos de cables, filtros, gomas, aislantes térmicos y piezas de equipos reparados que necesitan de un tratamiento previo antes de ser almacenadas [10].

España

España no es un país puntero en tecnología nuclear ni uno de los que más invierte en ella. Sin embargo cuenta con un centro de tratamiento de residuos de media y baja actividad que es referente mundial en este tipo de instalaciones. Es el centro de “El Cabril” situado en la provincia de Córdoba. En él se tratan residuos de baja y media actividad (LILW) procedentes tanto de la operación de centrales nucleares como de pequeños productores como hospitales o centros de investigación. El Cabril tiene un avanzado centro de tratamiento de residuos que consta de módulos de clasificación de residuos para su direccionamiento hacia el centro de tratamiento que más se adapte a la naturaleza del residuo. El centro del Cabril cuenta con las siguientes tecnologías:

Un incinerador de dos cámaras, con una cámara de combustión donde se alcanzan 900°C y una de postcombustión que puede llegar a 1150°C. Posee una capacidad de 50 kg/hora. En el incinerador se tratan residuos incinerables de distinta naturaleza; desde ropa de trabajo contaminada, contenedores plásticos contaminados, cadáveres de animales, etc.

La compactación de residuos se realiza por medio de una supercompactadora con las siguientes características:

- Fuerza de compactación: 1200 toneladas
- Factor de reducción de volumen: 3
- Capacidad: 5 bidones (de 220L) a la hora
- Sistema de drenaje incorporado

Para la inmovilización de los residuos se utiliza cementación en contenedores de 11m³ de 15 cm de espesor de pared. Estos contenedores pueden albergar dos alturas de 9 bidones de 220L ya tratados. Para cementar los bidones se utiliza una cementación con mortero en dos pasos, un primer paso en el que se utiliza líquido activo (procedente del drenaje de la compactadora y demás procesos) y un último paso en el que se completa el llenado con líquido no radiactivo. Esta última capa servirá también para sellar contenedor.

Por su similitud con el proyecto que se desea llevar a cabo, el Cabril se toma como obra de referencia [13].

Resumen sobre los países estudiados

Después de haber estudiado a fondo las tecnologías utilizadas en los principales países de referencia en el tratado de residuos radiactivos se puede concluir que las tecnologías más utilizadas en el sector son:

Incineración tradicional con combustible en varias cámaras de combustión para residuos incinerables. Las cenizas resultantes se llevarán a cementación. También debe evaluarse la posibilidad de utilizar la tecnología de plasma para la incineración de residuos.

Compactación en dos tiempos o supercompactación para reducir el volumen de los residuos compactables. Se evaluará más adelante cual es la tecnología más adecuada para el Edificio Tecnológico.

Cementación con mortero para inmovilizar los residuos y acondicionarlos para su almacenamiento final. La vitrificación se descarta debido a que es una tecnología cara y poco madura, además de no ser eficiente ya que está diseñada para inmovilizar residuos de alta actividad que en ningún caso van a tratarse en el edificio tecnológico. Sería beneficioso considerar una instalación de cementación versátil que pudiese incorporar líquido radiactivo derivado de otros procesos para poder tratar todo en un mismo proceso. Se deberá evaluar el riesgo de esta instalación conjunta. La bituminización es otra tecnología que admite tratamiento de residuos líquidos y también será considerada.

Capítulo 2.

Definición del Edificio Tecnológico.

En este apartado se definirá el alcance del diseño del edificio tecnológico. También se especificarán sus características, sus criterios de aceptación, hipótesis de partida y demás aspectos técnicos relevantes para llevar a cabo el proyecto.

2.1. Hipótesis de partida.

2.1.1. Definición de la actividad nuclear del país.

El diseño del edificio tecnológico tiene como fin valer de referencia para proyectos similares que quieran llevarse a cabo en países la Unión Europea. Por esta razón es por la que se toma como hipótesis de partida una situación que intenta reflejar una situación nuclear estándar de los países europeos. Esta hipótesis servirá para estimar las fuentes de residuos radiactivos del país tipo y poder clasificarlos según sean o no susceptibles de ser tratados en el Edificio Tecnológico. La estimación de las fuentes de residuos radioactivos se realizará basándose en informes sobre la actualidad nuclear de diferentes países realizados por la Agencia Internacional de la Energía Atómica (IAEA).

La hipótesis de partida planteada es la siguiente:

- Extensión: 500.000 Km².
- Fuentes de residuos:
 - 5 centrales nucleares activas
 - Actividades de desmantelamiento de centrales
 - 2 centrales nucleares en desmantelamiento
 - Remediación y acondicionamiento del terreno
 - Residuos históricos acumulados
 - 2 reactores de investigación
 - Centros de investigación nuclear

Otra fuente de residuos radiactivos que se ha decidido tener en cuenta debido a su relevancia en los últimos años es el de los residuos provenientes de un posible accidente nuclear. En los últimos accidentes nucleares acontecidos (Fukushima, Chernóbil) quedó demostrada la falta de capacidad de tratamiento de los residuos inmediatos generados. Con

el fin de dar solución a este posible escenario también se contemplarán para el dimensionamiento del Edificio Tecnológico los residuos producidos por un posible accidente nuclear en alguna de las centrales que operan en el país.

2.1.2. Definición de los criterios de aceptación del Edificio Tecnológico.

A fin de conseguir un mejor tratamiento de los tipos de residuo recibidos en el Edificio Tecnológico, los procesos de tratamiento se enfocarán a una serie de residuos en particular. El edificio se diseña con idea de formar parte de un mayor complejo en el que existan centros de tratamiento para los residuos no aceptados en él, así como centros de almacenamiento para los residuos procesados tal que minimicen el tiempo del ciclo de tratamiento de los residuos radiactivos.

El tipo de almacenamiento considerado es el almacenamiento superficial en celdas de hormigón. Este almacenamiento restringe el tipo de residuos tratados a residuos de baja (LLW) y media (ILW) actividad. Los residuos de alta actividad solo pueden almacenarse en almacenes geológicos profundos.

Dentro de los residuos de media actividad se comprobará en el sistema de recepción de residuos que no sobrepasen un nivel de actividad de 10^5 kBq/kg (tasa de dosis en contacto $< 20\text{mSv/h}$)

Otro criterio a cumplir por los residuos recibidos en el Edificio Tecnológico es que la naturaleza de estos debe ser sólida. Se aceptarán principalmente residuos sólidos en las distintas líneas de tratamiento. La planta se diseñará para ser capaz de tratar cierto tipo de residuos líquidos, como líquidos orgánicos o líquidos compatibles con el mortero de la cementación. Este criterio se impone ya que la clasificación y el posterior tratamiento de residuos líquidos requiere de líneas de proceso más complejas que no pueden ser incluidas en el Edificio Tecnológico por restricciones de espacio. (Clasificación de los distintos tipos de líquido es más compleja, regulación de PH, necesidad de mayor protección contra fugas).

- Criterios de aceptación de residuos

- Se tratarán solamente residuos clasificados LLW
- Se tratarán solamente residuos sólidos
- Solo se reciben residuos en dos formatos normalizados: contenedores CE-2a y bidones de 220L

- Edificio abierto a recepción de residuos 175 días/año. La recepción cada primera y tercera semana de cada mes.

Se dispondrá de un sistema de clasificación preliminar situado a la entrada del edificio que verificará que los residuos que llegan cumplen los requisitos necesarios. De no ser así no serán admitidos en el Edificio Tecnológico, serán devueltos al propietario.

2.2. Inventario de residuos radiactivos del país.

Según las hipótesis de partida y aplicando los criterios de aceptación de residuos se han identificado las siguientes fuentes de residuos nucleares:

- Residuos provenientes de remediación del terreno: Almacenes de residuos nucleares o sitios contaminados que están siendo reacondicionados. Crean gran cantidad de residuos sólidos de baja y media actividad.
- Residuo histórico del país pendiente de ser tratado: Residuo de baja actividad que ha sido acumulado a lo largo de los años a la espera de ser procesado para su almacenamiento final.
- Residuos provenientes de un posible accidente nuclear: depende de la causa del accidente. En este caso se supone un accidente en el núcleo del reactor, al ser el accidente más frecuente en los últimos años. Este tipo de accidentes contamina gran cantidad de los materiales del reactor, los cuales son difícilmente tratables por métodos tradicionales.
- Residuos provenientes de centros de investigación.
- Residuos provenientes de reactores de investigación
- Residuos de operación de centrales: las centrales enviarán tan solo residuos no procesables que estén destinados a cementación. Los residuos incinerables y compactables que produzcan se supone que se tratarán en las mismas centrales nucleares, como es costumbre.
- Residuos de desmantelamiento de centrales: es de gran importancia debido a las nuevas situaciones de desnuclearización que se están dando como requisito en países candidatos a unirse a la Unión Europea. Su residuo suele clasificarse como no procesable debido a que se trata de escombros y demás residuo sólido árido que una vez fragmentado (in situ) no puede reducir más su volumen por los métodos elegidos.

Se realizará el inventario tan solo de los residuos sólidos generados por un país, ya que son los de interés para este proyecto.

Gracias a que ya se conocen las tecnologías elegidas para tratar los residuos recibidos en el edificio tecnológico, se hará una clasificación de los residuos en incinerables, compactables o no procesables (estos irán directos a cementación).

Todos los datos numéricos han sido obtenidos de estimaciones hechas en base a los inventarios de residuos radiactivos de países considerados de interés para el proyecto (Eslovaquia, Bulgaria, Ucrania, Turquía, Hungría, Croacia, Francia) publicados oficialmente por la IAEA. [14]

En una primera clasificación se identifican los residuos totales producidos por el país considerado en la hipótesis en un periodo de 50 años (hasta 2067). Esto se hace así puesto que la IAEA realiza inventarios a 50 años para controlar el residuo producido por los países a largo plazo con fin de dimensionar la capacidad de tratamiento necesaria a día de hoy. Estos han sido clasificados según el proceso por el que pueden ser tratados y según su nivel de actividad (Tabla 5)

Productor de residuos	LILW, miles de m3										HLW miles de m3	Total Residuo sólido miles de m3
	Incinerable			Compactable			No procesable			Total LILW		
	LLW	ILW	Sub-total	LLW	ILW	Sub-total	LLW	ILW	Sub-total			
Remediación terreno	1	5	6	52	12	64	19	77	96	166	-	166
Histórico (Acondicionamiento)	1	15	16	14	26	40	34	121	155	215	80	291
Residuos provenientes accidente	-	-	-	-	-	-	25	22	47	47	8	55
Centros & Reactores Investigación	4	-	4	8	-	8	5	-	5	5	0,2	17
Residuos de operación de centrales	7	-	7	4	-	4	36	5	41	53	0,2	53
Residuos de desmantelamiento centrales	-	-	-	-	-	-	22	46	132	132	13	145
Total contando LL-W	14	20	33	78	38	116	140	266	475	617	100	726
Total sin LL-W	14			78			140					
TOTAL residuos tratables en ET	232											

Tabla 5. Predicción de los residuos producidos por el país objeto de estudio hasta 2067

Del inventario total de residuos del país se debe hacer distinción entre el inventario tratable en el edificio tecnológico y el que no es posible tratar en el mismo. Debido a las características del edificio que se está diseñando, este no tratará residuos de media actividad (ILW) ni de alta actividad (HLW).

En la siguiente tabla se resume la cantidad de residuos a ser tratados en el edificio tecnológico por año.

	Unidad de medida	TOTAL	Incinerable	Compactible	Metal	No procesable
Residuos desmantelamiento de centrales						
Residuo Sólido Anual	bidones/año	2222	-	-	-	2222
	m ³ /año	444,4	-	-	-	444,4
Residuos centrales nucleares						
Residuo Sólido Anual	bidones/año	3570	-	-	-	3570
	m ³ /año	714	-	-	-	714
Actividades de remediación (residuo histórico + acondicionamiento + accidente)						
Residuo Sólido Anual	m ³ /año	3015,6	40	1240	180	1555,6
	t/año	3468,0	46	1426	207	1789,0
Reactores de Investigación						
Residuo Sólido Anual	m ³ /año	3,3	1,2	1,2	0,2	0,8
	t/año	3,8	1,4	1,3	0,2	0,9
Centros de investigación nuclear						
Residuo Sólido Anual	m ³ /año	333,3	86,684	160,032	20,004	66,68
	t/año	386,6	100,516	185,568	23,196	77,32
TOTAL recibido en ET	m ³ /año	4510,8	127,884	1401,232	200,204	2781,48
	t/año	-	147,916	1612,868	230,396	-

Tabla 6. Inventario de residuo anual a recibir en el Edificio Tecnológico

Se puede observar en la Tabla 6 que la fuente que más residuos envía a ser tratado en el edificio tecnológico es el almacén de residuo histórico del país, junto con el residuo de acondicionamiento de antiguos almacenes y el reservado a un posible accidente. Es lógico pensar que si en residuo nuclear ha estado almacenándose de manera errónea desde que el país empezó a utilizar la energía nuclear, exista residuo acumulado de al menos 50 años que haya que acondicionar. El residuo proveniente de esta fuente supone más del 60% del residuo que va a ser tratado en el edificio tecnológico.

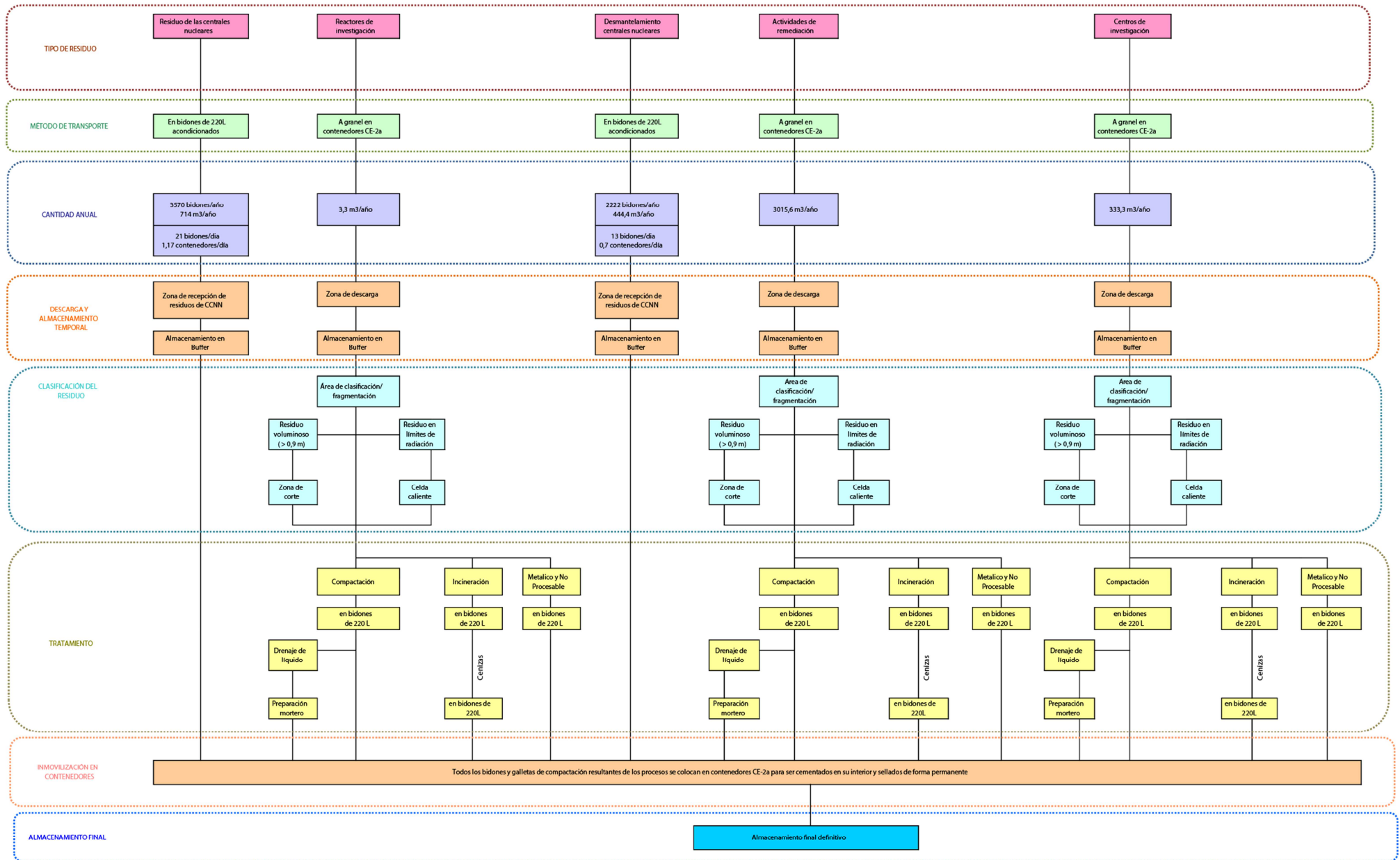
La siguiente fuente que más residuo aporta para ser tratado es la de operación de las centrales nucleares. Las centrales nucleares son las instalaciones nucleares más utilizadas, por lo que tiene sentido que su flujo de residuos a tratar sea importante. El residuo de estas centrales llegará al edificio tecnológico listo para cementar, ya que las centrales nucleares tratan sus propios residuos, pero no los inmovilizan. Esto facilita mucho las labores de tratamiento de estos residuos. Lo mismo pasa con los residuos proveniente del desmantelamiento de centrales nucleares.

El residuo proveniente de reactores nucleares de investigación es muy pequeño. Son reactores experimentales de pequeño tamaño en los que se realizan pruebas periódicas, con lo que el residuo producido por ellos es pequeño. Aun así es un residuo que es susceptible de tener los niveles más altos de radiación de todos los recibidos en el edificio y habrá que monitorearlo cuidadosamente cuando sea recibido.

De los residuos recibidos de los centros de investigación cabe destacar que son los principales productores de residuo incinerable. Esto es debido a la experimentación sobre el poder de penetración de las distintas partículas radiactivas en materiales orgánicos. También se hacen pequeñas pruebas con animales, con cadáveres y demás experimentos que producen residuos biológicos que deben ser incinerados.

Todos los residuos que no sean los provenientes de centrales nucleares vendrán mezclados en contenedores a la espera de ser clasificados y tratados en el edificio tecnológico. Los contenedores siempre traerán consigo la identificación del origen del que provienen.

A modo ilustrativo se incluye en la página siguiente un diagrama de flujo para ayudar a la comprensión del proceso de recepción de residuos y la distribución de los residuos en las diferentes líneas hasta que abandonan el complejo.



2.3. Selección de tecnologías.

Basándose en el análisis de las distintas técnicas de tratamiento de residuos realizado en la sección 1.3.3. , se procede a elegir definitivamente las tecnologías que van a formar parte de las líneas de tratamiento del Edificio Tecnológico.

2.3.1. Criterios de selección.

La presión máxima teórica alcanzada en la cámara de combustión puede calcularse resolviendo el ciclo Otto que sigue el motor.

2.3.2. Métodos de selección: Matriz multiatributo.

El objetivo de este apartado es el de elegir las tecnologías adecuadas para el tratamiento de los residuos recibidos en el edificio tecnológico en base a una serie de requisitos. Cada tecnología existente se evaluará mediante un análisis multiatributo. Se realizará conjuntamente un análisis cualitativo de cada tecnología con el fin de elegir la más apropiada comparando con las tecnologías usadas en otros países y los datos recogidos de cada una.

Tas tecnologías evaluadas en el análisis multiatributo son aquellas directamente relacionadas con el acondicionamiento de los residuos radiactivos recibidos. Estas suponen la mayor parte de la inversión inicial del proyecto y es por eso que deben de ser cuidadosamente e seleccionadas. Se evaluarán las tecnologías concernientes a los procesos de reducción de volumen e inmovilización, quedando fuera del análisis las tecnologías a utilizar para los procesos de clasificación, manipulación y fragmentación del residuo.

Se ha considerado que la mejor manera de elegir las tecnologías más adecuadas para el tipo de edificio tecnológico que se desea construir es someter a las tecnologías existentes a diversos análisis técnicos, no técnicos y económicos mediante los cuales quedará justificada la elección final. Los criterios de estos análisis se detallan más adelante. Han sido elegidos siguiendo el propósito general del edificio diseñado. No es un centro de investigación, son un edificio funcional que debe rendir a su máxima capacidad una vez esté listo para entrar en funcionamiento. Es por eso que las tecnologías de tratamiento elegidas han de ser maduras, eficientes y seguras.

El análisis multiatributo consiste en fijar una serie de criterios y asignar un peso a cada uno de ellos. Se aplicarán los criterios a las diferentes tecnologías, dando como resultado un conjunto de puntuaciones según cumplan o no, y según el peso asignado a cada requisito. Como resultado final se evalúa la puntuación de cada tecnología y la que haya obtenido una puntuación más alta será la elegida para ser incorporada a la línea de proceso.

Definición de los distintos criterios de evaluación

Se ha considerado que los criterios más importantes para elegir las tecnologías adecuadas son los indicados a continuación. Estos han sido elegidos basándose en la experiencia de la sección nuclear de Empresarios Agrupados, con años de experiencia en proyectos de tratamiento de residuos. Su elección también está justificada según el desarrollo de cada tecnología comprobado con estudio hecho de estas mismas, además de la disponibilidad de proveedores que suministren dichos equipos.

Criterios no técnicos

Con criterios no técnicos se refiere a todos los criterios aplicables que no tienen relación con los aspectos técnicos de las tecnologías, por ejemplo requisitos legales y regulatorios de cada país. El mundo nuclear está regido por una serie de normas estrictas que deben cumplir los equipos. Estos criterios son importantes debido a que tecnologías que pueden ser la mejor opción técnica pueden no cumplir las regulaciones del país en cuestión. Las tecnologías tienen que cumplir con la regulación vigente acerca del tratamiento de residuos radiactivos. Como regulación de referencia se tomará la regulación fijada por el Consejo Europeo en la directiva 2011/70/EURATOM. Esta directiva establece unas pautas para el tratamiento de residuos nucleares pero concluye en que cada país debe formar su propio marco legislativo reglamentario y organizativo a nivel nacional para clarificar de forma inequívoca el procedimiento a seguir para un correcto tratado de los residuos. En este proyecto se tiene en cuenta el cumplimiento de las normas generales de la Unión Europea, sin entrar en especificaciones de cada país, que se suponen como versiones de las directivas generales [15].

La condición de licencias para el proyecto es otro aspecto no técnico a tener en cuenta. Los proyectos relacionados con el tratamiento de residuos requieren de permisos para la construcción, puesta en marcha, operación y desmantelamiento de las nuevas instalaciones. El este análisis se tendrá muy en cuenta la facilidad para conseguir licencias de las tecnologías evaluadas, ya que esto agiliza enormemente el proceso y acorta los plazos del proyecto.

El nivel de exposición a la radioactividad que requiere la operación de las distintas tecnologías es también evaluado. Se preferirán las tecnologías cuyos procesos puedan automatizarse fácilmente para ser operados en remoto. De esta manera se reducirá la exposición del personal involucrado.

El control de la radiación es un punto clave en el proceso de acondicionamiento de residuos radiactivos. La regulación europea es muy estricta en estos términos. Tecnologías que permitan una monitorización de estos niveles, así como asegure un proceso de operación que limite el peligro radiológico que supone la manipulación de los residuos a tratar, serán de especial interés [16].

Criterios técnicos

El principal objetivo de las tecnologías elegidas para el Edificio Tecnológico es que puedan acondicionar el residuo de la forma más efectiva posible. Los factores que se han considerado más relevantes para la determinación de la efectividad de cada tecnología se indican a continuación.

Residuo Radiactivo que es capaz de tratar

Las tecnologías que han sido ideadas para tratar un tipo específico de residuo son más efectivas que las que han sido concebidas para tratar diferentes tipos. En el caso de este proyecto, los residuos a tratar están bastante delimitados (residuos sólidos de baja actividad), no obstante nunca viene mal contar con cierta flexibilidad ya que los centros productores de residuos no siempre realizan una separación concienzuda de los distintos residuos y pueden acabar infiltrándose residuos de otra naturaleza en un proceso que no les corresponde. Otra ventaja de los tratamientos que pueden tratar varios tipos de residuos es que siempre serán más económicos que adquirir varios equipos para tratar distintos residuos. También un solo equipo ocupará menos espacio. Incluso puede ocurrir

que poder tratar varios tipos de residuos a la vez reduzca el coste de tener que separarlos cuando este proceso es difícil.

La flexibilidad del equipo por tanto será bien valorada a la hora de puntuarlo, sin embargo no será un factor determinante.

Capacidad de procesamiento de residuos.

Este criterio hace referencia a la cantidad de residuo que puede tratar una determinada tecnología. Cuanta más capacidad tenga una tecnología mejor valorada será esta.

También hace referencia a la capacidad mínima necesaria para que una tecnología salga rentable. Existen tecnologías que no pueden ser aplicadas para volúmenes pequeños de residuos ya que no son económicamente eficientes. También puede pasar al contrario, que tecnologías sean muy efectivas para cantidades pequeñas de residuos pero no sean escalables a mayores cantidades (por ejemplo procesos que requieran de una manipulación manual por parte de los operarios). Este es otro aspecto importante a tener en cuenta.

En definitiva, este factor medirá que la capacidad de la tecnología sea adecuada a la cantidad de residuo que se quiere tratar.

Madurez de la tecnología

El nivel de desarrollo de una tecnología es un factor de gran importancia a la hora de elegir entre varios candidatos. Una tecnología muy desarrollada y asentada implica que el conocimiento que se tiene de ella es mayor (menos costes y pérdidas de tiempo en operaciones de mantenimiento; los procesos están optimizados, el coste de operación es menor y suele poder adaptarse mejor a las distintas necesidades de cada proceso concreto.

Muchas veces una solución novedosa es mejor que una solución tradicional (i.e. vitrificación de residuos radiactivos de alta actividad). Sin embargo en otras ocasiones es mejor buscar un compromiso entre innovación y rendimiento. Debido al grado de desarrollo de ciertas tecnologías también se evitan riesgos ya que no hay que olvidar que los residuos manejados son peligrosos.

Generación de residuos secundarios

Se ha de evaluar para cada tecnología el equipamiento necesario para tratar los residuos secundarios provenientes de su proceso. Un proceso de incineración, por ejemplo, necesita de un sistema off gas que trate los residuos gaseosos de la combustión asegurando que ningún tipo de radiación es liberada al exterior. Estos procesos secundarios de tratamiento aumentan la complejidad de la

instalación así como su coste final. Se deberán elegir las tecnologías finales teniendo en cuenta las necesidades que acarrea su uso.

Mantenimiento

Procesos tecnológicos complejos pueden ser más eficientes que los simples, pero ha de tenerse en cuenta el tiempo y coste perdidos en sus labores de mantenimiento.

Reducción de volumen

La reducción del volumen de los residuos tratados es una de las principales razones de diseño del Edificio Tecnológico y por eso será uno de los factores de más importancia. De la reducción de volumen depende la eficiencia de la instalación, ya que una mayor reducción de volumen supone un mayor aprovechamiento de los depósitos de almacenaje final.

Calidad del residuo resultante

El residuo resultante de los procesos elegidos debe de ser apto para ser enviado a los depósitos de almacenaje final. Los residuos últimos tienen que cumplir los criterios de aceptación fijados por el almacén situado en el mismo complejo. Es por eso que tecnologías que devuelvan un residuo listo para ser enviado serán las preferidas. No basta solo con un buen coeficiente de reducción de volumen.

Espacio requerido

Se valorará positivamente que los equipos tengan unas dimensiones lo más reducidas posible, ya que el espacio en el edificio tecnológico es una restricción importante.

Criterios económicos

Otro factor claro a tener en cuenta en la elección de los equipos es el factor económico. Los costes de adquisición, operación y mantenimiento de las tecnologías finalmente elegidas tienen que adecuarse a las limitaciones económicas impuestas por el presupuesto del proyecto. A priori no va a ser un factor determinante pero se convertirá en un factor diferencial en última instancia, cuando se evalúe el coste del proyecto.

Los costes fundamentales considerados son los siguientes:

Costes de adquisición

Se compararán los costes de adquisición, puesta en marcha y de formación de personal necesarios para cada equipo.

Costes de operación

Estos costos engloban los costes directos de operación de los equipos, así como los recursos necesarios para hacerlos funcionar (materiales empleados, como el vidrio o cemento en caso de la inmovilización, coste de los operarios necesarios para manejar la máquina, etc.). También se engloban en este apartado los costes de los repuestos y el mantenimiento de los equipos.

Costes de almacenamiento del residuo resultante

Hacen referencia a los costes asociados al postratamiento de los residuos resultantes del proceso llevado a cabo por cada equipo. Un ejemplo puede ser el tratamiento de las cenizas producto de la incineración. Estos desechos tienen que acondicionarse para poder ser trasladados al almacén final, con los costes que eso conlleva.

Asignación de pesos a los diferentes factores

El análisis multiatributo que se va a llevar a cabo requiere de una asignación de pesos a los distintos factores diferenciados anteriormente. Este peso se asigna según la importancia que tenga cada factor para el desarrollo del proyecto. En las siguientes líneas se procede a la asignación de pesos a los distintos factores, a la vez que se describe la lógica detrás de esa asignación.

Evaluación de los criterios no técnicos

Los criterios no técnicos hacen referencia a las restricciones legales de cada país que puedan suponer el bloqueo de cierta tecnología por no estar aprobada por la regulación de ese país. Este criterio supondrá un primer filtro para cada tecnología. A priori se supone que la mayoría de tecnologías evaluadas han sido aprobadas para su uso en la Unión Europea, luego no debería desecharse casi ninguna por este motivo.

El factor “Cumplimiento de las políticas y la regulación de tratamiento de residuos” tiene en cuenta las técnicas que están siendo utilizadas en la actualidad para procesar residuos radioactivos, las políticas de almacenamiento de los residuos finales generales de la UE, la normativa de seguridad aplicable en este campo y las normativas de calidad que regulan el sector.

La exposición ocupacional se refiere al número de personas necesarias para operar el equipo, el impacto que esa máquina tiene en el personal. Es otro criterio importante a considerar aquí, ya que la seguridad de los operarios y de todo el personal del edificio es un factor primordial en toda instalación nuclear. No obstante se considera que los equipos a elegir cumplen con todas las normativas de seguridad impuestas a los fabricantes del sector, por lo que no será el factor no técnico más importante.

El peligro potencial de la tecnología en caso de fallo es otro factor no técnico tenido en cuenta en el análisis. Se refiere a los sistemas de protección que incorpora el equipo en cuestión. También se asume los equipos destinados a fines nucleares llevan incorporados los sistemas necesarios para contener posibles fugas de radiación derivadas de un accidente, por lo que se evaluarán las prestaciones extra que pueden ofrecer. Se da a entender que no es un factor de gran peso en la decisión.

El aspecto más importante considerado en este apartado de criterios no técnicos es el de licencias, es decir, la facilidad de licenciar la inclusión de la tecnología evaluada en el proyecto. Esto es debido a que se trata de un `proyecto que pretende ser adaptable países de la UE que requieran de este tipo de instalaciones, por lo que cuanto más estandarizado y fácil sea el proceso de licencia de los equipos, mejor será la adaptabilidad total del proyecto.

Los pesos asignados a cada factor según lo discutido anteriormente quedan reflejados en la Tabla 7.

Criterio de evaluación	Peso
Licencias	40%
Cumplimiento de las políticas y la regulación de tratamiento de residuos	20%
Exposición ocupacional	20%
Peligro potencial	20%
Total	100%

Tabla 7. Pesos de los criterios no técnicos del análisis multiatributo

Evaluación de los criterios técnicos

El fin técnico último del edificio tecnológico es acondicionar los residuos para que puedan ser almacenados de la forma más eficiente en los almacenes definitivos. El acondicionamiento implica en su mayor parte la reducción de volumen del residuo. Es por eso que el factor de reducción de volumen se ha considerado el atributo más importante dentro de los criterios técnicos.

Un factor importante es el dimensionamiento correcto de los equipos a utilizar en el edificio tecnológico. A este se refiere con “capacidad de procesamiento de residuos”. Un sobredimensionamiento de los equipos incurriría en unos sobrecostes de adquisición innecesarios. Por el contrario, un ahorro de costes que suponga un dimensionamiento insuficiente de los equipos provocará colapsos e ineficiencias en las líneas de proceso del centro. Por eso es que se le ha asignado el segundo peso más importante a este factor.

Otro factor técnico importante es el del uso de tecnologías maduras. Las tecnologías maduras poseen un mayor know-how, hay más experiencia en su uso, lo que otorga mayores facilidades de adaptación de esa tecnología a las necesidades del edificio tecnológico, a la vez que reduce todos los costes asociados a su instalación, operación y mantenimiento. El edificio tecnológico no persigue

utilizar la última tecnología, sino ser lo más eficiente y adaptable posible. Tecnologías maduras también tendrá un proceso de licencia más normalizado. Por todo esto este factor ha sido ponderado con el segundo peso más alto en el análisis técnico.

“Calidad del residuo resultante” y “Residuo radiactivo que es capaz de tratar” y son dos factores técnicos muy relacionados con el coste y con la versatilidad de la instalación. Nos son ningún factor crucial en sí mismos pero contribuyen a la adaptabilidad del proceso. Por eso han sido ponderados con un 15% y un 10% del peso total de los criterios técnicos respectivamente.

Los criterios restantes (Generación de residuo secundario, espacio requerido y mantenimiento) son ponderados con un 10%, 7% y 6% respectivamente.

Criterio de evaluación	Peso
Reducción de volumen	22%
Capacidad de procesamiento de residuos	15%
Madurez de las tecnologías	15%
Calidad del residuo resultante	15%
Residuo radiactivo que es capaz de tratar	10%
Generación de residuo secundario	10%
Espacio requerido	7%
Mantenimiento	6%
Total	100%

Tabla 8. Pesos de los criterios técnicos del análisis multiatributo.

Evaluación de los criterios económicos

Los costes más importantes son, sin lugar a duda, los costes asociados al almacenaje del residuo resultante. Es por esto que se invierte en hacer un Edificio Tecnológico que reduzca el volumen de los residuos a almacenar, para recortar los grandes costes que implica almacenar residuos radiactivos. Estos han sido ponderados con el peso más importante de esta sección de criterios: un 50%.

Los segundos costes más importantes para la elección de los equipos son los asociados a su adquisición. Se busca siempre la eficiencia, una tecnología que del resultado esperado a una menor inversión inicial. Se ha otorgado a los costes de adquisición un peso del 30%.

Los costes de operación se ponderan por tanto con el porcentaje restante, un 20%.

Criterio de evaluación	Peso
Costes de almacenaje del residuo resultante	50%
Costes de adquisición	30%
Costes de operación	20%
Total	100%

Tabla 9. Pesos de los criterios económicos del análisis multiatributo.

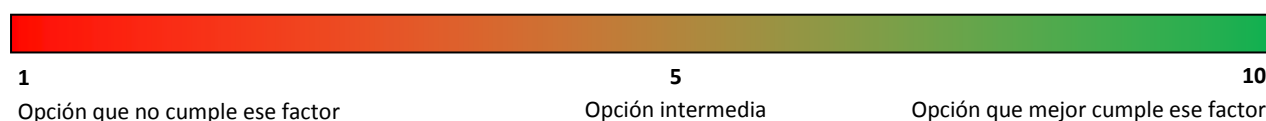
Comparación de criterios.

Los criterios se aplicarán de la siguiente manera: primero se aplicarán los criterios no técnicos para desechar las opciones que no cumplan con la regulación europea. Una vez se hayan descartado la primeras tecnologías se procederá a aplicar los criterios técnicos para conseguir filtrar las tecnologías viables para el proyecto. El criterio económico servirá para hacer una selección final de las tecnologías a implantar en el edificio.

Elaboración del análisis multiatributo

Con el propósito de evaluar con la mayor precisión posible cada tecnología se utiliza una escala del uno al diez para evaluar cada alternativa. Esa nota será la que se pondere. Al sumar los resultados obtenidos en cada uno de los factores de cada criterio se obtendrá una nota final para ese criterio. La comparación de las notas finales en cada criterio revelará la mejor alternativa, que será la de nota más alta.

La escala de valores indica:



Antes de empezar con el análisis se va a hacer una preselección de tecnologías a analizar de todas las expuestas en el estado del arte. Las tecnologías apropiadas para el tratado de residuos de baja actividad y que por tanto son candidatas a formar parte de la línea de proceso del edificio tecnológico son:

Para compactación:

- Compactadora estándar en dos tiempos (fuerza baja + fuerza alta)
- Supercompactadora

Para residuo sólido incinerable:

- Incineración
- Plasma
- Inmovilización directa sin tratamiento

Para inmovilización:

- Cementación con líquido activo
- Cementación con líquido inactivo
- Bituminización

El resultado de la evaluación de estas tecnologías según los criterios expuestos se recoge en las tablas a continuación:

RESIDUO COMPACTABLE								
Peso	Criterios de evaluación		Factores	Peso	Compactadora dos tiempos		Super-compactadora	
10%	Factores no técnicos	1.1	Cumplimiento de las políticas y la regulación de tratamiento de residuos	20%	▲	8	●	9
		1.2	Licencias	40%	●	9	●	9
		1.3	Exposición ocupacional	20%	▲	8	▲	8
		1.4	Peligro potencial	20%	▲	8	●	9
				100%		8,4		8,8
40%	Factores técnicos	2.1	Residuo radiactivo capaz de tratar	10%	▲	8	▲	8
		2.2	Capacidad de procesado de residuos	10%	▲	7	●	9
		2.3	Madurez de la tecnología	15%	●	9	●	9
		2.4	Generación de residuo secundario	10%	▲	7	●	9
		2.5	Mantenimiento	5%	▲	8	▲	8
		2.6	Reducción de volumen	30%	▲	7	▲	8
		2.7	Calidad del residuo resultante	15%	◆	6	◆	6
		2.8	Espacio requerido	5%	▲	8	▲	7
				100%		7,4		8,0
50%	Factores económicos	3.1	Costes de adquisición	40%	▲	8	▲	7
		3.2	Costes de operación	20%	▲	8	▲	8
		3.3	Costes de almacenaje del residuo resultante	40%	▲	7	▲	8
				100%		7,6		7,6
				TOTAL		7,58		7,88
		CONCLUSION		NR		R		

Figura 11. Análisis multiatributo para las técnicas de tratamiento de residuos compactables.

De la puntuación final del análisis multiatributo realizado en la Figura 11 se extrae que la tecnología más adecuada para tratar los residuos compactables que lleguen al centro tecnológico es la **supercompactación**. Su mayor ventaja es que el residuo final obtenido es de menor tamaño que el obtenido con un equipo de compactación en dos tiempos, además de que la supercompactadora ofrece unas condiciones más seguras de operación.

RESIDUO INCINERABLE										
Peso	Criterios de evaluación		Factores	Peso	Incineración		Plasma		Immobilization directa	
10%	Non technical factors	1.1	Cumplimiento de las políticas y la regulación de tratamiento de residuos	20%	▲	8	◆	6	●	9
		1.2	Licencias	40%	▲	7	◆	6	▲	8
		1.3	Exposición ocupacional	20%	◆	6	◆	6	▲	7
		1.4	Peligro potencial	20%	◆	6	◆	6	▲	8
				100%		6,8		6,0		8,0
40%	Technical factors	2.1	Residuo radiactivo capaz de tratar	10%	▲	8	▲	8	▲	8
		2.2	Capacidad de procesado de residuos	10%	▲	7	◆	6	◆	6
		2.3	Madurez de la tecnología	15%	▲	8	◆	6	▲	8
		2.4	Generación de residuo secundario	10%	●	9	●	9	▲	7
		2.5	Mantenimiento	5%	▲	7	◆	6	◆	6
		2.6	Reducción de volumen	30%	●	9	●	9	◆	6
		2.7	Calidad del residuo resultante	15%	▲	8	●	9	◆	6
		2.8	Espacio requerido	5%	◆	6	▲	7	▲	8
				100%		8,2		7,9		6,7
50%	Economical factors	3.1	Costes de adquisición	40%	▲	7	◆	6	●	8
		3.2	Costes de operación	20%	▲	8	◆	6	▲	7
			Costes de almacenaje del residuo resultante	40%	●	9	●	9	◆	6
				100%		8,0		7,2		7,0
						7,94		7,36		6,98
CONCLUSION					R		NR		NR	

Figura 12. Análisis multiatributo para las técnicas de tratamiento de residuos incinerables.

Para el residuo incinerable se obtiene que la tecnología que mejor cumple los requisitos del proyecto es la incineración

INMOVILIZACIÓN DE RESIDUOS											
Peso		Criterios de evaluación		Factores		Peso	Cemento activo		Cemento inactivo		Bitumen
10%	Non technical factors	1.1	Cumplimiento de las políticas y la regulación de tratamiento de residuos	20%	▲	7	●	9	▲	7	
		1.2	Licencias	40%	▲	8	●	9	▲	8	
		1.3	Exposición ocupacional	20%	▲	8	▲	8	▲	7	
		1.4	Peligro potencial	20%	▲	7	▲	8	▲	7	
		100%			7,6	8,6	7,4				
40%	Technical factors	2.1	Residuo radiactivo capaz de tratar	10%	●	9	▲	8	▲	7	
		2.2	Capacidad de procesado de residuos	10%	▲	8	▲	8	▲	7	
		2.3	Madurez de la tecnología	15%	●	9	●	9	●	9	
		2.4	Generación de residuo secundario	10%	▲	7	▲	7	◆	6	
		2.5	Mantenimiento	5%	▲	7	▲	7	▲	7	
		2.6	Reducción de volumen	30%	◆	6	◆	6	▲	7	
		2.7	Calidad del residuo resultante	15%	▲	7	▲	8	◆	6	
		2.8	Espacio requerido	5%	▲	8	▲	8	▲	7	
		100%			7,4	7,4	7,1				
50%	Economical factors	3.1	Costes de adquisición	40%	▲	8	▲	8	▲	7	
		3.2	Costes de operación	20%	▲	7	▲	7	▲	8	
		3.3	Costes de almacenaje del residuo resultante	40%	◆	6	◆	6	◆	5	
		100%			7,0	7,0	6,4				
TOTAL					7,2	7,32	6,76				
CONCLUSION					NR	R	NR				

Figura 13. Análisis multiatributo para las técnicas de tratamiento de inmovilización de residuos.

Según los resultados obtenidos del análisis multiatributo para los distintos procesos que se quieren llevar a cabo en el edificio tecnológico (Figura 11, Figura 12, Figura 13) las tecnologías a elegir son las siguientes:

- Para residuos compactables: La **supercompactación** es la tecnología más adecuada.
- Para residuos incinerables: la **incineración** en cámaras de combustión es la más adecuada.
- Para la inmovilización de residuos: la **cementación** es la tecnología más adecuada. Debido a que se han de tratar los líquidos derivados de otros procesos, la cementación con cemento activo es la elegida, aunque haya sacado peor puntuación en la evaluación (por motivos de seguridad). La instalación en todo caso es la misma. Este proceso permite inmovilizar también las cenizas obtenidas de la incineración.

2.4. Cálculo de la capacidad de los equipos.

Una vez se poseen los datos de la cantidad de residuo de cada tipo que se va a recibir por año en el Edificio Tecnológico (calculados en la sección 2.2) se puede calcular la capacidad necesaria de los distintos equipos.

Los parámetros necesarios para el cálculo de dichas capacidades son los siguientes:

Número de días de recepción de residuos por año : 175 días/año

Número de horas hábiles al día: 2 turnos de 8 horas /día : 16 horas/día

Unidad de medida de capacidad: bidones/ hora. 1 barril = 0,2 m³

Con estos datos las capacidades necesarias para tratar todo el flujo entrante de residuos al edificio tecnológico se muestran en la Tabla 10.

TOTAL a procesar en ET	Unidad de medida	Incineradora	Supercompactadora
	m ³ /año	127,884	1401,232
	t/año	147,916	1612,868
	bidones/año	639,42	7006,16
	m ³ /día	0,73	8
	bidones/día	4	40
	m ³ /hora	0,05	0,5
	bidones/hora	0,2	2,5

Tabla 10. Capacidades necesarias de los equipos principales del edificio tecnológico

Para calcular la capacidad necesaria de la cementadora se deben suponer antes unos factores de reducción de volumen para los demás equipos ya que tanto los productos de la incineradora como de la supercompactadora serán llevados a la planta de cementación para su inmovilización. Los factores de reducción de volumen considerados son:

Compactadora 1:2

Incineradora 1:100

Otro detalle a tener en cuenta es que la cementación se realizará siempre en contenedores normalizados CE-2a con una capacidad en volumen de 7 m³ (2.25 x 2.25 x 2.2). Estos contenedores pueden albergar hasta 18 bidones de 0,2 m³ (4 m³)(Tabla 11). Considerando que se introduce un volumen equivalente a estos 18 bidones queda un volumen libre a rellenar con mortero de 3.5 m³.

CONTENEDOR	DIMENSIONES (mm)	VOLUMEN (m ³)	USO PREVISTO
CMT	1.740 x 870 x 870 (H)	1.32	Chatarras metálicas
CMD	2.030 x 1.030 x 1.025 (H)	2.14	Material desclasificable
Bidón 220 l	Ø = 600; H = 900	0.20	Residuos listos para tratar
CE-2a	2.250 x 2.250 x 2.200	7.07	Grandes piezas. Bidones para cementar. Residuo a granel
CE-2b	2.250 x 2.250 x 1.100	2.50	Grandes piezas. Con mortero de sellado en paredes

Tabla 11. Dimensiones de los distintos recipientes utilizados para el tratamiento de residuos radiactivos, definidos por ENRESA.

Con esto, y contando con que el residuo metálico también es trasladado directamente a la cementadora, la capacidad mínima necesaria se calcula a continuación.

$$\begin{aligned}
 R_{\text{cementación}} &= \frac{R_{\text{incinerable}} \cdot \frac{1}{100} + R_{\text{compactable}} \cdot \frac{1}{2} + R_{\text{metálico}} + R_{\text{no procesable}}}{175 \left(\frac{\text{días}}{\text{año}} \right)} \\
 &= \frac{127.884 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right) \cdot \frac{1}{100} + 1401.232 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right) \cdot \frac{1}{2} + 200.204 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right) + 2781.48 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right)}{175 \left(\frac{\text{días}}{\text{año}} \right)} \\
 &= 21.05 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) \\
 \text{Capacidad}_{\text{cementación}} &= \frac{R_{\text{cementación}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right)}{\text{cemento necesario} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{contenedor}} \right)} = \frac{21.05}{3.5} = 6 \frac{\text{contenedores}}{\text{día}}
 \end{aligned}$$

La cementadora tendrá que ser capaz de cementar 6 contenedores CE-2a al día, o lo que es lo mismo, de producir 21.05 m³ de mortero para inmovilización al día.

2.5. Selección de proveedores.

Con las capacidades necesarias de los equipos ya calculadas se puede proceder a elegir los equipos y los proveedores que los suministrarán.

Primero se buscarán proveedores para los equipos principales de tratamiento de residuos, como son la incineradora, la supercompactadora y la cementadora. No obstante, también es necesario definir los proveedores de los equipos secundarios: grúas, cintas transportadoras de rodillos, equipos de control de radiactividad, equipos de clasificación de residuos, equipos de triturado,...). Por este motivo, antes de elegir los proveedores de los equipos se procede a definir los equipos que se van a necesitar.

2.5.1. Equipos necesarios

Con el fin de indentificar los equipos necesarios se dibuja un diagrama de flujo de los procesos que se llevan a cabo en el edificio tecnológico.

▪ Incineradora

Tipo de incineradora	(50-100% exceso de aire)
Código de diseño	ASME VIII
Material	Acero al carbono
Capacidad mínima	50kg/h – 0.05m ³ /h
Ractores de reducción de volumen	Residuo biológico: 80-100 Residuo líquido orgánico: 300-500 Residuo putrescible: 50-80
Temperatura de Operación de la cámara de combustión	750 °C
Temperatura de operación de la cámara de postcombustión	1000 °C
Presión de operación en la cámara de combustión	-30 mm.c.a.
Presión de operación en la cámara de postcombustión	De -30 mm.c.a. a -120 mm.c.a.
Tiempo de retención del residuo en la cámara de combustión	1,8 sec
Tiempo de retención del residuo en la cámara de postcombustión	1,3 sec

Dimensiones máximas del equipo	20x10x15 m
Superficie de instalación necesaria	100 m ²
Combustible quemadores	Gasóleo
Dosis de radiación máxima emitida por los gases producto de la combustión	0,01mSv/año
Sistema de tratamiento Off-gas	Obligatorio: Diluidor/enfriador, sistema de filtros HEPA alta eficiencia, filtros de carbón activo.

Tabla 12. Requisitos técnicos necesarios para la incineradora del edificio tecnológico.

▪ **Supercompactadora**

Altura de la cámara de compactación	1500 mm
Longitud de la cámara de compactación	950 mm
Anchura de la cámara de compactación	1000 mm
Espacio de instalación requerido	3m x 6m
Presión de operación	-5 mca
Tiempo total de ciclo por bidón	10 min/ bidón
Fuerza de compactación	1.500 toneladas
Factor de reducción de volumen	De 2 a 8 veces (dependiendo del residuo)
Dimensiones de la máquina (LxAxH)	4m x 2m x 5m
Sistema de drenaje	Si. Con capacidad para drenar 2 litros por bidón
Bidones comprimidos por hora	5 - 7,5
Bidones aceptados	Normalizados de 220 litros

Tabla 13. Requisitos técnicos necesarios para la supercompactadora del edificio tecnológico.

▪ **Cementadora**

Capacidad diaria de llenado	6 contenedores/día
Consumo medio de mortero por día	21 m ³ /día
Capacidad silo de mortero	120 m ³
Alimentador a la mezcladora	Tornillo sin fin. 50 m ³ /h de capacidad
Capacidad de la mezcladora	1000 litros
Caudal Bomba de inyección de mortero	3000 – 12000 l/h
Número de bombas de alimentación	2 +1 de reserva
Presión de impulsión	5 Kg/cm ²
Inyector de mortero	Tubo de 2 ½ " de diametro
Espacio de instalación requerido	5m x 6m

Tabla 14. Requisitos técnicos necesarios para la incineradora del edificio tecnológico.

▪ **Puentes Grúa**

Capacidad de elevación	20 toneladas
Velocidad máxima de traslación	20 m/min
Velocidad reducida del traslación	2 m/min
Motor de traslación del puente	2 x 3kW
Velocidad de elevación máxima	20 m/min
Velocidad de elevación reducida	1 m/min
Motor de elevación	2 x 25kW
Altura de elevación	7,5 m

Tabla 15. Requisitos técnicos necesarios para la los puentes grúa del edificio tecnológico.

▪ **Grúa de pórtico**

Capacidad de elevación	20 toneladas
Velocidad máxima de traslación	20 m/min
Velocidad reducida del traslación	2 m/min
Motor de traslación del puente	2 x 3kW
Velocidad de elevación máxima	20 m/min
Velocidad de elevación reducida	1 m/min
Motor de elevación	2 x 18kW
Altura de elevación	5 m

Tabla 16. Requisitos técnicos necesarios para las grúas de pórtico utilizadas en el edificio tecnológico.

▪ **Carretilla elevadora**

Capacidad de elevación	20 toneladas
Velocidad máxima de traslación	100 m/min
Velocidad reducida del traslación	50 m/min
Motor de traslación del puente	2 x 3kW
Velocidad de elevación máxima	30 m/min
Velocidad de elevación reducida	1 m/min
Altura de elevación	7,5 m

▪ **Sistemas indicadores de radiación**

▪ **Cintas transportadoras de rodillos**

Velocidad de transporte: 0.3 m/s=18m/min

▪ **Carros portacontenedores**

Velocidad máxima de desplazamiento: 10 m/min

Velocidad reducida de desplazamiento: 1m/min

- **Zona de clasificación:**
 - **Mesa de clasificación de residuos**
Capacidad: 2 m³
Dimensiones: 5x2 m
 - **Zona de corte confinado**
 - **Sierras**
 - **Trituradoras:**
Capacidad de carga: 10 ton/h
Potencia: 15kW
Tamaño máximo de entrada : 1000 mm
Tamaño de salida: 40 mm
- **Celda caliente**
- **Medidores de radiación para personas**
- **Cajas de guantes**

2.5.2. Evaluación y elección de proveedores

Una vez sabiendo los equipos que se necesitan se ha realizado un estudio detallado de los principales proveedores de equipos para el sector nuclear. Los proveedores encontrados se han indicado en la tabla a continuación.

Leyenda de la tabla

SC: Supercompactadora

Inc: Incineradora

Cem: Cementadora

Trit: trituradora

R-X: Escáner de rayos X

GAMS: Escáner de rayos gamma

TECNOLOGÍA	Reducción volumen		Inmovilización	Fragmentación		Clasificación		Información de contacto
	SC	Inc		Sierra	Trit	R-X	GAMS	
Nusim								ingenieria@nusim.com
Nukem								info@nukemtechnologies.de
Westinghouse								http://www.westinghouseclear.com
Babcock Noell GmbH								Wolfgang Mützel : Sales +4931 903-1702
BIG Entsorgungstechnologien GmbH								Germany. www.big-pressen.de
Oregon Iron Works								www.oregoniron.com
UJV Rez a.s.								Czech Republic. www.ujv.cz
Cabrera Services Inc.								www.cabreraseservices.com
CH2M HILL Inc.								Contacto: William Badger wbadger@ch2m.com).
DeNuke Contracting Services								www.denuke.com
DNS-Dedicated Nuclear Solutions								www.dnsalliance.com
AECOM								
AZZ Nuclear								
Kinectrics Inc								www.kinectrics.com
Perma-Fix Environmental Services								www.perma-fix.com
Qal-Tek Associates LLC								www.qaltek.com

Tabla 17. Estudio de los proveedores de las tecnologías a implantar en el edificio tecnológico.

Después de haber estudiado las distintas propuestas de los proveedores considerados, se exponen a continuación los proveedores elegidos para cada tecnología y las razones por las que han sido escogidos. No sea considerado el precio como un factor en la elección, sino la experiencia y el servicio del proveedor en cada una de las tecnologías en las que ha sido evaluado.

- **Incineradora**

Proveedor elegido: *Nukem technologies*. Proveedor especializado en tratamiento de residuos nucleares. Gran experiencia diseño de equipos personalizados para plantas de incineración de residuos nucleares. La central nuclear de Bohunice, en Eslovaquia, posee una incineradora instalada por Nukem de 75kg/h de capacidad que puede servir de ejemplo de instalación para este proyecto.

- **Supercompactadora**

Proveedor elegido: *Nukem technologies*.

Ofrece equipos de dimensiones reducidas y de gran capacidad de procesado. Al igual que con la incineración, Nukem tiene una dilatada experiencia en la integración de equipos supercompactadores en líneas de procesado de residuos radiactivos. Nukem ha instalado una supercompactadora de características similares a las requeridas en este proyecto(fuerza de compactación de 20.000kN) en la central nuclear de Leningrado, con resultados muy satisfactorios.

- **Cementadora**

Proveedor elegido: *Nukem technologies*.

Nukem también es experto en cementación. Ofrece una gran versatilidad en sus soluciones, disponiendo de sistemas de regulación de la mezcla del mortero para ajustar su composición al residuo a cementar. Además ofrecen soluciones personalizadas a las restricciones de espacio. Nukem instaló en 2007 una planta de cementación de referencia para este tipo de equipos en la central nuclear de Leningrado: una cementadora de mezclador cónico capaz de conseguir un cemento super fluido en 5 minutos, capaz de ser inyectado a una velocidad de 15 m³/h. Gracias a su experiencia y servicio, Nukem ha sido elegido para ser el proveedor de los equipos principales del sistema de tratamiento de residuos.

- **Sistemas de fragmentación**

Sierra.

Proveedor elegido: Babcock Noell GmbH

Se elige este proveedor al ser un proveedor de garantías frente a la escasez de proveedores de equipos de fragmentación destinados especialmente al tratado de residuos radioactivos. Babcock ofrece equipos diseñados desde un inicio para tratar residuos radiactivos, no como otros proveedores que ofrecen modificaciones de sus productos para adaptarlos a normativa nuclear pero que bajo un punto de vista crítico no ofrecen tantas garantías.

Trituradora.

Proveedor elegido: *Nusim*

Proveedor español que ya suministro equipos parecidos para el Cabril, por tanto su fiabilidad queda contrastada.

▪ **Sistemas indicadores de radiación**

Proveedor elegido: *Babcock Noell GmbH*

Tanto los sistemas de monitorización de radiación por rayos X como los sistemas de cámaras gamma (GAMS) necesarios para la comprobación del cumplimiento de los niveles de radiación de los equipos se han decidido adquirir a Babcock Noell debido a su especialización en ese tipo de equipos. Su amplia gama de productos unido a la utilización de las últimas tecnologías han hecho que este proveedor sea considerado como el más apropiado para suministrar estos equipos.

▪ **Equipos complementarios**

- Mesa de clasificación de residuos

Proveedor elegido : Domenech machinery systems

- Celda caliente

Proveedor elegido : NUKEM technologies

- Medidores de radiación para personas

Proveedor elegido : UJV Rez

- Grúas

Proveedor elegido : Konecranes

- Cintas transportadoras de rodillos

Proveedor elegido : Domenech machinery systems

- Carretillas elevadoras

Proveedor elegido : Crown

- Cajas de guantes

Proveedor elegido: Inert

2.5.3. Presupuesto estimado.

A continuación se calcula un coste estimado de los diferentes equipos. También se calcula un coste estimado anual de la operación de los principales equipos. Todos los coste han sido calculados en base a los precios orientativos que han proporcionado los suministradores de cada equipo.

Datos de partida	
Coste bidón	100 €
Coste contenedor	2.000 €
Coste electricidad	0,05 €/kW/h
Coste gasóleo	0,9 €/l
Coste cemento mortero	0,06 €/kg
Sueldo por operario	15.500 €/año
Coste des de mantenimiento (% coste adquisición)	5%
Potencia máquinas	
Supercompactadora	50kW
Incineradora	75 kW
Cementadora	7 kW

Figura 14. Datos de partida para el cálculo del coste de operación de los equipos

Costes asociados a la supercompactación		
Descripción		Coste
Costes de adquisición	Adquisición de maquinaria (€)	1.750.000
Costes de operación	Servicios auxiliares (€/año)	14.422
	Mano de obra (€/año)	46.500
	Mantenimiento (€/año)	87.500
	No. Bidones producidos al año	7.007
	Coste bidones (€/año)	700.700
	No. Contenedores utilizados al año	195
	Coste contenedores (€/año)	389.278
Coste total anual (€/año)		1.238.400

Figura 15. Costes anuales asociados al proceso de supercompactación

Costes asociados a la Incineración		
Descripción		Coste
Costes de adquisición	Adquisición de maquinaria (€)	7.500.000
Costes de operación	Servicios auxiliares (€/año)	1.422
	Mano de obra (€/año)	93.000
	Mantenimiento (€/año)	375.000
	No. Bidones producidos al año	7
	Coste bidones (€/año)	700
Coste total anual (€/año)		470.122

Figura 16. Costes anuales asociados al proceso de incineración.

Costes asociados a la Cementación		
Descripción		Coste
Costes de adquisición	Adquisición de maquinaria (€)	1.125.000
Costes de operación	Servicios auxiliares (€/año)	32.551
	Mano de obra (€/año)	62.000
	Mantenimiento (€/año)	56.250
	No. Contenedores utilizados al año	1.023
	Coste contenedores (€/año)	2.046.000
Coste total anual (€/año)		2.196.801

Figura 17. Costes anuales asociados al proceso de cementación.

Costes asociados a la Clasificación y Fragmentación				
Descripción		Cantidad	Precio Unitario (€)	Precio Total (€)
Celda caliente	Celda caliente	1	312.000	312.000
Espectrometría GAMMA	Sistema de cámaras espectrometría	3	196.000	588.000
Equipos de clasificación y fragmentación	Mesa de clasificación	2	35.000	70.000
	Sierra de banda horizontal	1	195.000	195.000
	Sierra de corte confinado	1	210.000	210.000
	Trituradora	1	165.000	165.000
Equipos de manipulación remota	Carros, Imanes, pinzas, etc.	1	280.000	280.000
Caja de guantes	Caja de guantes	3	130.000	390.000
Coste total equipos			2.210.000	

Figura 18. Costes de los equipos de clasificación y fragmentación.

Costes asociados al sistema de transporte de residuos				
Descripción		Cantidad	Precio Unitario (€)	Precio Total (€)
Grúas del area de recepción y descarga	3 areas de carga y descarga	3	238.000	714.000
Grúas del area de tratamiento	gruas de llenado de bidones y contenedores	3	170.000	510.000
Sistemas de transporte de bidones/contenedores	Carretillas elevadoras	4	27.500	110.000
	Plataformas elevadoras	1	65.000	65.000
	Sistemas de railes	por longitud	104.000	104.000
Coste total		1.503.000		

Figura 19. Costes de los equipos de transporte.

El coste total estimado de adquisición de todos los equipos necesarios es de **14.088.000 €**

[illegible]

The drawing shows a building facade with a flat roof and a base level. The elevation dimensions are as follows:

- Roof height: $+17,400$
- Top of wall height: $+16,000$
- Height of the upper window section: $+9,500$
- Height of the lower window section: $0,000$
- Height of the base level: $+0,900$

The section dimensions are as follows:

- Width of the left wall: $4,200$
- Width of the window opening: $24,000$
- Total width of the base: $28,200$

Una vez se conoce la línea de proceso general seguida por cada residuo recibido en el edificio tecnológico se procede a detallar cada bloque de la línea de proceso con la finalidad de conocer los requerimientos de cada uno con respecto al diseño del layout del edificio.

3.1.1. Línea de proceso de recepción y verificación

El proceso de recepción y verificación de residuos generales a granel en los contenedores consta de las siguientes partes.

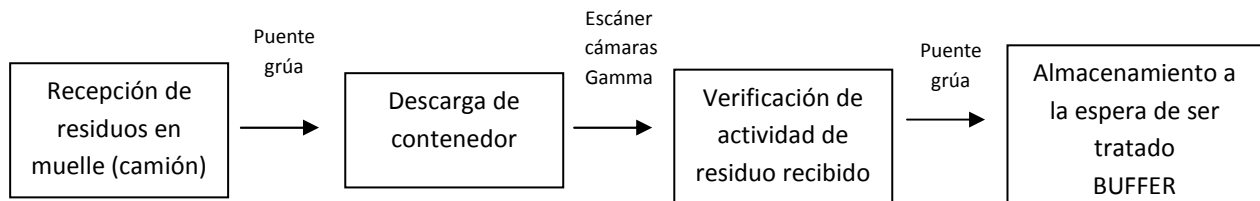


Figura 21. Línea de proceso de la recepción y verificación de residuos

Como indica el diagrama mostrado en la Figura 21 el residuo es recibido a granel en contenedores transportados por un camión. El camión pasa unas exclusas de seguridad y entra en el muelle de recepción de residuos. Un puente grúa descarga los contenedores y los coloca en una zona de verificación de radioactividad. El escáner es llevado a cabo por un sistema de espectrometría utilizando cámaras captadoras de rayos gamma. Para ello el puente grúa ayuda a retirar la tapa del contenedor y se ejecuta el escaneado. Si los niveles de radiación medidos entran dentro de los niveles de aceptación del edificio tecnológico el puente grúa vuelve a poner la tapa y deposita el contenedor en el almacén a la espera de ser tratado. Si no cumple los niveles de radiactividad el puente grúa vuelve a depositar el contenedor en el camión para que se lo vuelva a llevar.

En el buffer los contenedores esperan a poder ser trasladados a la zona de clasificación del residuo que contienen. Como medida de seguridad para no poner el riesgo la continuidad del proceso se decide que el buffer tiene que ser capaz de almacenar los contenedores recibidos durante 7 días.

Espacio requerido por los equipos de la línea de proceso

- *Muelle de recepción:* tiene que ser capaz de albergar un camión de las siguientes medidas

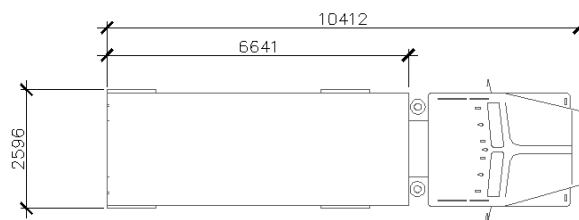


Figura 22. Medidas de los camiones que transportan residuos al centro tecnológico

La superficie requerida para recibir un camión sin problemas es de $6\text{ m} \cdot 15\text{ m} = 90\text{ m}^2$

- *Area de verificación:* tiene que haber espacio suficiente para colocar el contenedor, posar su tapa en un lugar reservado para ello y para el equipo de escaneado, además de que la grúa pueda maniobrar con facilidad. El espacio necesario previsto es de 40m^2
- *Buffer de contenedores:* El tamaño del buffer tiene que ser suficiente como para albergar los residuos recibidos durante toda una semana. Los contenedores pueden almacenarse en dos alturas. El tamaño requerido se calcula como sigue.

- Volumen de residuos recibidos al día en el buffer: $19,15\text{ m}^3/\text{día}$
- Volumen contenedor CE-2a : 7 m^3
- Superficie requerida por contenedor : 5 m^2
- Número de contenedores por día : 3 contenedores/día
= 1 camión/día
- Superficie de almacenamiento requerida: $15\text{ m}^2/\text{día}$
- Superficie requerida a la semana: $15\text{ m}^2/\text{día} \cdot 7\text{ días} = 105\text{ m}^2$
almacenado en dos alturas → **$52,5\text{ m}^2$**

3.1.2. Línea de proceso de clasificación y fragmentación

Esta línea de proceso es el origen de todos los procesos y de su eficiencia depende la eficiencia total de todo el tratamiento de residuos. El diagrama de esta línea de proceso se muestra en la Figura 23. El residuo que espera en el buffer de recepción pasa a la zona de fragmentación con ayuda de un puente grúa y de un sistema de railes para transportar el contenedor hasta la mesa de clasificación de residuos. Una vez el contenedor está en una posición marcada en el suelo, cercana a la mesa de clasificación, se extrae el residuo de él con ayuda de una grúa con extremo bivalvo y se deposita el residuo encima de la mesa. Es entonces cuando los operarios, valiéndose de unas cajas de guantes debidamente colocadas a lo largo de la mesa empiezan a clasificar el residuo. También se cuenta con un sistema de monitorización de radiación por medio de cámaras gamma para localizar el residuo más radiactivo y separarlo para que sea tratado y confinado en bidones de 220L en una celda caliente. Para separar el residuo metálico existe un electroimán que se encarga de recolectarlo. El residuo que sea demasiado voluminoso como para ser introducido en bidones de 220L (que supere los 0.9 m en cualquiera de sus dimensiones) es derivado a la zona de fragmentación donde será acondicionado por medio de sierras o trituradoras según su naturaleza. Si son residuos difíciles de cortar o peligrosos, se direccionan a un equipo especial de corte confinado. Antes de ser fragmentado, el residuo se separa en compactable, incinerable (orgánico) o no procesable. Después de ser fragmentado se introducirá en bidones de 220L y será redireccionado a la línea de proceso que le corresponda. Tanto la zona de corte como la celda caliente están pensadas para su uso de manera excepcional, ya que el residuo se supone que ha sido previamente filtrado y acondicionado por los productores, no obstante es necesario disponer de él. También se utiliza para las pruebas requeridas por el laboratorio, ya que en el centro se realizará una importante tarea de investigación en el campo del tratamiento de residuos radiactivos.

Una vez todo el residuo haya sido clasificado e introducido en sus correspondientes bidones, se direccionará al siguiente tratamiento que le corresponda. Existen sistemas de transporte (carritos y plataformas de railes) que transportan los bidones y contenedores al siguiente proceso.

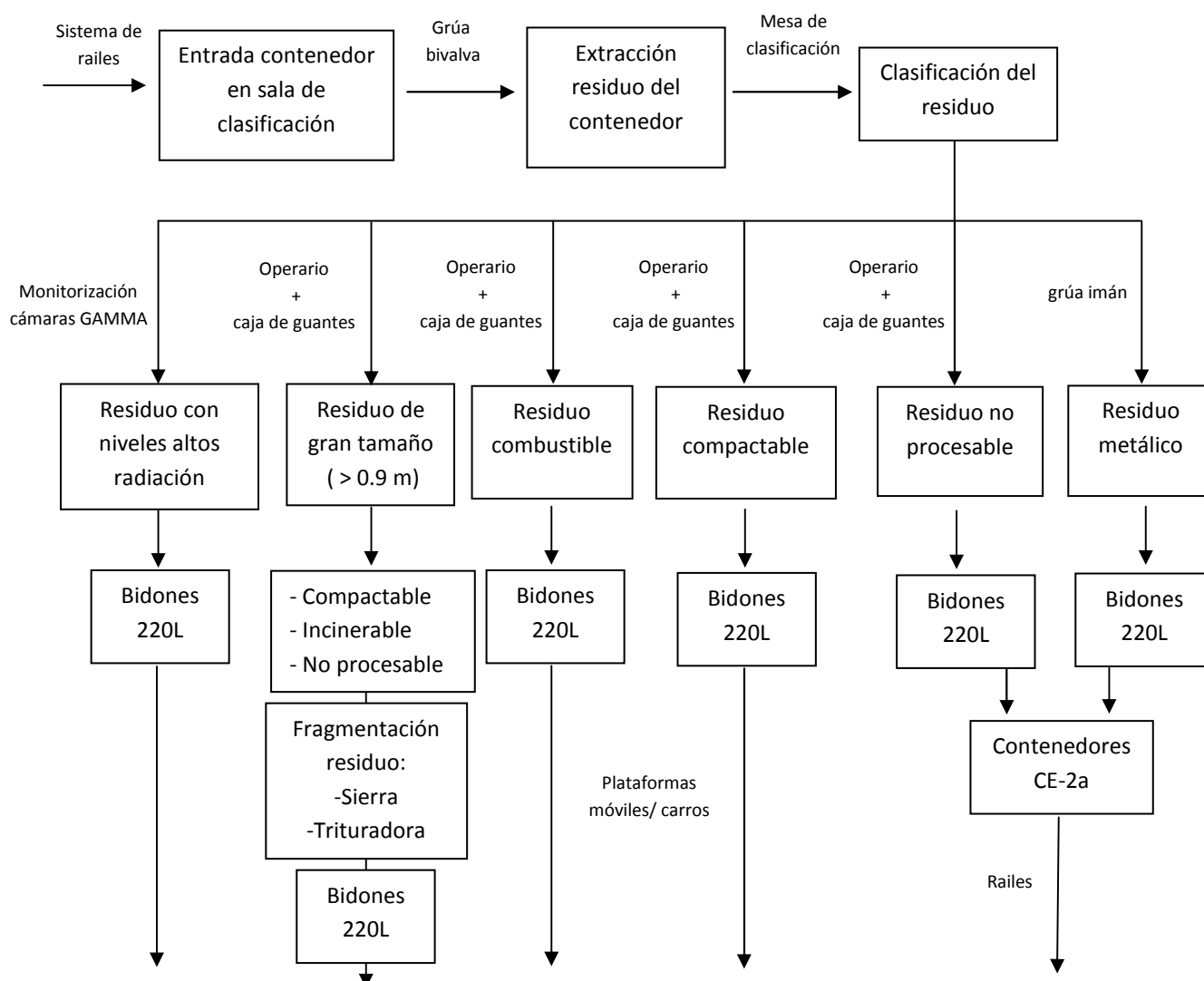


Figura 23. Línea de proceso de la clasificación y acondicionamiento (fragmentación) de los residuos a granel recibidos.

Espacio requerido por los equipos de la línea de proceso

Según los proveedores consultados, el espacio requerido para la instalación de los distintos equipos utilizados en esta línea de proceso se especifica a continuación.

- *Zona de clasificación:* la zona de clasificación incluye la mesa (2m x 4m), la grúa bivalva (base 1m x 1m) , los operarios utilizando las cajas de guantes (2,5m x 5m) , el contenedor que está siendo vaciado (5m²) y los distintos bidones para ir introduciendo el residuo. Todo esto se puede incluir en una superficie necesaria de 10m x 12m = **120 m²**
- *Celda caliente:* las medidas de esta celda, que debe contener también ciertos equipos para realizar las pruebas requeridas por el laboratorio, son de aproximadamente **100m²**
- *Sierra horizontal:* este equipo ocupa una superficie de **15 m²**
- *Trituradora:* este equipo ocupa una superficie de **10 m²**
- *Zona de corte confinado:* esta zona posee diferentes equipos, también destinados a servir al laboratorio. Su superficie prevista es de **50m²**

- *Zona de tránsito:* la zona de tránsito de todos los flujos y operarios que se prevee necesaria es de **180 m²**.

Todos esos requerimientos de espacio hacen que la superficie mínima de la zona de clasificación y fragmentación esa de **475m²**.

3.1.3. Línea de proceso de compactación

La línea de proceso de compactación es una de las más rápidas del edificio tecnológico. Eso hace que el buffer de recepción de esta línea sea muy reducido, puesto que todo bidón que llegue tardará poco en ser tratado. Los bidones llegan a la zona de compactación por medio de carros guiados. Los bidones serán izados por un sistema de alimentación que incluye el conjunto de compactación y serán colocados en la cinta de alimentación de la máquina. El contenido de los bidones es verificado antes de ser compactado por medio de un equipo de rayos X. Esta comprobación es fundamental ya que si se ha introducido por error algún residuo que o pueda ser compactado la máquina podría sufrir una avería. Si se registra un bidón con contenido no apropiado se retira inmediatamente de la línea. La sala también tiene un sistema de control de radiación para monitorizar que el proceso cumpla con los niveles legales establecidos. Una vez los bidones son compactados, el resultado del proceso (llamado galletas de compactación) es introducido en contenedores CE-2a con ayuda de una pequeña grúa de manipulación. Cuando el contenedor está lleno (aproximadamente 36 pellets por contenedor) es transportado por una grúa de pórtico a la línea de cementación. Este proceso se muestra en la Figura 24. Si se desea conocer en detalle como es el proceso de compactación se puede consultar el plano **NCR -DET-D-M-0012** adjunto en el DOCUMENTO II: PLANOS.

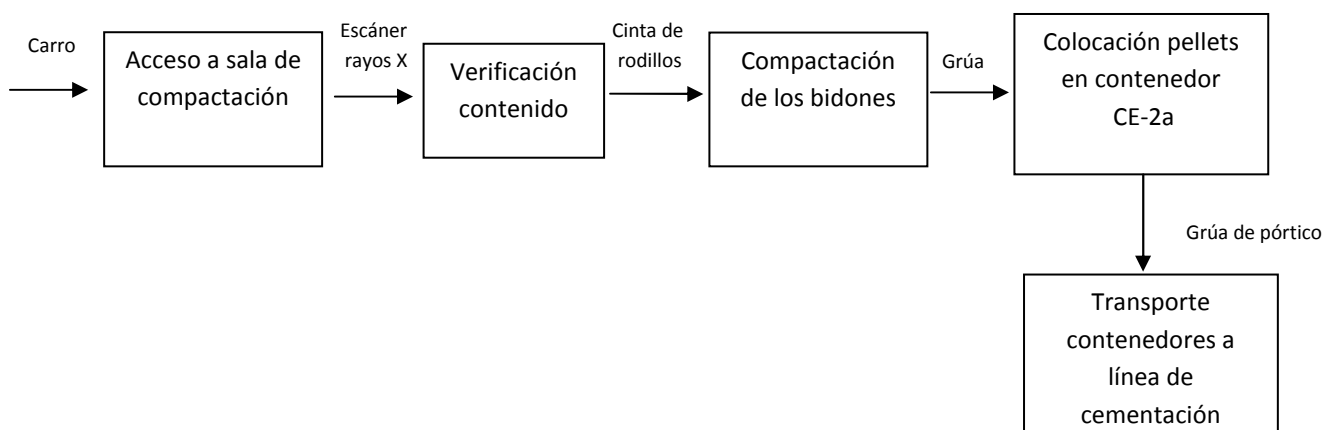


Figura 24. Línea de proceso de la compactación de los bidones de residuos.

Espacio requerido por los equipos de la línea de proceso

- El conjunto de sistema de alimentación, rayos X y supercompactador es un sistema integrado que ocupa una superficie de **47.5 m²**.
- Se considera un espacio de reserva para acceso a los distintos componentes del proceso en caso de mantenimiento, además de facilitar espacio para cualquier emergencia. El espacio considerado para esto es de **10 m²**

El espacio mínimo necesario para el sistema de compactación es de **57.5m²**

3.1.4. Línea de proceso de incineración

La línea de incineración es una línea particular. Es la que menos cantidad de residuo a tratar recibe, y su factor de reducción de volumen es tan elevado que la cantidad de residuo resultante del proceso es verdaderamente pequeña. Esto hace que aunque sea un proceso lento exista mucha flexibilidad en la línea. Todos los bidones destinados a incineración son trasladados por medio de plataformas móviles a un buffer especial donde serán elevados al nivel de alimentación de la incineradora. Esto es necesario ya que la incineradora se alimenta desde su parte superior. El buffer contiene un congelador por si es necesario conservar residuos que vengan en ese estado (cuerpos de animales de los centros de investigación, por ejemplo). Los bidones se transportan a la altura de alimentación por medio de un ascensor. Después son dirigidos hasta el sistema de alimentación por medio de cintas transportadoras de rodillos. Unas pinzas especiales volcarán el contenido de cada bidón a la tolva de alimentación de la incineradora, donde un tornillo sin fin conectado a su parte inferior introduce el residuo en la cámara de combustión. Las cenizas producto de todo el proceso de combustión se depositan automáticamente en bidones de 220L. Estos son transportados a un almacén donde se introducirán en contenedores CE-2a para ser dirigidos a cementar. El proceso de incineración se ilustra en la Figura 25. Si se desea conocer en detalle como es el proceso de incineración se puede consultar el plano **NCR -DET-D-M-0013** adjunto en el DOCUMENTO II: PLANOS.

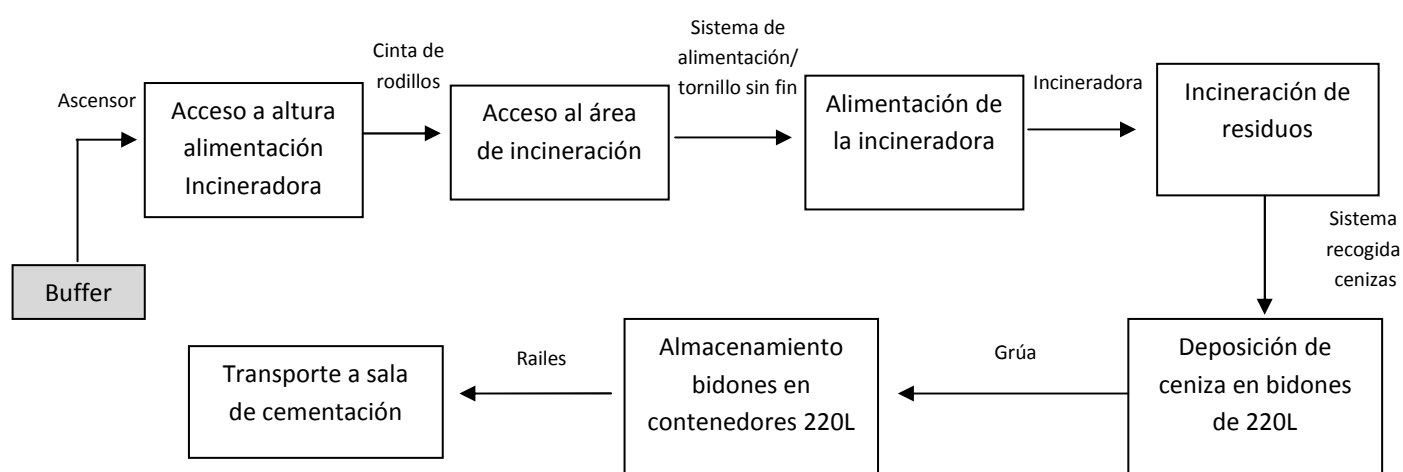


Figura 25. Línea de proceso de incineración del residuo recibido.

- *Buffer de incineración:* se reciben 4 bidones/ día para incineración. Si se desea tener espacio para 7 días de recepción de residuos se necesitará espacio para 28 bidones almacenados en dos alturas. Eso significa 14m^2 de superficie. También se incluye aquí un congelador de residuos para 10 bidones, que requiere un espacio de 15m^2 . Si se considera un margen reservado para tránsito, el espacio mínimo requerido por el buffer es de **50m^2**
- *La incineradora* en sí está compuesta por una cámara de combustión vertical (36m^2) una cámara de postcombustión vertical (36m^2) y de los sistemas de quemadores y conexión entre cámaras (36m^2). Esto hace un total de 108m^2 necesarios.
- El problema de todo sistema de incineración de residuo biológico y nuclear es el sistema de tratamiento de gases producto de la combustión. Al manejar residuo muy peligroso, el sistema de off gas tiene que contar con numerosos filtros y equipos de enfriamiento y condensación para asegurar que lo que se expulsa por la chimenea es totalmente inocuo. Estos equipos ocupan mucho espacio, tanto en altura como a nivel del suelo. En la planta baja se calcula una superficie necesaria de unos 150m^2
- Se reserva un espacio de 50m^2 para manipulación de los equipos y tránsito.

Teniendo en cuenta los requisitos de espacio mencionados, el espacio mínimo para la sala de incineración es de **300m^2**

3.1.5. Línea de residuos procedentes de las centrales nucleares

Los residuos provenientes de operación y desmantelamiento de centrales nucleares vienen ya acondicionados en bidones de 220L dentro de contenedores CE-2a listos para cementar. Todos los contenedores procedentes de las centrales nucleares poseen un certificado de cumplimiento de los niveles de actividad requeridos por el edificio tecnológico. Es por eso que no se requiere un examen de verificación de los contenedores. No obstante se toman bidones como muestra periódicamente para ser analizados en el laboratorio y comprobar que el residuo enviado cumple las condiciones marcadas. El residuo llega en camiones que se introducen hasta la sala de descarga. Allí los contenedores son descargados por medio de puentes grúa y almacenados a la espera de poder ser llevados a cementar. Cuando llegue la hora de que sean cementados, los contenedores se colocan en un sistema de railes con ayuda del mismo puente grúa y son transportados a la sala de cementación. La línea de proceso de recepción de los residuos de las centrales nucleares se muestra en la Figura 26.

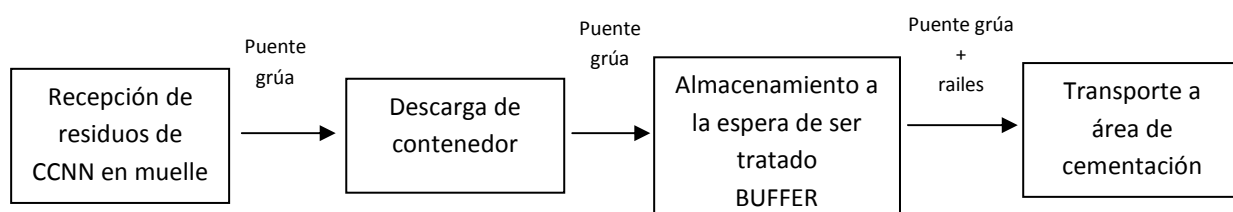


Figura 26. Línea de proceso de los residuos procedentes de la operación y desmantelamiento de centrales nucleares

Espacio requerido por los equipos de la línea de proceso

La sala de recepción de residuos provenientes de centrales nucleares tiene que tener espacio para recibir un camión (36m^2) y para almacenar el residuo recibido durante 7 días. El espacio requerido por el almacenamiento de residuo se calcula a continuación.

- Volumen de residuo recibido al año: 444.4 m^3 (desmantelamiento) + 714 m^3 (operación) = $1158,4\text{ m}^3/\text{año} = 6.619\text{m}^3/\text{día} = 33\text{ bidones/ día}$
- $33\text{ (bidones/día)} / 18\text{ (bidones/contenedor)} \approx 2\text{ contenedores / día}$
- $2\text{ contenedores/ día} \cdot 7\text{ días} = 14\text{ contenedores semana}$
- $14\text{ contenedores/semana} \cdot 5\text{ m}^3/\text{contenedor} = 70\text{ m}^2/\text{semana}$
 $\rightarrow \text{en dos alturas : } 70\text{m}^2/2=35\text{ m}^2$

Se reservan también 50m^2 para tránsito.

Por tanto será necesario un espacio mínimo de **121m^2**

3.1.6. Línea de cementación

La línea de cementación es donde confluyen todas las demás líneas de proceso. Debe prestarse especial atención a su coordinación ya que es la que va a marcar el ritmo de procesado del edificio tecnológico. La línea de cementación consta de un pequeño buffer en su misma sala, pero no está pensado que sea un almacén de contenedores por un largo tiempo, sino que esperen allí los contenedores a ser procesados ese mismo día. La alimentación de la cementadora se realiza mediante un sistema de railes que traslada los contenedores por la línea de cementación. Los contenedores se colocarán en el sistema de railes y avanzarán hasta la tolva que contiene la mezcla de mortero. El sistema de inyección de mortero inyectará la cantidad necesaria (3 m^3 aprox.) . En la sala de cementación existirá un almacén de tapas de contenedor que se colocaran una vez el contenedor se haya llenado. Se sella la tapa y se sigue trasportando el contenedor por el sistema de railes hasta salir de la sala de cementación al buffer de almacenamiento para secado de contenedores. Los contenedores serán apilados por un puente grúa para pasar un día de secado hasta que puedan ser retirados y trasladados al almacén de residuos final. La línea del proceso de cementación se representa en la Figura 27. Si se desea conocer en detalle como es el proceso de cementación se puede consultar el plano **NCR -DET-D-M-0014** adjunto en el DOCUMENTO II:PLANOS.

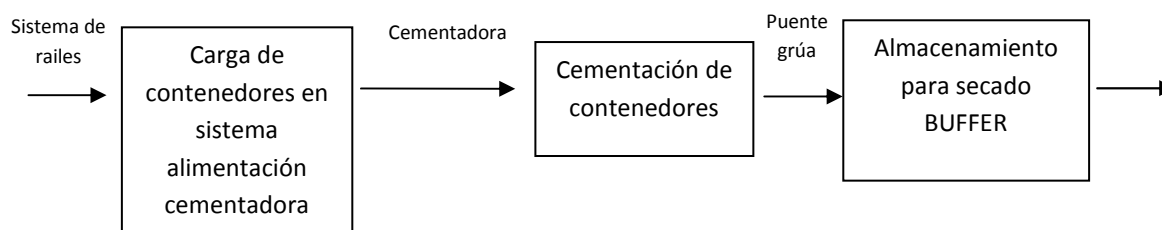


Figura 27. Línea de proceso de cementación de contenedores.

Espacio requerido por los equipos de la línea de proceso

- *Sistema de cementación:* el sistema de cementación (tolvas de mezclado, tanque de aditivos, sistema de inyección,...) ocupa una superficie de 24 m^2 ($4\text{m} \times 6\text{m}$).
- *Sistema de railes de transporte:* Se prevé que el sistema de railes ocupe una superficie de 72 m^2 ($3\text{m} \times 24\text{m}$).
- Se reservará un espacio de almacenamiento de 30m^2 para contenedores recibidos, a su vez un espacio de 10 m^2 para el apilamiento de tapas.

Todo esto hace un espacio total requerido de 160 m^2 .

3.1.7. Línea de proceso de salida de contenedores

La línea de salida de contenedores es el último proceso del residuo tratado en el centro tecnológico. Después de esperar secando un día, los contenedores son cargados con un puente grúa en el camión de salida de residuos, que los transportará al almacén de residuos radiactivos final. La línea de proceso seguida puede observarse en la Figura 28.

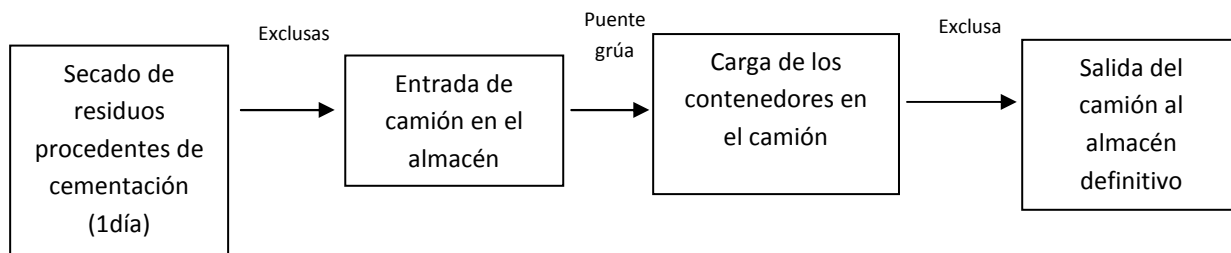


Figura 28. Línea de proceso de salida de contenedores del edificio tecnológico.

Espacio requerido por los equipos de la línea de proceso

La sala debe almacenar la producción de contenedores de una semana. La sala por tanto tiene que tener capacidad para almacenar:

$$\begin{aligned}
 &6 \text{ contenedores cementados / día} \cdot 7 \text{ días/ semana} = 42 \text{ contenedores} \\
 &42 \text{ contenedores} \cdot 5\text{m}^2/\text{contenedor} = 210 \text{ m}^2 \rightarrow \text{a almacenar en 3 alturas} = 70 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

No obstante tiene que tenerse en cuenta que es una zona de tránsito de contenedores, lo cual precisa de mucho espacio para conseguir un tráfico fluido de contenedores. El espacio reservado al tránsito será de 100 m^2 . También debe considerarse que tiene que poder estacionar un camión en la sala para poder ser cargado. Para esto se requieren 36 m^2 .

En total se necesita un espacio mínimo para esta sala de 206 m^2 .

Es importante tener en cuenta que todos los bidones y contenedores que entren o se utilicen en el proceso del edificio tecnológico irán identificados con unas etiquetas RFID para poder ser localizados en cualquier momento y tener registro de las líneas por las que ha pasado.

3.2. Sistemas auxiliares necesarios.

El edificio tecnológico necesita de una serie de sistemas auxiliares para cumplir con ciertos requerimientos de diseño y seguridad, además de para funcionar correctamente. En el alcance del proyecto no está diseñar los sistemas auxiliares necesarios, pero sí prever estos sistemas y considerar el espacio requerido para su integración en el edificio. Los sistemas auxiliares más importantes se describen a continuación.

3.2.1. Sistema de drenaje-desagüe

Es necesario un sistema de drenaje – desagüe especial que recoja el líquido residual de los procesos de limpieza y de compactación, los monitoree, almacene y envíe al sistema de cementación activa para fabricar el mortero.

Las principales fuentes de agua residual son:

- Agua usada para limpieza y descontaminación de las zonas contaminadas de acceso restringido.
- Descontaminación de bidones, contenedores y demás equipamiento usado en los procesos.
- Drenajes de los diferentes procesos en los que pueda aparecer o condensación o líquidos radiactivos resultado del proceso.

El agua residual producida es recogida por el sistema de drenaje. El sistema de drenaje está compuesto por tuberías que llevan el agua sucia desde las distintas fuentes a los tanques de almacenamiento de agua residual, que están almacenados a una cota más baja que la de las fuentes. El flujo de agua sucia a los tanques se realiza por tanto por gravedad sin necesidad de un sistema de bombeo. Una vez en los tanques el agua residual si es bombeada a los silos de agua para cementación con ayuda de un grupo de bombeo. El flujo de agua sucia por el sistema de drenajes está controlado por válvulas de aislamiento repartidas por todo el sistema de tuberías. Se debe considerar una sala a menor altura que la del suelo para alojar los tanques y el grupo de bombeo.

Tanto el nivel de los tanques como la humedad de la habitación estarán controladas desde la sala de control. La presencia de niveles de humedad superiores a un nivel de consigna en la sala serán interpretados como señal de existencia de fugas en el sistema.

3.2.2. Sistema de suministro de agua sanitaria

El Sistema de agua sanitaria y agua potable está previsto que suministre agua a los baños y vestuarios del edificio así como al laboratorio. En estos emplazamientos tiene que asegurarse que el agua sea potable.

El agua sanitaria también es utilizada por el sistema de descontaminación y otros procesos que requieran de suministro, como la cementadora o la incineradora (enfriadores del sistema de tratamiento de gases). El agua limpia será suministrada a estos emplazamientos mediante un sistema de tuberías. La demanda de agua de todos los consumidores será intermitente, no continua. Se estima un consumo diario de agua limpia de unos 70 m³/día. La presión máxima requerida será de unos 40-45 m.c.a. Estos son parámetros estimados para poder tener una idea de la dimensión del sistema y no deben tomarse como definitivos. El agua limpia se bombeará desde un depósito situado en el exterior del edificio. Se debe considerar una sala para albergar los grupos de bombeo, contadores y demás instrumentación necesaria para el sistema de alimentación de agua limpia.

Con respecto al agua caliente sanitaria, los puntos de suministro serán los baños, vestuarios y el laboratorio. El sistema de tuberías irá paralelo al de agua fría. Se debe dejar espacio en la sala reservada a los sistemas de suministro de agua para los calentadores y los distintos depósitos y calderines necesarios. El espacio mínimo requerido es de 35 m².

3.2.3. Sistema de protección contra incendios

El edificio tecnológico poseerá un sistema de protección contra incendios a base de detectores de humo y rociadores para mitigar cualquier fuego que pueda iniciarse en todo el complejo. El agua necesaria para el sistema de protección contra incendios provendrá de un tanque exterior especialmente dedicado a este sistema. A efectos del diseño del layout del edificio, el sistema de protección contra incendios tiene que tener reservada una sala de 35m² para colocar sus equipos de bombeo al igual que todas las tuberías que conecten con el tanque exterior.

3.2.4. Sistema de descontaminación

El Sistema de descontaminación está diseñado para descontaminar herramientas, recipientes y personas que hayan sido contaminadas por la radiación emitida por el residuo tratado en el centro. También estará diseñado para tratar emergencias radiológicas que puedan acontecer.

Los elementos que se descontaminarán normalmente por el sistema de descontaminación son:

- Contenedores que se reciben en el edificio con residuo radiactivo a granel. Los contenedores que no sean destinados a cementación tienen que ser descontaminados.
- Equipos de manipulación y transporte de residuo radiactivo: Grúas, imanes, pinzas, carros etc. Serán descontaminados periódicamente.
- Equipos que necesiten mantenimiento. Antes de someterse al proceso de mantenimiento tienen que descontaminarse completamente.

La descontaminación se realizará en seco (con máquinas de cepillado y lijado) con equipos de agua a presión o de limpieza con chorro de arena, según sea el elemento a descontaminar. El residuo sólido producto de la descontaminación (arena, material contaminado adherido a los equipos) será recogido y enviado a la mesa de clasificación del propio centro tecnológico. El agua producto de la descontaminación será drenada por el sistema de desagüe.

A efectos de diseño, se deberá reservar una sala para realizar las labores de descontaminación. La superficie de la sala debe ser de un mínimo de 60m².

3.2.5. Sistema de aire comprimido

El Sistema de aire comprimido se encarga de suministrar aire a presión a los procesos que lo necesitan, como son la incineración (sistema off-gas), la compactación (sistemas neumáticos) y la planta de cementación (Inyección). También es necesario aire a presión para cambiar los filtros de los sistemas de ventilación, sistemas neumáticos de cierre de compuertas, para mantener la presión en las tuberías del sistema de protección contra incendios y para presurizar pasillos y salas limpias.

Se dispondrá de dos compresores operando de forma permanente, situados en una sala específica para el sistema de aire comprimido. Los compresores incluirán un sistema de toma de aire con filtros de carbono para asegurar la limpieza del aire suministrado (Norma ISO 8573-1) .

Contando con todo lo mencionado, se debe reservar un espacio para la sala de compresores de 18m².

3.2.6. Sistema de ventilación

El Sistema de ventilación está diseñado según con el fin de evitar fugas de aire de las salas potencialmente contaminadas. El flujo de aire se inducirá de las salas con menor potencial de contaminación a las salas con mayor potencial de contaminación, evitando que el aire más contaminado circule a salas más limpias. Por tanto, el sistema de ventilación tendrá que crear depresión en las salas contaminadas y sobrepresión en las salas limpias. Los circuitos de ventilación de ambos tipos de salas tienen que ser completamente independientes. Los sistemas de extracción de aire de las salas contaminadas dispondrán de filtros HEPA de alta eficiencia para retener todas las partículas radiactivas que estén suspendidas en el aire. Estos filtros una vez se saturan se cambiarán, llevándose los filtros sucios a la mesa de clasificación para introducirlos en el proceso de tratamiento del propio edificio.

En los edificios de ámbito radiactivo, los sistemas de ventilación se diseñan para ser 100% redundantes. Todos los equipos tienen un equipo homólogo de repuesto por si se produce un fallo en el principal. Es por esto que el espacio reservado a los equipos de ventilación es considerable.

En las zonas donde el tránsito de personas no es frecuente (normalmente en salas contaminadas con procesos automatizados) el sistema de ventilación solo debe asegurar la renovación del aire de la sala (el volumen de aire debe ser renovado dos veces a la hora) y la presurización de la misma, pero no debe combatir las cargas térmicas presentes en la sala. La temperatura media de estas salas ronda en torno a los 35°C. El área mínima de la sala que alberga todos los equipos de ventilación ha de ser de 360m².

3.2.7. Sistema eléctrico

El edificio ha de contar con una sala separada donde colocar todos los sistemas eléctricos que conectan con todos los equipos. Debido a las grandes potencias de las máquinas que se utilizan en los procesos se dispone de diferentes cuadros de conexión a diferentes voltajes. También se dispone de transformadores “secos” de 1000kVA y de baterías de condensadores para la compensación del consumo de potencia reactiva de la red. Asimismo esta sala albergará todas las cajas de protección de los distintos equipos y del sistema de alumbrado. Se tiene que asegurar que el sistema eléctrico funcione de manera continua, ya que un fallo en el sistema de alimentación haría que los sistemas de seguridad dejaran de funcionar y provocaría una fuga de radiación al exterior. Por este motivo se diseña el sistema con redundancia en los aparatos críticos. Esto aumenta el espacio ocupado por el sistema eléctrico. Se calcula que la superficie mínima necesaria es de 60m².

Cabe mencionar que el sistema eléctrico dispone de un generador diésel de emergencia que entraría en funcionamiento para asegurar el suministro de electricidad en caso de fallo de la alimentación principal. El generador diésel se ubica en un contenedor aislado fuera del edificio, luego no ha de tenerse en cuenta para el diseño de la sala.

3.3. Layout del edificio.

3.3.1. Criterios de diseño.

El primer criterio de diseño que debe seguirse es el de adaptar el espacio disponible en la construcción inicial para integrar de forma fluida las líneas de proceso descritas en la sección 3.1. Este es uno de los objetivos principales del proyecto y uno de los motivos por los que se lleva a cabo, luego tanto el espacio como los flujos de residuo tienen una prioridad total. Además es necesario tener presente la integración de los sistemas auxiliares necesarios para abastecer a las líneas de proceso principales, luego el diseño también reservará un espacio para dichos sistemas de forma prioritaria.

Adicionalmente, además de dar respuesta a los requerimientos fijados por las líneas de proceso, el layout definitivo del edificio tiene que cumplir las normas que rigen el sector de tratamiento de residuos nucleares. A continuación se citan las normas europeas que aplican y que van a ser seguidas para llevar a cabo la distribución de salas del edificio. Se han considerado tan solo las normas europeas ya que se considera que las normas nacionales de cada país son una adaptación de estas a las políticas particulares de cada nación.

El layout del edificio se diseña teniendo en cuenta los códigos técnicos de edificación, de protección contra incendios y de seguridad nuclear que aplican. El Reglamento Europeo 305/2011 de Productos de Construcción (RPC) es el que rige las condiciones que toda construcción tiene que cumplir para conseguir un certificado de conformidad europea. Este reglamento es interpretado y adaptado según cada país. En España, por ejemplo, el reglamento es la base del Código Técnico de la Edificación que

establece las normas básicas a cumplir por cualquier construcción llevada a cabo en terreno nacional. El edificio tecnológico por tanto se diseñara para cumplir con los requisitos marcados por el RPC [17].

El layout debe separarse en salas “contaminadas” y salas “no contaminadas” o limpias para detectar los lugares de peligro de exposición a la radiación de las personas que se encuentren en el edificio.

Las normas y regulaciones internacionales que debe cumplir el edificio tecnológico se listan en la Tabla 18.

NORMAS Y REGULACIONES INTERNACIONALES		
1	Nº 300/2007, 19 de febrero de 2007	Decreto del Consejo europeo (Euratom) sobre el establecimiento de un instrumento de cooperación para la seguridad nuclear
2	2011/70/Euratom 19 de julio de 2011	Directiva del consejo europeo (Euratom) sobre el establecimiento de un marco común para el tratamiento responsable del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos
3	Nº SF-1	IAEA, Fundamentos Principales de Seguridad
4	Nº GSR, Sección 5	IAEA, Requisitos específicos de seguridad, gestión del almacenamiento previo de residuos radiactivos
5	Nº WS-R-5	IAEA, Requisitos de seguridad para el desmantelamiento de instalaciones que usan material radiactivo
6	Nº SSR-5	IAEA, Requisitos específicos de seguridad para el almacenamiento de residuo radiactivo (2011)
7	Nº SSR-6	IAEA, Requisitos específicos, Reglas para el transporte de material radiactivo (2012)
8	Nº GSG-1	IAEA, Guías generales de seguridad, Clasificación del residuo radiactivo
9	Nº WS-G-2.5	IAEA, Guías generales de seguridad, Gestión de residuo radiactivo de baja y media actividad
10	Nº WS-G-6.1	IAEA, Guías generales de seguridad, Guías para la seguridad en el almacenamiento de residuo radiactivo
11	Nº GSG-3	IAEA, Guías generales de seguridad, Evaluación y justificación de la seguridad en la gestión del almacenamiento de residuos radiactivos previo a su almacenamiento definitivo
12	Nº GS-G-3.3	IAEA, Normativa de seguridad, Sistemas de procesamiento, almacenamiento y manipulación de residuo radiactivo
13	Nº GSR, Sección 3	IAEA, Requisitos generales de seguridad, Protección radiológica: Principales reglamentos internacionales
14	IAEA TECDOC-1380	IAEA, Límites de actividad para el almacenamiento superficial de residuos radiactivos, 2003
15	IAEA TECDOC 864	IAEA, Requisitos y métodos de aceptación de residuos radiactivos de baja y media actividad, 1996

Tabla 18. Normas y regulaciones internacionales a seguir para el diseño del layout del edificio.

El diseño del layout del edificio tecnológico también va a regirse por el principio ALARA (“As Low As Reasonably Achievable”) que rige el ámbito de la seguridad radiológica [18]. Aunque los residuos a tratar en el centro tecnológico son de baja actividad y podrían ser manipulados por los operarios con las medidas de protección adecuadas, la manipulación directa solo se llevará a cabo cuando sea estrictamente necesario (clasificación de residuos). Los procesos que no requieren la actuación directa de operarios se automatizarán para cumplir los tres criterios básicos que establece el principio ALARA: Reducir al menor tiempo posible el tiempo de exposición de las personas a la radiación, mantener la mayor distancia posible entre las personas y los residuos radiactivos y mantener almacenados los residuos en contenedores o salas blindadas con acceso controlado durante el mayor tiempo posible. Con la automatización del proceso se pretende aislar todo lo posible el residuo de las personas. Para ello se debe contar en el layout con espacio para los distintos sistemas de transporte que moverán el residuo de una línea de proceso a otra. Todos los procesos automatizados serán controlados por personal experto desde la sala de control, pudiendo actuar manualmente sobre ellos en cualquier instante. Esto implica que todos los procesos deben ser monitoreados por un circuito cerrado de televisión, luego se buscará que las salas estén lo más despejadas posibles sin elementos intermedios (muros extra) que impidan la visión.

Con respecto al blindaje, otro criterio de diseño es que los residuos que tengan que ser almacenados a la espera de ser tratados en algún proceso deben almacenarse en salas específicas para ello, y siempre confinados en recipientes homologados. Los bidones normalizados de 220L y los contenedores CE-2a poseen un recubrimiento de hormigón normalizado que aporta el blindaje necesario para evitar que la radiación se propague. Además se idea un sistema de buffers para que los residuos queden lo más aislados que sea posible de las zonas de tránsito regular de personas.

3.3.2. Solución final del layout.

Tras analizar detalladamente las condiciones iniciales del edificio y teniendo en cuenta los criterios de diseño definidos en el apartado anterior se ha llegado a la solución de distribución del espacio en las salas según muestra la Figura 29. Si se desea observar de forma más detallada la distribución, acudir al plano **NCR -DET-D-M-0003/0004** adjunto en el DOCUMENTO II: PLANOS.



Figura 29. Disposición final de las salas en el edificio tecnológico

Asignación de habitaciones del Edificio Tecnológico			
Número de Sala	Nombre	Área requerida(m ²)	Área dedicada (m ²)
1	Exclusas de seguridad (Acceso de camiones con residuo)	70	71.5
2	Área de incineración	300	403
3	Sala del compresor	18	18.76
4	Sala del depósito de gasóleo	15	16.6
5	Pasillo de descarga	90	143.8
6	Buffer de almacenamiento de residuo recibido	100	98
7	Acceso "limpio" a la zona de tratamiento	28	28
8	Almacén de bidones limpios	90	91.31
9	Área de clasificación y fragmentación	475	611.16
10	Sala de supercompactación	57.5	70.29
11	Sala de cementación	160	215.3
12	Sala de tanques de drenaje	60	67.5
13	Sala de descontaminación	60	62.58
14	Sala de sistemas eléctricos	60	67.33
15	Zona de tránsito de contenedores	206	280
16	Cámara de equipos de suministro de aire de ventilación		281.3
17	Exclusas de seguridad (salida de camiones con residuo ya tratado)	70	71.5
18	Zona de recepción de residuo de las centrales nucleares	121	225
19	Sala de control	135	138
20	Laboratorio	300	309.5
21	Pasillo	30	32.4
22	Pasillo de transporte de residuo al área de incineración	47	47.18
23	Área para equipos de ventilación	360	363
24	Guardarropas/vestuario, zona limpia de seguridad	84	84
25	Sala de tuberías de suministro de agua limpia	35	35
26	Sala de los equipos de protección contra incendios	35	35
27	Sala de escaneado de contenedores (GAMS)	35	33
28	Buffer de almacenamiento de residuos incinerables	50	51.45
29	Exclusa de seguridad para residuos provenientes de CCNN	70	71.5

Tabla 19. Listado de salas del layout final del edificio tecnológico.

La justificación de la elección de salas se desarrolla a continuación

1. Exclusas de seguridad (Acceso de camiones con residuo)

En las instalaciones de tratamiento de residuos radiactivos es obligatorio que todos los accesos destinados a la entrada y salida de material radiactivo tengan que realizarse mediante un sistema de exclusas de seguridad que impidan que en ningún momento el interior del edificio se conecte directamente con el exterior. Este sistema de exclusas estancas permite que se introduzca un camión de doce metros en el muelle de seguridad. Primero se abre la primera exclusiva, permitiendo el paso del camión. Luego se cierra la exclusiva exterior y el camión permanece en el espacio de seguridad hasta que se verifique la

estanqueidad de la sala con respecto al exterior. Una vez aislado se abre la exclusiva interior dejando pasar al camión al pasillo de descarga de residuos. El tamaño de esta sala se justifica por el tamaño de los camiones que tiene que recibir (Figura **22**). Se requiere una superficie de al menos 70 m^2 para esta sala. El espacio final dedicado a esta sala ha sido algo mayor, 71.5 m^2 . De esta forma se asegura que el camión pueda entrar en la sala sin problemas.

2. Área de incineración

El área destinada a incineración es una de las que más requerimientos de espacio tiene, Además se añade la necesidad de incluir un sistema de tratamiento de gases que separe las partículas radiactivas y asegure unas condiciones de salubridad mínimas del gas para poder expulsarlo al exterior. El sistema de tratamiento de gases tiene que tener acceso al techo del edificio. Las cámaras de combustión además tienen una altura de 15 metros. La única forma de cumplir con esos requisitos es disponer de las dos alturas para la incineradora. El sistema de la incineradora, además, tiene que tener acceso al techo del edificio para poder colocar una chimenea que expulse los gases después de haber sido tratados por el sistema off-gas. La incineradora tiene que ser alimentada por su parte superior. Esto significa que los bidones con residuo incinerable tienen que transportarse al piso de arriba para poder introducirlos en el sistema de incineración. Se ha decidido colocar la incineradora en una sala con dos paredes dando al exterior ya que es una zona con riesgo potencial de incendio y de esta forma se asegura que las salidas de emergencia den directamente al exterior. También se posibilita que ante una explosión, esta pueda dirigirse hacia el exterior del edificio dañando lo menos posible otras partes del mismo. Adicionalmente esta disposición permite un fácil acceso a la sala del tanque de combustible, la cual por normativa debe estar situada en el exterior. El área total dedicada al área de incineración es de 403 m^2 , superior a los 300 m^2 requeridos. Aprovechando todo el ancho del edificio y buscando una uniformidad en la separación de las salas se ha conseguido dar más espacio a este área, pensando en que en esta sala va a haber muchos equipos que pueden variar su disposición en el momento de la instalación, con lo que el espacio extra permitirá colocarlos mejor para facilitar su operación y mantenimiento sin entorpecer el tránsito, sobre todo de los equipos del sistema off-gas.

3. Sala del compresor

Sala que alberga el compresor encargado de proveer de aire a presión a los distintos sistemas del edificio que lo necesiten: inyección de mortero, salas con sobrepresión, limpieza y descontaminación, etc. No requiere de mucho espacio y su ubicación no es relevante. Se ha decidido esta ubicación por ser donde más espacio había, además de tener fácil acceso al exterior para labores de mantenimiento. El espacio dedicado a esta sala es de 18.76 m^2 .

4. Sala del depósito de gasóleo

Sala donde se almacena el gasóleo usado como combustible para el incinerador. Debido a la normativa de protección contra incendios tiene que ser una sala exterior. El espacio dedicado a esta sala es de 16.6 m^2 , espacio más que suficiente para albergar un depósito de 20 m^3 .

5. Pasillo de descarga

El pasillo de descarga permite pasar al camión hasta la zona de recepción de residuos, donde los residuos serán trasladados con ayuda de un puente grúa al buffer de almacenamiento de residuos (6). El pasillo es suficientemente ancho (6 metros) como para permitir que algún

operario ayude en la operación de descarga del camión en caso de que sea necesario. Los camiones que entren por este pasillo solo traerán residuo radiactivo confinado en contenedores CE-2a “a granel”. También se habilita un acceso a la zona de incineración para mover los contenedores con cenizas de esta zona al área de recepción de residuos. Una vez el camión haya descargado los contenedores deberá dar marcha atrás y repetir el proceso de seguridad. No se habilita una salida más fácil al camión puesto que los criterios de diseño de edificios de ámbito nuclear especifican que se debe de disponer de los mínimos accesos al edificio que sean posibles para reducir así el riesgo de puntos de escape de radiación al exterior. El área dedicada a este pasillo es de 143.8m^2 , lo cual posibilita incluso la presencia de operarios durante operación de descarga de bidones sin problemas de espacio.

6. *Buffer de almacenamiento de residuo recibido*

Esta Sala está destinada a almacenar los contenedores con residuo radiactivo recibidos para trasladarlos al área de clasificación. Es tan solo un buffer de residuos que almacena el residuo pendiente de ser tratado. Los contenedores son descargados del camión por medio de un puente grúa y depositados en la zona de verificación. El paso de bidones se hace por encima del muro que separa ambas salas, es una sala abierta. El muro de separación es de 5 metros de alto. El tamaño de esta Sala tiene que ser suficiente como para albergar los residuos recibidos durante toda una semana. Esta sala tiene un acceso por compuerta a la zona de clasificación. No está previsto el tránsito de personas por esta sala salvo para labores de mantenimiento y limpieza. El espacio dedicado a esta sala ha sido de 98m^2 un poco inferior a los 100m^2 necesarios por cuestiones de espacio.

7. *Acceso “limpio” a la zona de tratamiento*

Es el acceso de personal y de bidones limpios (sin contaminar) a la zona de tratamiento de residuos, concretamente a la sala de clasificación y fragmentación. El acceso de personas a esta sala se realiza desde el vestuario situado en el piso de arriba (24) antes de salir de esta sala se provee a los operarios de guantes y calzas de protección contra la contaminación por radiación. En el interior de esta sala, cerca de la puerta de salida, hay un equipo de control de radiación para monitorear la radiación recibida por los operarios al entrar de nuevo a la sala limpia (dosímetros). Por esa misma puerta pasan también los bidones limpios destinados a confinar los residuos ya clasificados en la sala de clasificación. Estos se transportarán desde el almacén de bidones limpios (8) de cuatro en cuatro con ayuda de un traspale. El espacio planificado para esta sala es suficiente como para llevar a cabo todas las actividades mencionadas. Se dedican 28m^2 para este pasillo de acceso, suficiente para el tránsito de personas y de bidones limpios en paquetes de 4.

8. *Almacén de bidones limpios*

En esta sala se almacenan los bidones normalizados de 220 L limpios que se necesitarán para recoger el residuo clasificado en la sala 9. Se necesitan bidones para albergar los residuos destinados a compactación, incineración y los que van directos a cementación. Todos ellos se separan en bidones y redireccionan a sus respectivos procesos. Las dimensiones de este

almacén se eligen en función del número de bidones que se necesitan semanalmente para atender a los residuos recibidos. Su tamaño mínimo necesario se calcula a continuación.

Volumen de residuo recibido para meter en bidones al día: $19,15 \text{ m}^3/\text{día}$

→ 96 bidones/día

Bidones necesarios a la semana (7 días): 672 bidones/ semana

Espacio necesario por cada bidón: $0,36 \text{ m}^2$

Área total necesaria: $672 \text{ bidones/ semana} \cdot 0,36 \text{ m}^2/\text{bidón} = 242 \text{ m}^2$

almacenados en 4 alturas → $242/4 = 61 \text{ m}^2$

Área reservada para el tránsito: $4 \text{ m} \times 7 \text{ m} = 28 \text{ m}^2$

Área mínima necesaria para esta sala : 90 m^2

El área final dedicada a esta sala es de $91,31 \text{ m}^2$. No obstante el área real de utilización se ve reducida debido a la presencia de un pilar en la sala.

9. Área de clasificación y fragmentación

El área de clasificación y fragmentación es el punto de distribución de residuo a todos los procesos del edificio. Es una zona de mucho tránsito de recipientes, luego se requiere de suficiente espacio como para que no se entorpezca ninguna línea de proceso. Se ha decidido colocar los equipos en los extremos de la sala para dejar despejado el centro de la misma, que es por donde se distribuirán los contenedores a los distintos procesos según hayan sido clasificados en la mesa de clasificación. La sala de clasificación tiene un pasillo en su parte inferior derecha para el paso de personas a la zona de recogida de contenedores. Es una sala que tiene muchos accesos a otras salas del edificio. Se ha prestado especial atención en dejar un buen margen de maniobra en los accesos para facilitar el movimiento tanto de personas como de residuos, ya que la eficiencia de movimientos en esta sala influye en los tiempos de procesado de todas las líneas del edificio.

La sala de clasificación es una de las salas con más potencial de contaminación de todo el edificio. Los niveles de radiación en esta sala se monitorizan constantemente. En caso de emergencia la sala tiene acceso al área de descontaminación.

Este área ha tenido preferencia a la hora de asignar el espacio en el edificio. Se ha decidido dedicar un total de $611,16 \text{ m}^2$ a esta sala, dotándola de casi 150 m^2 más que los previstos ya para asegurar que las líneas tiene suficiente espacio para no entorpecerse entre sí. Así además se dispone de más espacio en caso de que se quieran incluir nuevos equipos de tratamiento en esta sala.

10. Sala de supercompactación

La sala de supercompactación ha de tener espacio para todo el equipo de compactación, que consta de un equipo de rayos X y de la máquina supercompactadora. Se ha dejado un espacio para que se puedan realizar labores de mantenimiento en la máquina. También para que puedan almacenarse los bidones que tengan que ser retirados del proceso por contener

residuo no apropiado para compactar. Para el acceso de operarios a la sala se ha creado un acceso de personal que comunica con la sala de clasificación. La sala de compactación se considera como zona sucia y por tanto deben de aplicarse a ella todos los requisitos de diseño que aplican a este tipo de salas. El espacio final dedicado es de 70.29 m².

11. Sala de cementación

La sala de cementación debe de tener espacio tanto para el equipo de cementación como para el almacenamiento de varios contenedores CE-2a vacíos para llenar con los residuos provenientes de la compactación y de la incineración. Se ha elegido este emplazamiento de la sala ya que tiene que dar al exterior para poder conectar con los silos que contienen los componentes del mortero y que se colocan fuera del edificio para facilitar su llenado con los componentes del mortero y también por motivos de altura. Los silos se conectarán con la tolva de mezcla por medio de conductos de alimentación. La sala de cementación hace de punto de confluencia entre el residuo a granel que ha sido recibido para cementar y el residuo proveniente de las centrales nucleares. Su situación es idónea para que puedan introducirse en el los dos flujos de residuo a cementar sin entorpecerse el uno al otro. El área de cementación se considera zona contaminada. Se ha decidido dedicar un espacio de 215.3 m² a la sala de cementación para aumentar la capacidad de almacenamiento de contenedores en esta sala en caso de que coincida la llegada de contenedores desde distintos procesos.

12. Sala de tanques de drenaje

Esta sala contiene los tanques de drenaje que almacenan el líquido residual de todo el edificio tecnológico. Consta de dos tanques de 15m³ y de un grupo de bombeo para evacuar el líquido. Generalmente ese líquido se utilizará como líquido de mezcla para el mortero de cementación (cementación activa): conviene que esta sala, por tanto este cerca de la sala de cementación. También conviene que esta sala esté cerca de la sala de compactación ya que es muy importante que el líquido resultante de la compactación de los bidones (2 litros por bidón aproximadamente) se recoja por el sistema de drenaje y se almacene de la forma más segura posible, ya que es líquido contaminado. Es por eso que se ha decidido colocar la sala en este emplazamiento. La superficie requerida por la sala de drenaje es de 50 m³. Su cota deberá ser más baja que as de las demás salas con el fin de poder realizar el drenaje del líquido residual pro gravedad, sin necesidad de equipos de bombeo auxiliares. Por eso debe hacerse una pequeña excavación hasta los 1.500 mm por debajo del nivel del suelo natural del edificio. 67.5 m² han sido dedicados a esta sala.

13. Sala de descontaminación

Esta sala tiene que tener acceso a la sala donde más peligro de contaminación haya, como es la sala de clasificación. Su zona de acceso es amplia para poder maniobrar con rapidez en caso de necesitarlo. Se ha colocado con una pared exterior ante la posibilidad de poder abrir un acceso al exterior para sacar el material descontaminado sin que tenga que pasar otra vez por la zona descontaminada. No se ha querido habilitar este acceso ya que se prevé que el nivel de contaminación no será tan elevado como para volver a contaminar los equipos puesto que se está tratando residuo de baja actividad, pero se guarda la posibilidad para

futuras consideraciones. Esta sala tiene un total de 62.58 m^2 , espacio suficiente para manejar todos los equipos con facilidad.

14. Sala de sistemas eléctricos

Esta sala debe de tener acceso directo al exterior para poder realizar labores de mantenimiento sin tener que atravesar ninguna zona contaminada. Además tiene que dar al exterior puesto que las acometidas de la red van a dar a esta sala. Se considera una sala libre de contaminación. Se proyectado 67.5 m^2 para esta sala a fin de dejar suficiente espacio de seguridad entre equipos eléctricos para evitar accidentes y tener fácil acceso a todas las conexiones en caso de avería.

15. Zona de tránsito de contenedores

Esta es la zona de paso de todos los contenedores ya tratados. Aquí se almacenarán los contenedores ya cementados que necesitan que el cemento seque para poder transportarlos al almacén definitivo. El tiempo de secado medio del cemento es de un día, luego la sala tiene que dimensionarse para albergar los contenedores que se han cementado durante un día entero de trabajo. Se cementan 6 contenedores al día de residuos. Se supone que la recogida de estos contenedores se hace de forma diaria con dos camiones capaces de transportar 3 contenedores cada uno. En cualquier caso se dimensionará para que la sala pueda almacenar la producción de contenedores de una semana. La sala solo tiene un acceso al exterior por medio de una exclusiva de seguridad para controlar las posibles fugas de radiación. Se ha intentado dotar del mayor espacio posible extra a esta sala, ya que en las zonas de tránsito es mejor incluir espacio de sobra para facilitar los movimientos. Se ha conseguido elevar el espacio dedicado a esta sala de 206 m^2 a 280 m^2 .

16. Cámara de equipos de suministro de aire de ventilación

En esta habitación se colocarán los equipos de ventilación encargados de impulsar el aire del exterior al resto del edificio. Aquí estarán colocadas todas las tomas de aire del exterior y los equipos de filtrado de aire. El área dedicada a esa sala es de 281.3 m^2 .

17. Exclusas de seguridad (salida de camiones con residuo ya tratado)

Es una exclusiva que funciona de forma similar a la descrita en la zona 1. Su función es aislar el interior del edificio del exterior cuando se esté introduciendo un camión que vaya a recoger los contenedores con residuo ya tratado. La sala requiere una superficie de 70 m^2 . Dedicados 71.5 m^2 .

18. Zona de recepción de residuo de las centrales nucleares

Esta zona está dedicada a recibir los residuos procedentes de la operación y desmantelamiento de centrales nucleares. Su recepción se separa de la recepción de los demás residuos porque estos residuos vienen en bidones ya pretratados y listos para cementar. Solo tiene un único acceso desde el exterior controlado por una exclusiva de seguridad. Los bidones se colocan en contenedores CE-2a y así es como se reciben en el Edificio Tecnológico. En cada contenedor caben un total de 18 bidones. Los contenedores

recibidos irán directamente a cementar. La sala tiene que tener espacio suficiente para almacenar los contenedores recibidos durante una semana.

Además de este espacio se necesita espacio extra para recibir al camión que trae los contenedores y espacio sobrante para maniobrar con los contenedores. El total se calcula una superficie mínima para esta sala de 121m^2 . El hecho de que se haya dedicado un total de 225 es debido a que al hacer el reparto de salas quedó un espacio muerto que da al exterior cuadrante 18-20 ,D-E en el plano) Se optó por incluir este espacio a esta sala ya que las demás salas en el sector 18-20 no necesitaban de más espacio y repartirlo en ellas sería desaprovecharlo. Sin embargo en esta sala se puede utilizar ese espacio como almacén de contenedores, dejando libre el resto de la sala.

19. Sala de control

La sala de control contiene todos los equipos necesarios para gestionar cada proceso de forma remota. Se considera una sala limpia en la que está permitido el tránsito de personal sin protección adicional. Desde esta sala es posible monitorizar y actuar sobre cada máquina, al igual que controlar el estado de cada sala mediante el circuito cerrado de televisión que posee el edificio. La sala incluye pantallas y cuadros de control para todos los procesos. Normalmente suele haber 10 personas en la sala de control encargadas de realizar el seguimiento de los procesos que se están llevando a cabo. Se calcula que la superficie mínima de esta sala es de 135 m^2 . Se han dedicado 138m^2 a esta sala.

20. Laboratorio

En el laboratorio se analizan muestras de los residuos recibidos en el centro tecnológico para conocer su composición real, así como residuos tratados en el centro para saber en qué condiciones son entregados para su almacenamiento final. Incluye equipos de ensayos no destructivos, bancos de pruebas químicas y radiológicas, un almacén de muestras y un sistema de calibración de equipos de medida de radiación. También incluye un pequeño despacho de dirección. Las muestras acceden al laboratorio por medio de un ascensor que sirve de elemento de separación entre la zona contaminada y la zona limpia. Es una sala con un fuerte control del nivel de radiación, ya que contendrá material radiactivo en su interior y es la zona de unión entre las salas limpias del piso de arriba y la sala más potencialmente contaminada del edificio, la sala de clasificación. La superficie necesaria para todo esto es se estima de 300 m^2 . El espacio que se ha conseguido dedicar a la sala es de 309.5 m^2 .

21. Pasillo

Pasillo de acceso a las salas de tránsito de personas de la planta superior del edificio tecnológico. Como está destinado al paso de personas solamente no necesita tener grandes dimensiones. Se calcula que la superficie necesaria para el pasillo es de 30 m^2 . Dedicados 32.4 m^2

22. Pasillo de transporte de residuo al área de incineración.

Los residuos destinados a incineración llegan desde el piso de abajo mediante un ascensor. El acceso al ascensor por el piso de arriba se encuentra en este pasillo, cuya función es

comunicar los bidones con el área de incineración. El transporte de los bidones de la salida del ascensor a la sala de incineración se realiza por medio de una cinta transportadora de rodillos. El pasillo no necesita más que la superficie mínima para instalar en el la cinta transportadora. Esta se calcula que es de 47 m².

23. Área para equipos de ventilación

Los equipos de ventilación de los edificios de ámbito radiactivo suelen ser voluminosos y necesitar condiciones especiales de posicionamiento para cumplir con las normativas sísmicas y de seguridad vigentes en el sector. Es por eso que debe reservarse un espacio considerable para situar todos estos equipos. Se consideran 360 m² como suficientes para este uso.

24. Guardarropas/vestuario, zona limpia de seguridad

En esta habitación los operarios se cambiarán y se prepararán para bajar a la zona contaminada, a la que se accede por las escaleras situadas en esta sala. Esta sala contiene baños, taquillas, equipos (trajes) de protección individual contra radiación y todo lo necesario para preparar a los operarios contra la radiación. La habitación solo tendrá un acceso desde el exterior mediante escaleras para asegurar que permanece libre de toda contaminación. El área mínima calculada para esa sala es de 84 m²

25. Sala de suministro de agua limpia

Es necesario reservar una sala para todos los equipos necesarios para suministrar agua limpia al edificio tecnológico. Esta sala contendrá los equipos de bombeo necesarios, los contadores válvula principales y demás equipos necesarios para abastecer de agua al edificio. Bastará con disponer de 35 m² para esta sala.

26. Sala de los equipos de protección contra incendios

Sala dedicada a los equipos de bombeo y demás aparatos del sistema de protección contra incendios. Se han dedicado 35 m² a esta sala, que cuenta con una salida al exterior para facilitar el mantenimiento.

27. Sala de escaneado de contenedores (GAMS)

Los contenedores cementados que no vengan de centrales nucleares tienen que pasar un control de radiación antes de ser enviados al almacén definitivo. Se realiza este escáner para verificar que cumplen los criterios de aceptación del almacén al que van dirigidos. Para realizar este escáner se ha habilitado una sala cuya área dedicada es de 33 m².

28. Buffer de almacenamiento de residuos incinerables

Los residuos clasificados como incinerables se almacenan en un buffer a la espera de ser llevados al piso de arriba para alimentar la incineradora. Esto se hace así con la finalidad de tenerlos separados del resto de residuos. La sala dispondrá de un equipo frigorífico para

guardar el residuo putrescible que venga congelado, manteniéndolo en ese estado para evitar condiciones insalubres. La sala tiene acceso al elevador de bidones al piso de arriba. El área dedicada a este buffer es de 51.45 m².

29. Exclusa de seguridad para residuos provenientes de CCNN

Otra exclusiva que funciona de forma similar a la descrita en la zona 1. Su función es aislar el interior del edificio del exterior cuando se introduzca el camino que trae los residuos de las centrales nucleares. La sala requiere una superficie de 71.5 m².

3.3. Integración de las líneas de proceso en el edificio.

En la sección 3.1. Diseño de las líneas principales de proceso.) se diseñaron de forma teórica las distintas líneas de proceso de tratamiento de residuos radiactivos disponibles en el edificio tecnológico. Ahora que se dispone del reparto de salas se deben integrar esas líneas de proceso en el layout del edificio para planificar el transporte de residuo radiactivo y el tiempo de proceso de cada tipo de residuo. Eso es lo que se va a hacer en este apartado, explicar el proceso seguido por cada tipo de residuo y hacer un cálculo estimado del tiempo requerido por cada paso de la línea de proceso de cada tipo de residuo.

Como introducción se muestra en la Figura 30 la colocación de los diferentes equipos de cada proceso en sus salas correspondientes. Los equipos no han sido representados al detalle, se ha representado el espacio que ocupan para poder describir la línea de proceso de una forma más precisa. Si se quiere ver en detalle la colocación de los equipos acudir al plano **NCR -DET-D-M-0005/0006** adjunto en el DOCUMENTO II: PLANOS.

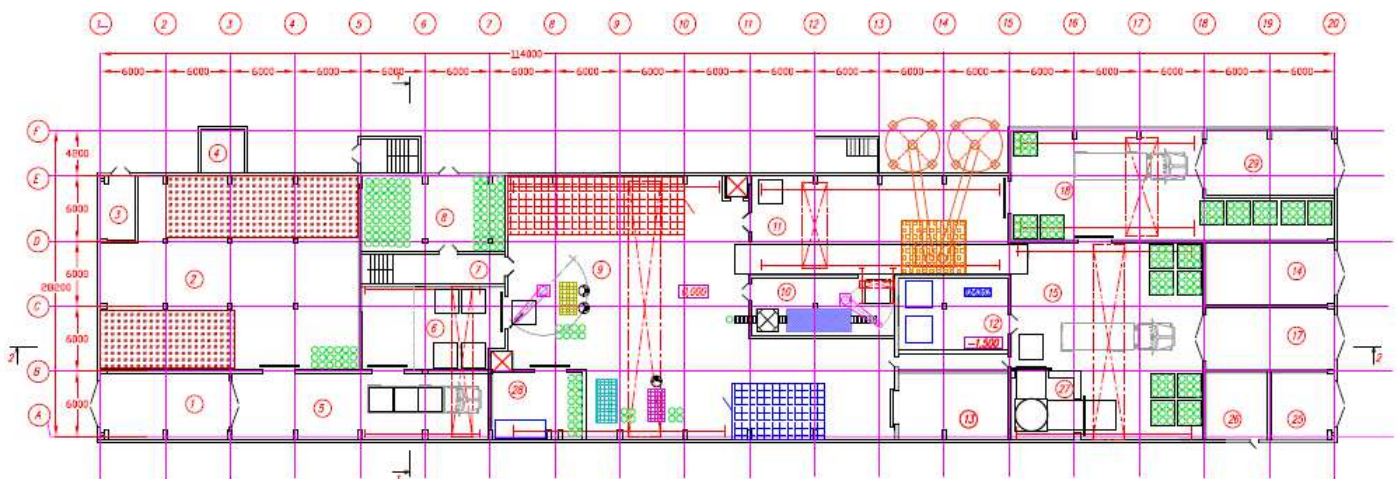


Figura 30. Integración de los equipos en el layout del edificio tecnológico

Cabe comentar que la medida real de tiempos de cada proceso se realizará una vez construido el edificio tecnológico. Todos los bidones y contenedores irán identificados con una etiqueta RFID que recoge la información de qué residuos contiene y por qué procesos ha pasado para tener localizados en todo momento los residuos en caso de alarma de contaminación. Así se podrá localizar el origen y dar con la causa de dicha contaminación. El tiempo de paso por cada proceso queda registrado en la etiqueta y podrá ser consultado desde la sala de control.

En la Tabla 20 se muestran los datos iniciales considerados para el cálculo de tiempos.

Sistemas de transporte			
Velocidad traslación puente grúa	20	m/min	
Velocidad de elevación puente grúa	20	m/min	
Velocidad traslación grúa de pórtico	10	m/min	
Velocidad de elevación grúa de pórtico	15	m/min	
Velocidad de traslación por railes	10	m/min	
Velocidad de traslación con carretilla elevadora	12	m/min	
Velocidad de traslación con cinta transportadora	18	m/min	
Incineradora			
Capacidad incineradora	50	Kg/h	
Compactadora			
Tiempo de ciclo compactación	10	min/bidón	
Capacidad compactación	5-7,5	bidones/h	
Cementadora			
Cementadora	6	contenedores/día	
Caudal de inyección de mortero	10	m3/h	
Contenedores			
Agarre de contenedor	60	segundos	
Sellado tapa contenedor	120	segundos	
Rerirado tapa contenedor	120	segundos	
Contenido medio de un contenedor		7 m3	
compactable	31%	2,2 m3	
incinerable	4%	0,3 m3	
metalico y no procesable	65%	4,6 m3	
Clasificación			
Capacidad cuchara bivalva		1 m3	bidones
compactable	31%	0,31 m3	1,55
incinerable	4%	0,04 m3	0,2
metalico y no procesable	65%	0,65 m3	3,25
Tiempo requerido para la clasificación de 1m3 de residuo		20	min
Numero de bidones por contenedor		18	

Sistemas de transporte			
Velocidad traslación puente grúa	20	m/min	
Velocidad de elevación puente grúa	20	m/min	
Velocidad traslación grúa de pórtico	10	m/min	
Velocidad de elevación grúa de pórtico	15	m/min	
Velocidad de traslación por railes	10	m/min	
Velocidad de traslación con carretilla elevadora	12	m/min	
Velocidad de traslación con cinta transportadora	18	m/min	
Incineradora			
Capacidad incineradora	50	Kg/h	
Compactadora			
Tiempo de ciclo compactación	10	min/bidón	
Capacidad compactación	5-7,5	bidones/h	
Cementadora			
Cementadora	6	contenedores/día	
Caudal de inyección de mortero	10	m3/h	
Contenedores			
Agarre de contenedor	60	segundos	
Sellado tapa contenedor	120	segundos	
Retirada tapa contenedor	120	segundos	
Contenido medio de un contenedor		7 m3	
compactable	31%	2,2 m3	
incinerable	4%	0,3 m3	
metálico y no procesable	65%	4,6 m3	
Clasificación			
Capacidad cuchara bivalva		1 m3	bidones
compactable	31%	0,31 m3	1,55
incinerable	4%	0,04 m3	0,2
metálico y no procesable	65%	0,65 m3	3,25
Tiempo requerido para la clasificación de 1m³ de residuo	20	min	
Numero de bidones por contenedor	18		

Tabla 20. Datos iniciales considerados para el cálculo de tiempos de las líneas de proceso.

3.3.1. Línea integrada de residuo compactable.

La línea de residuo compactable integrada en el edificio se muestra en la Figura 31. Como puede observarse, el flujo de residuo compactable entra en el edificio por la exclusiva de seguridad transportado por un camión y mezclado con el otro residuo que se transporte en el contenedor. El camión recorre una línea recta pasando por la exclusiva de seguridad hasta la zona de descarga de contenedores, que se encuentra al final del pasillo 5 (línea 1 del proceso). Cuando se haya estacionado el camión en la zona de descarga el puente grúa procederá a coger el contenedor y trasladarlo a la zona de escaneado de radiactividad de la sala 6. Si la verificación de radiactividad es

correcta, el contenedor se almacena en el área destinada para ello en la propia sala número 6 (línea 2 del proceso). Este proceso será común para todos los contenedores que sean recibidos por el acceso de la exclusiva 1.

El bidón espera en el almacén a que quede libre el puesto de vaciado de contenedores. Cuando el puesto puede recibir un nuevo bidón, el contenedor pasa por un sistema de railes a través de una compuerta de la sala 6 a la 9 hasta posicionarse en el área de vaciado (línea 3 del proceso). Una grúa retira la tapa del contenedor y comienza a verter el residuo del interior en la mesa de clasificación. Ahí comienzan los procesos de separación de los residuos por clases. Los operarios van colocando con ayuda de una caja de guantes el residuo compactable en un sistema de alimentación de bidones vacíos. Cuando el sistema detecta que un bidón está lleno, un operario utiliza otra caja de guantes para colocar la tapa del bidón. El contenedor es transportado por una plataforma móvil al sistema de alimentación de la compactadora (línea 4 del proceso) .

Después del proceso de compactación las galletas son introducidas en un contenedor (línea 5 del proceso) y trasladadas de la sala de compactación (10) a la sala de cementación (11) por medio de una grúa de pórtico situada en el acceso entre las dos salas. La grúa deposita el contenedor encima de los railes de alimentación de la cementadora (línea 6 del proceso). Se cementa el contenedor y se coloca su tapa, la cual se sella con cemento en el propio sistema de cementación. Luego abandona la sala 11 para ser transportada a la sala de tránsito de contenedores (15) por el mismo sistema de transporte que alimentaba la cementadora.

Una vez el contenedor esté en la sala 15 el puente grúa de esa sala cogerá el contenedor y lo almacenará en el espacio destinado a ello en la misma sala. Ahí permanecerá secando durante un día. Cuando el contenedor esté seco se cargará en el camión de extracción (línea 7 del proceso) de residuos y abandonará el edificio por la exclusiva de seguridad 29 (línea 8 del proceso).

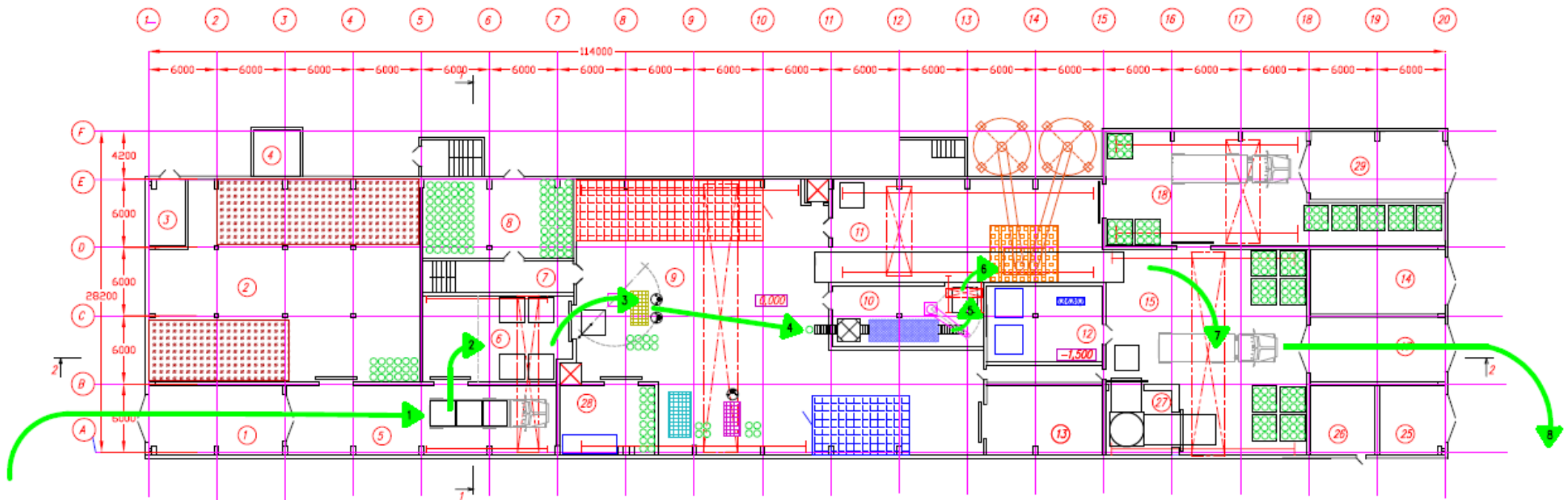


Figura 31. Línea de proceso del residuo compactable integrada en el layout del edificio tecnológico.

Calculo de tiempos del proceso de la línea seguida por el residuo compactable.

El cálculo de tiempos de este proceso se explica en la siguiente tabla:

Tiempos del proceso de residuo compactable			
Acción	Tiempo		
	segundos	minutos	horas
Entrada en la exclusiva de seguridad	20	0,33	0,006
Espera en la exclusiva de seguridad	60	1,00	0,017
Transporte hasta la zona de descarga	48	0,80	0,013
Descarga del contenedor	250	4,17	0,069
Análisis de radiación del contenedor	300	5,00	0,083
Almacenamiento contenedor en buffer	210	3,50	0,058
Subtotal	888	14,80	0,247
Transporte contenedor a sala de clasificación	230,3	3,84	0,064
Vaciado del contenido del contenedor en la mesa de clasificación	890	14,83	0,247
Tiempo de vaciado de una cuchara bivalva	285	4,75	0,079
Clasificación residuo compactable (cantidad suficiente para llenar un bidon d0,2 m3)	600	10,00	0,167
Subtotal	1115,3	18,59	0,310
Transporte del bidon a sistema de alimentación compactadora	60	1,00	0,017
Escaneado de contenido del bidón	300	5,00	0,083
Compactación del bidon	720	12,00	0,200
Posicionamiento de la galleta de compactación en contenedor	75	1,25	0,021
Llenado completo de contenedor (36 galletas)	2700	45,00	0,750
Subtotal	3855	64,25	1,071
Transporte del contenedor a sala de cementación	150	2,50	0,042
Posicionameinto del contenedor en el sistema de alimentación de la cementadora	60	1,00	0,017
Cementación del contenedor	120	2,00	0,033
sellado de la tapa del contenedor	120	2,00	0,033
transporte a la sala de tránsito de contenedores	40	0,67	0,011
Almacenamiento del contenedor en la sala de tránsito de contenedores	245	4,08	0,068
Secado del contenedor	86400	1440,00	24,000
Subtotal	87135	1452,25	24,204
Carga del contenedor en el camión de extracción de residuo (3 contenedores)	885	14,75	0,246
Espera del camion en la exclusiva de seguridad de salida	60	1,00	0,017
Salida camión	20	0,33	0,006
Tiempo total proceso sin contar secado	7558,3	125,97	2,100
Tiempo total proceso	93958,3	1565,97	26,100

3.3.2. Línea integrada de residuo incinerable.

La línea de residuo incinerable integrada en el edificio ha sido representada en la Figura 32. Como en todas las líneas que acceden al edificio tecnológico por la entrada oeste, el flujo de residuo incinerable entra en el edificio por la exclusiva de seguridad 1 transportado por un camión en contenedores junto con residuos de otra naturaleza que también se transportan en el interior del mismo. El camión recorre una línea recta pasando por la exclusiva de seguridad hasta la zona de descarga de contenedores, que se encuentra al final del pasillo 5 (línea 1 del proceso). Cuando se haya estacionado el camión en la zona de descarga el puente grúa procederá a coger el contenedor y trasladarlo a la zona de escaneado de radiactividad de la sala 6. Si la verificación de radiactividad es correcta, el contenedor se almacena en el área destinada para ello en la propia sala número 6 (línea 2 del proceso).

El bidón espera en el almacén a que quede libre el puesto de vaciado de contenedores. Cuando el puesto puede recibir un nuevo bidón, el contenedor pasa por un sistema de railes a través de una compuerta de la sala 6 a la 9 hasta posicionarse en el área de vaciado (línea 3 del proceso). Una grúa retira la tapa del contenedor y comienza a verter el residuo del interior en la mesa de clasificación. El residuo incinerable es separado por los operarios con ayuda de las cajas de guantes. El residuo incinerable se introduce en bidones de 220L. Cuando un bidón está lleno, el operario coloca la tapa a través de la caja de guantes y lo transporta al buffer de residuos a incinerar por medio de una carretilla elevadora (línea 4 del proceso).

Los bidones son almacenados en el buffer a la espera de que se indique que pueden ser trasladados al piso de arriba para ser incinerados. Cuando se considere que los bidones pueden ser subidos al piso de arriba (según restricciones de espacio en el sistema de alimentación de la incineradora) los bidones serán introducidos en el ascensor al que se tiene acceso desde el interior del buffer (sala 28)(línea 5 del proceso). El ascensor es una grúa de elevación que coge el contenedor, lo eleva y lo deposita en la cinta de rodillos del pasillo 22 del piso superior. La cinta de rodillos transporta el bidón por el pasillo hasta el área de incineración (línea 6 del proceso). Una vez llega al área de incineración el bidón es colocado cerca de la tolva de alimentación de la incineradora, en una plataforma que ha sido habilitada para ello. Como puede observarse esta plataforma es auxiliar y no puede ser cargada con más de 8 bidones a la vez. Los bidones son recogidos por el sistema de alimentación, que los destapa y vierte su contenido en la cámara de combustión (línea 7 del proceso).

Los residuos incinerables se queman en el incinerador. El residuo resultante es una ceniza que es recogida por el sistema de extracción de la incineradora e introducida en bidones de 220L. Estos bidones de cenizas una vez llenos se introducen en contenedores y se transportan desde la sala 2 a la 6 pasando por el pasillo 5 (línea 9 del proceso). En el buffer de la sala 6 esperan a poder ser trasladados por el puente grúa de la sala 9 hasta el sistema de alimentación de la cementadora (línea 10 de proceso). Este es el proceso formal de traslado de residuos incinerables a la sala de cementación. En la práctica, debido al escaso número de bidones con cenizas producido al año (alrededor de 10 bidones al año) lo que se hará es trasladar cada bidón que se obtenga por separado a la sala de clasificación. El bidón pasará por la sala 6 pero no se almacenará allí, se llevará con los bidones de residuos metálicos y no procesables y se introducirá en el mismo contenedor que estos,

ya que van a seguir el mismo proceso. Así se evita tener que esperar a llenar un contenedor entero con bidones de ceniza y se agiliza el proceso.

Una vez ahí los contenedores siguen el proceso de cementación seguido por todos los contenedores.

El Contenedor avanza por los raíles de alimentación de la cementadora hasta ser cementado y trasladado a la sala 15. Antes de secarse el contenedor es trasladado por el puente grúa a la sala 27 que contiene el sistema de control de radiación de rayos Gamma (línea 11 del proceso). El contenedor es depositado en el sistema de transporte de la sala y pasado por el escáner de radiación para verificar que cumple con los niveles de radiación exigidos por el centro de almacenamiento final. Si cumple los criterios será catalogado para ser recogido por el camión de extracción de residuos. Si no los cumple será apartado para ser trasladado a un centro de almacenamiento temporal. En todo caso el contenedor es trasladado de nuevo a la sala 15 donde se almacenará a la espera de ser recogido por el camión correspondiente (línea 12 del proceso). Una vez seco el contenedor será cargado en un camión y abandonará el edificio (línea 13 del proceso).

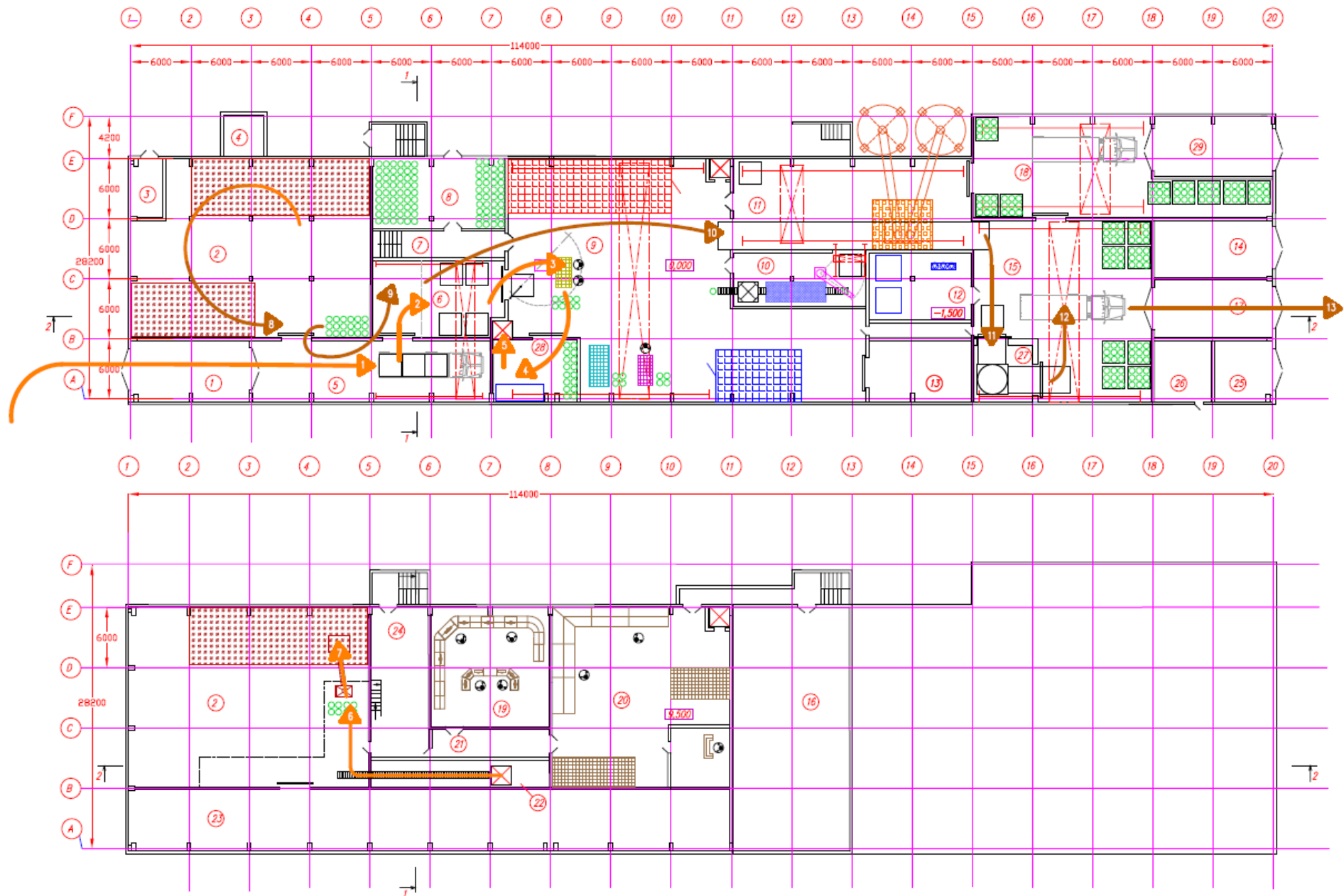


Figura 32. Línea de proceso del residuo incinerable integrada en el layout del edificio tecnológico.

Calculo de tiempos del proceso de la línea seguida por el residuo incinerable.

El cálculo de tiempos de este proceso se explica en la siguiente tabla:

Tiempos del proceso de residuo incinerable			
Acción	Tiempo		
	segundos	minutos	horas
Entrada en la exclusiva de seguridad	20	0,33	0,006
Espera en la exclusiva de seguridad	60	1,00	0,017
Transporte hasta la zona de descarga	48	0,80	0,013
Descarga del contenedor	250	4,17	0,069
Análisis de radiación del contenedor	300	5,00	0,083
Almacenamiento contenedor en buffer	210	3,50	0,058
Subtotal	888	14,80	0,247
Transporte contenedor a sala de clasificación	230,3	3,84	0,064
Vaciado del contenido del contenedor en la mesa de clasificación	960	16,00	0,267
Tiempo de vaciado de cinco cucharas bivalvas	730	12,17	0,203
Clasificación residuo incinerable (cantidad suficiente para llenar un bidon de 0,2 m3)	6000	100,00	1,667
Tiempo en llenar un carrito completo (4 bidones)	24000	400,00	6,667
Transporte del bidon a buffer incineración	20	0,33	0,006
Almacenamiento bidón en el buffer	120	2,00	0,033
Subtotal	31100,29	518,34	8,639
Elevación del bidón a piso superior	227,5	3,79	0,063
Transporte del bidón al area de incineración	75	1,25	0,021
Colocación del bidón cerca del sistema de alimentación ce la incineradora	150	2,50	0,042
Alimentación de la incineradora	150	2,50	0,042
Incineración del residuo	5400	90,00	1,500
Transporte de contenedor a sala 6 de almacenamiento	210	3,50	0,058
Almacenamiento del contenedor	200	3,33	0,056
Transporte del contenedor a sala de cementación	375	6,25	0,104
Posicionameinto del contenedor en el sistema de alimentación de la cementadora	60	1,00	0,017
Cementación del contenedor	120	2,00	0,033
Sellado de la tapa del contenedor	120	2,00	0,033
Subtotal	7087,5	118,13	1,969
Transporte a la sala de escaner de radiactividad	230	3,83	0,064
Escaner de radiactividad	365	6,08	0,101
Transporte a la sala de tránsito de contenedores	40	0,67	0,011
Subtotal	635	10,58	0,176
Almacenamiento del contenedor en la sala de tránsito de contenedores	245	4,08	0,068
Secado del contenedor	86400	1440,00	24,000
Carga del contenedor en el camión de extracción de residuos	885	14,75	0,246

Espera del camion en la exclusiva de seguridad de salida	60	1,00	0,017
Salida camión	20	0,33	0,006
Tiempo del proceso sin contar secado	40920,79	682,01	11,367
Tiempo de proceso	127320,8	2122,01	35,367

3.3.3. Línea integrada de residuo metálico y no procesable.

La línea de residuo metálico y no procesable es más sencilla que las anteriores. Su integración en el edificio se muestra en la Figura 33. El flujo de residuo metálico y no procesable, como todos los residuos a clasificar, entra en el edificio por la exclusiva de seguridad transportado por un camión en contenedores mezclado con el otro residuo que se transporte en el contenedor. El camión recorre una línea recta pasando por la exclusiva de seguridad hasta la zona de descarga de contenedores, que se encuentra al final del pasillo 5 (línea 1 del proceso). Cuando se haya estacionado el camión en la zona de descarga el puente grúa procederá a coger el contenedor y trasladarlo a la zona de escaneado de radiactividad de la sala 6. Si la verificación de radiactividad es correcta, el contenedor se almacena en el área destinada para ello en la propia sala número 6 (línea 2 del proceso).

El bidón espera en el almacén a que quede libre el puesto de vaciado de contenedores. Cuando el puesto puede recibir un nuevo bidón, el contenedor pasa por un sistema de railes a través de una compuerta de la sala 6 a la 9 hasta posicionarse en el área de vaciado (línea 3 del proceso). Una grúa retira la tapa del contenedor y comienza a verter el residuo del interior en la mesa de clasificación. Ahí comienzan los procesos de separación de los residuos por clases. El residuo metálico es separado fácilmente por medio de un imán (línea 4 del proceso) y llevado a los bidones correspondientes. El residuo no procesable es clasificado por los operarios y conducido a los bidones con ayuda de las cajas de guantes. Cuando los bidones están llenos se tapan y se introducen en contenedores. Cuando la capacidad de los contenedores esté completa se trasladan al área de cementación por medio de railes (línea 4 del proceso).

La grúa de la sala 9 deposita el contenedor encima de los railes de alimentación de la cementadora. Se cementa el contenedor y se coloca su tapa, la cual se sella con cemento en el propio sistema de cementación. Luego abandona la sala 11 para ser transportada a la sala de tránsito de contenedores (15) por el mismo sistema de transporte que alimentaba la cementadora.

Una vez el contenedor esté en la sala 15 el puente grúa de esa sala cogerá el contenedor y trasladará a la sala 27 dedicada al escáner del nivel de radiactividad de los contenedores (línea 5 del proceso). El contenedor es depositado en el sistema de transporte de la sala y pasado por el escáner de radiación para verificar que cumple con los niveles de radiación exigidos por el centro de almacenamiento final. Si cumple los criterios será catalogado para ser recogido por el camión de extracción de residuos. Si no los cumple será apartado para ser trasladado a un centro de almacenamiento temporal. El contenedor es trasladado de nuevo a la sala 15 donde se almacenará a la espera de ser recogido por el camión correspondiente (línea 6 del proceso). Una vez seco el contenedor será cargado en un camión y abandonará el edificio (línea 7 del proceso).

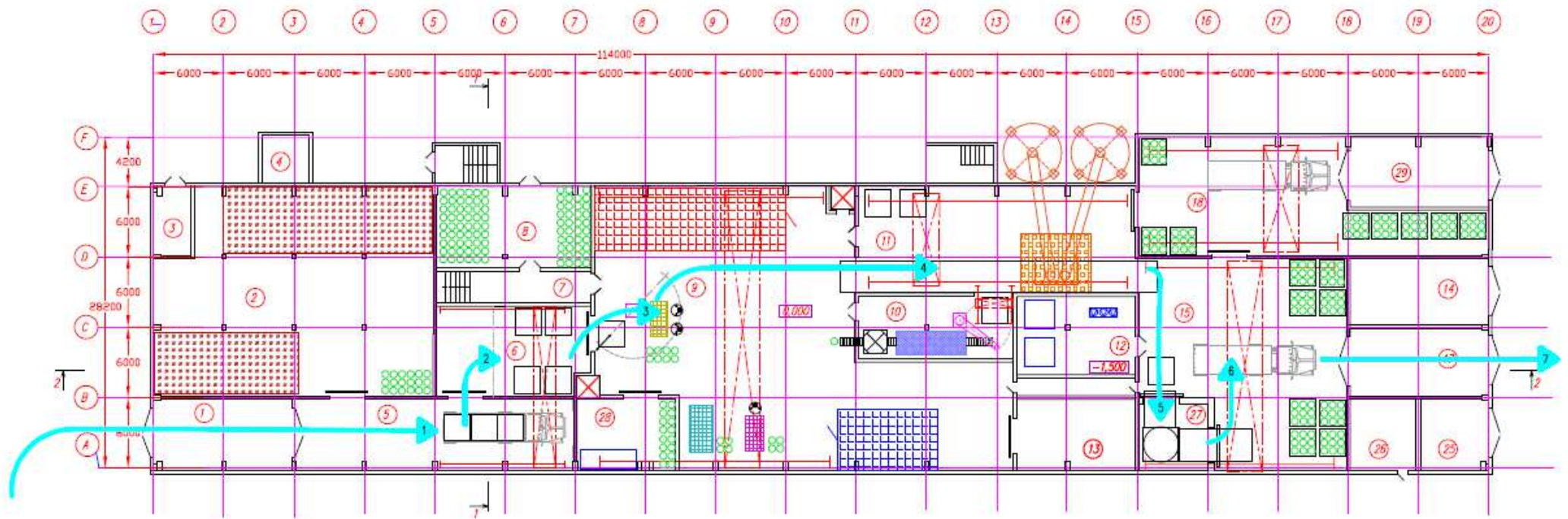


Figura 33. Línea de proceso del residuo metálico y no procesable integrada en el layout del edificio tecnológico.

Calculo de tiempos del proceso de la línea seguida por el residuo metálico y no procesable.

El cálculo de tiempos de este proceso se explica en la siguiente tabla.

Tiempos del proceso de residuo metálico & no procesable			
Acción	Tiempo		
	segundos	minutos	horas
Entrada en la exclusiva de seguridad	20	0,33	0,006
Espera en la exclusiva de seguridad	60	1,00	0,017
Transporte hasta la zona de descarga	48	0,80	0,013
Descarga del contenedor	250	4,17	0,069
Análisis de radiación del contenedor	300	5,00	0,083
Almacenamiento contenedor en buffer	210	3,50	0,058
Subtotal	888	14,80	0,247
Transporte contenedor a sala de clasificación	230,3	3,84	0,064
Vaciado del contenido del contenedor en la mesa de clasificación	890	14,83	0,247
tiempo de vaciado de una cuchara bivalva	285	4,75	0,079
tiempo de vaciado de seis cucharas bivalvas	1710	28,50	0,475
Clasificación residuo metálico y no procesable (cantidad suficiente para llenar un bidon de 0,2 m3)	360	6,00	0,100
Tiempo para clasificar 18 bidones (un contenedor)	6480	108,00	1,800
Subtotal	8780,294	146,34	2,439
Transporte del contenedor a sala de cementación	90	1,50	0,025
Posicionamiento del contenedor en el sistema de alimentación de la cementadora	60	1,00	0,017
Cementación del contenedor	120	2,00	0,033
Sellado de la tapa del contenedor	120	2,00	0,033
Subtotal	390	6,50	0,108
Transporte a la sala de escaner de radiactividad	230	3,83	0,064
Escaner de radiactividad	365	6,08	0,101
Transporte a la sala de tránsito de contenedores	40	0,67	0,011
Subtotal	635	10,58	0,176
Almacenamiento del contenedor en la sala de tránsito de contenedores	245	4,08	0,068
Secado del contenedor	86400	1440,00	24,000
Carga del contenedor en el camión de extracción de residuos	885	14,75	0,246
Espera del camion en la exclusiva de seguridad de salida	60	1,00	0,017
Salida camión	20	0,33	0,006
Tiempo del proceso sin contar secado	11903,29	198,39	3,306
Tiempo total del proceso	98303,29	1638,39	27,306

3.3.4. Línea integrada de residuo procedente de centrales nucleares.

Los residuos provenientes de la operación y desmantelamiento de centrales nucleares entran por otro acceso diferente a los residuos de los demás productores. Esto es debido a que nos residuos especiales que no hace falta clasificar ya que se reciben acondicionados en bidones colocados dentro de contenedores y listos para ser cementados. La integración de la línea de proceso se representa en la Figura 34. El acceso habilitado para este tipo de residuos se sitúa en la cara este del edificio. La entrada de los camiones que transportan estos residuos se realizará por la exclusiva de seguridad de la sala 28. El camión entrará por la exclusiva hasta la zona de recepción de la sala 18 (línea 1 del proceso). El camión estacionará en la zona reservada. El puente grúa de esta sala descargará los contenedores y los almacenará en las zonas de la sala 18 habilitadas como almacén. Ahí esperarán a poder ser introducidos en la sala de cementación (línea 2 del proceso).

Los contenedores serán llevados hasta la sala de cementación con ayuda de carretillas de elevación (línea 3 del proceso). Se almacenarán en el pequeño almacén de la sala de cementación hasta poder introducirse en la línea de cementación. El puente grúa de la sala de cementación colocará el contenedor en el sistema de alimentación de la cementadora (línea 4 del proceso). El contenedor será cementado y sellado y se trasladará al almacén de contenedores de la sala 15, donde se secará durante 1 día (línea 5 del proceso). Después de haberse secado estará listo para ser enviado al almacén definitivo. Cuando llegue el camión de extracción de residuos, el contenedor se cargará en él (línea 6 del proceso). El camión saldrá por la exclusiva 28 de salida del edificio hacia el almacén final (línea 7 del proceso).

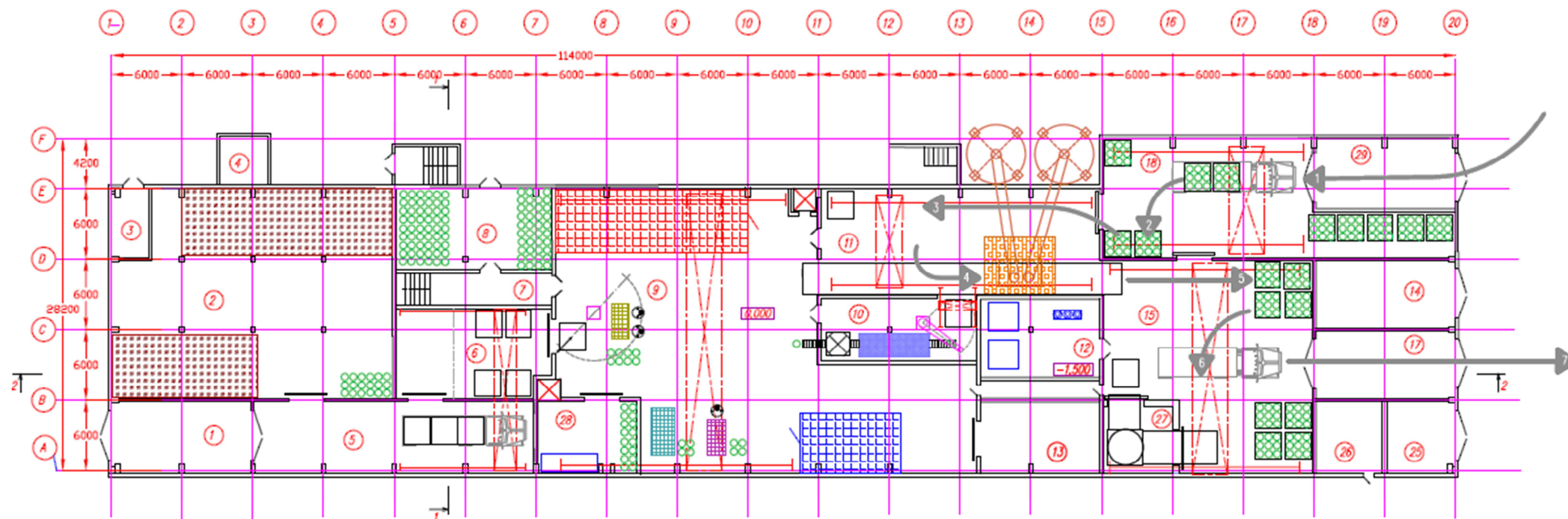


Figura 34. . Línea de proceso del residuo procedente de las centrales nucleares integrada en el layout del edificio tecnológico.

Calculo de tiempos del proceso de la línea seguida por el residuo procedente de centrales nucleares.

El cálculo de tiempos de este proceso se explica en la siguiente tabla:

Tiempos del proceso de residuo provenientes de Centrales Nucleares			
Acción	Tiempo		
	segundos	minutos	horas
Entrada en la exclusiva de seguridad	20	0,33	0,006
Espera en la exclusiva de seguridad	60	1,00	0,017
Transporte hasta la zona de descarga	40	0,67	0,011
Descarga y almacenamiento del contenedor	250	4,17	0,069
Subtotal	370	6,166667	0,102778
Transporte contenedor a sala de cementación	230	3,83	0,064
Posicionamiento del contenedor en el sistema de alimentación de la cementadora	60	1,00	0,017
Cementación del contenedor	120	2,00	0,033
Sellado de la tapa del contenedor	120	2,00	0,033
transporte a la sala de tránsito de contenedores	40	0,67	0,011
Almacenamiento del contenedor en la sala de tránsito de contenedores	245	4,08	0,068
Secado del contenedor	86400	1440,00	24,000
Subtotal	87215	1453,583	24,22639
Carga del contenedor en el camión de extracción de residuos	885	14,75	0,246
Espera del camión en la exclusiva de seguridad de salida	60	1,00	0,017
Salida camión	20	0,33	0,006
Tiempo del proceso sin contar secado	2150	35,83	0,597
tiempo total del proceso	88550	1475,83	24,597

3.3.5. Línea integrada de flujo de personas.

El flujo de personas no es un proceso en sí, por eso no sigue un orden, pero es importante definir los movimientos de del personal del edificio para identificar los puntos de acceso de personal a las salas, así como saber por dónde pueden moverse los operarios del edificio.

La entrada de personal al edificio puede hacerse por dos accesos colocados en la cara norte del edificio. Estos dos accesos se realizarán por la planta superior, ya que es la planta con menos riesgo de contaminación del edificio. El acceso ordinario se realizará por la escalera que conecta el piso bajo con la sala 24. Este es un acceso libre de contaminación. La sala 24 está dedicada a vestuarios, baños y taquillas donde se guardan los equipos de protección individual contra la radiación. En esta sala se preparan los operarios que vayan a trabajar en salas contaminadas. El otro es un acceso de emergencia y mantenimiento que permite el paso al laboratorio y a la sala de equipos de suministro de aire de ventilación.

Desde la sala 24 se puede acceder al resto de salas de la planta de arriba mediante el pasillo 21. La sala 24 también tiene acceso directo a la zona de incineración. Por las escaleras que se encuentran en la sala 24 se accede al piso de abajo. Este es el único acceso existente desde la zona limpia a la zona más contaminada. Esto se ha diseñado así para poder controlar de forma precisa el acceso de personal de la zona contaminada a la limpia y así evitar la posible contaminación del piso de arriba. Por las escaleras se desciende a la zona de acceso controlado al área de tratamiento de residuos. De ahí se accede directamente a la sala de clasificación y fragmentación. No se podrá acceder a dicha sala sin llevar los equipos de protección contra radiación requeridos. Antes de acceder a la sala 9 desde la 7 los operarios deben ponerse unas calzas, máscara y guantes de protección desechables. Existe un acceso al edificio por la sala 8 pero está destinado a la introducción de bidones limpios a la sala, no al acceso de personas. Se debe controlar que el acceso a esa sala desde el exterior se realice siempre con las puertas de la sala 7 cerradas.

Una vez los operarios estén en la zona de clasificación y fragmentación (sala 9) se podrán mover a sus diferentes puestos de trabajo en las distintas salas contaminadas. Los accesos a las salas que den con el exterior siempre se realizan mediante dobles puertas, nunca mediante puertas de acceso directo.

En caso de que alguna persona resulte seriamente contaminada se llevará a la sala 13 para proceder a su descontaminación.

El retorno de personas de la zona contaminada a la zona limpia se hace por la misma puerta de acceso a la sala 7. Eso sí, para poder subir a la zona limpia hay que pasar estrictos controles de dosimetría y niveles de contaminación que si no son superados el individuo en cuestión tendrá que ser llevado a la sala 13 para su descontaminación. Al entrar a la sala 7 los operarios tirarán los equipos de protección desechables a un contenedor especial.



Capítulo 4.

Conclusiones.

Una vez terminado este proyecto es momento de valorar los logros que se han conseguido con su ejecución.

En primer lugar hay que analizar los **aspectos técnicos** de la realización del proyecto. La primera ventaja apreciada es que se ha conseguido diseñar un centro de tratamiento de residuos que contenga todas las tecnologías necesarias para tratar los residuos de los distintos productores, sin necesidad de que cada uno envíe sus residuos a distintos centros de tratamiento según su naturaleza. Se puede observar esta integración en que el edificio tecnológico es capaz de recibir tanto residuo sin clasificar como residuo procedente de centrales nucleares, integrando ambas líneas de forma eficaz.

Sin el edificio tecnológico el residuo sólido de baja actividad era acumulado en contenedores sin ningún tipo de clasificación ni tratamiento y enviado a cementar, o incluso almacenado sin cementar en los mismos contenedores.

Suponiendo que los 4510.8 m³ anuales que trata el edificio tecnológico se enviaran directamente a cementar dentro de contenedores, el número de contenedores resultante a mandar a los centros de almacenamiento sería:

$$4510.8 \text{ m}^3 = 22554 \text{ bidones} = 1253 \text{ contenedores}$$

Se obtendrían 1253 contenedores CE-2a al año para almacenar. Sin embargo, con el edificio tecnológico el residuo es clasificado, tratado según su naturaleza, monitoreado y cementado siguiendo los criterios europeos de seguridad. Tras el paso por el edificio tecnológico, los contenedores obtenidos para su almacenamiento definitivo son:



Se obtienen 1023 contenedores listos para ser trasladados al almacén definitivo. Eso significa 230 contenedores menos que si no se trataran en el centro tecnológico. Si el volumen externo de un contenedor CE-2a es de 2.25x2.25x2.2=11.14 m³ el tratamiento de residuos en el centro tecnológico supone una ganancia en volumen de almacenamiento final de 2561.625m³. Eso supone un gran

ahorro para el gobierno del país. Además de suponer un ahorro económico supone un aumento de la seguridad de los almacenes al saber que el residuo contenido en los contenedores ha sido tratado con los procesos adecuados y monitoreada su radiación en todo momento para cerciorarse de que cumple con todos los requisitos exigidos.

En relación a los aspectos técnicos menos favorables llama la atención la baja utilización del proceso de incineración en relación con el volumen dedicado a dicha instalación. En el edificio tecnológico se tratan tan solo 128 m³ de residuos incinerables al año. La incineradora, aun siendo de las más pequeñas dentro de las utilizadas para el sector nuclear, tiene una capacidad de tratamiento máxima de 40 m³/h (50kg/h) con esa capacidad podría tratar 112000 m³ de residuos al año si trabajase de manera continua durante los 175 días hábiles del año. Ya que el flujo de residuos a incinerar es tan escaso, podría plantearse aprovechar la instalación existente para introducir una nueva línea de residuos incinerables para que sean tratados en el centro. Gracias a todo el sistema de off-gas instalado en la incineradora obligado por normativa nuclear, la incineradora podría tratar sin problema residuos biológicos, que son unos de los residuos incinerables más complicados de tratar debido al alto nivel de contaminación de los gases producto de su quema. Esta sería una opción interesante a tener en cuenta. Respecto al funcionamiento de las otras máquinas, sus capacidades son aprovechadas de manera eficiente.

Prestando atención a los tiempos de las líneas de proceso se puede observar cómo, sin considerar el día que tardan los contenedores cementados en secarse, el proceso más rápido es el de cementación (15 minutos por contenedor). Esto permite que los residuos que solo necesitan ser cementados puedan ser atendidos con mayor rapidez, sin colapsar las líneas ni crear atascos inesperados. Esto posibilita además la integración de las demás líneas de proceso, ya que todas acaban en la sala de cementación.

Por desgracia no se ha dispuesto de tiempo suficiente para realizar un modelo del sistema de procesado del edificio en un software especializado, como puede ser ARENA, y simular la integración de todos los procesos para observar que el cálculo teórico realizado es válido. Este sería uno de los primeros pasos a realizar en las siguientes etapas del proyecto. Aún sin haberlo simulado, se puede concluir según los resultados de los cálculos teóricos que por cada contenedor a clasificar que llega al centro tecnológico, tarda en salir uno tratado una media de 29.59 horas. Puede observarse que donde más tiempo se tarda en procesar los contenedores es en el tiempo de secado necesario después de la cementación. Puede considerarse que el diseño del edificio tecnológico es eficiente, pero esto solo podrá demostrarse después de hacer las simulaciones pertinentes y ajustar las líneas de una forma correcta.

Respecto a la consecución de los objetivos marcados al principio del proyecto, puede decirse que se han cumplido todos según lo previsto. Es posible que al ser un proyecto genérico destinado a ser llevado a cabo en el país que lo necesite puede que se encuentre algún problema ya que este proyecto solo ha tenido en cuenta la normativa general europea y ninguna otra normativa de ámbito nacional. De cualquier manera se necesitarán pequeños ajustes para adecuarlo a las normativas nacionales.

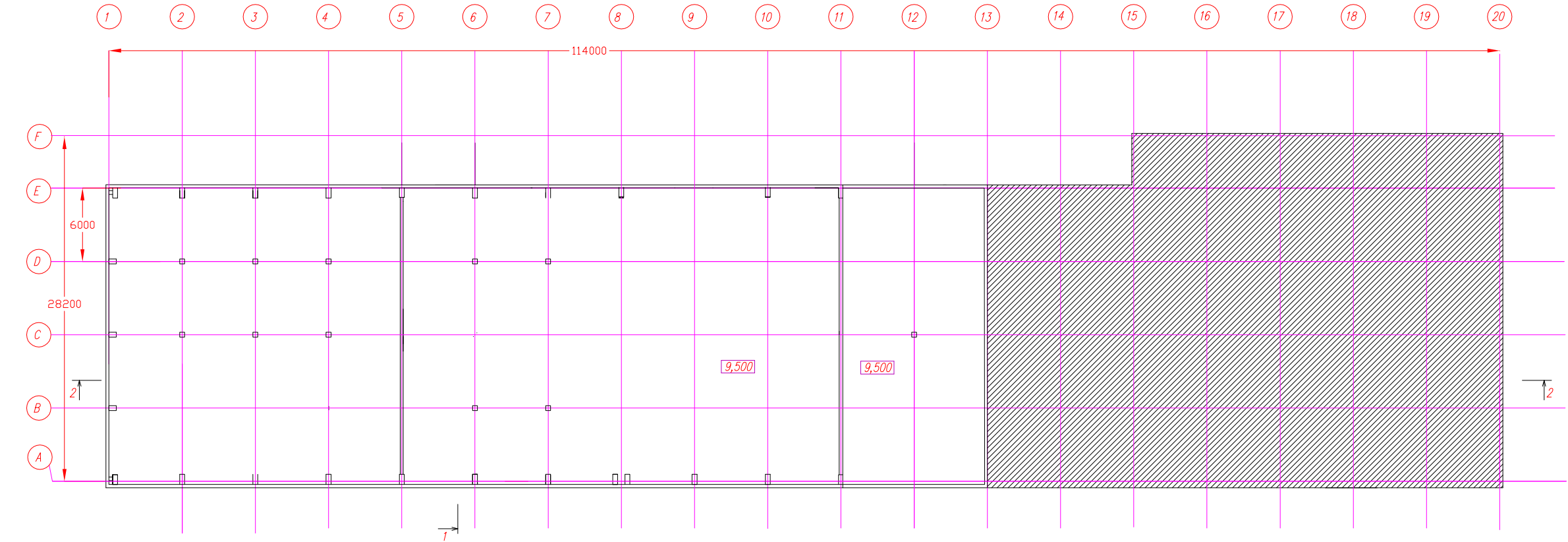
En resumen, la ejecución del proyecto ha tenido que lidiar con ciertos problemas, como la lentitud del proceso de intercambio de información con los proveedores, la dificultad de la estimación del

inventario para un país tipo, o la dificultad no prevista en un primer momento de la integración de todas las líneas de proceso en el layout del edificio. A pesar de todo eso se ha conseguido desarrollar un proyecto que sirve como fase inicial de un proyecto real de construcción de un Edificio Tecnológico para en tratamiento de residuos radiactivos.

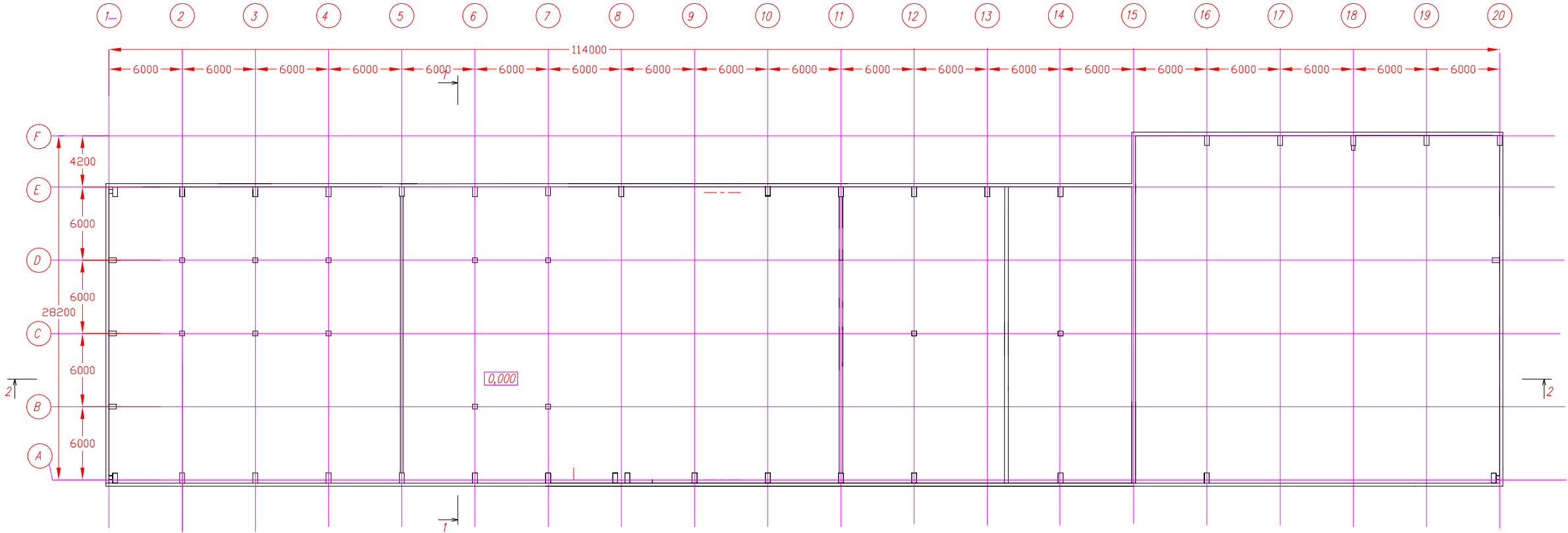
DOCUMENTO II:

PLANOS

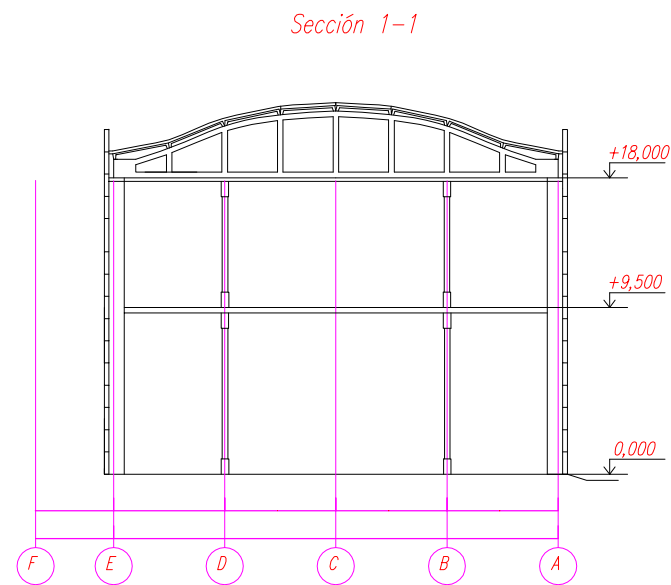
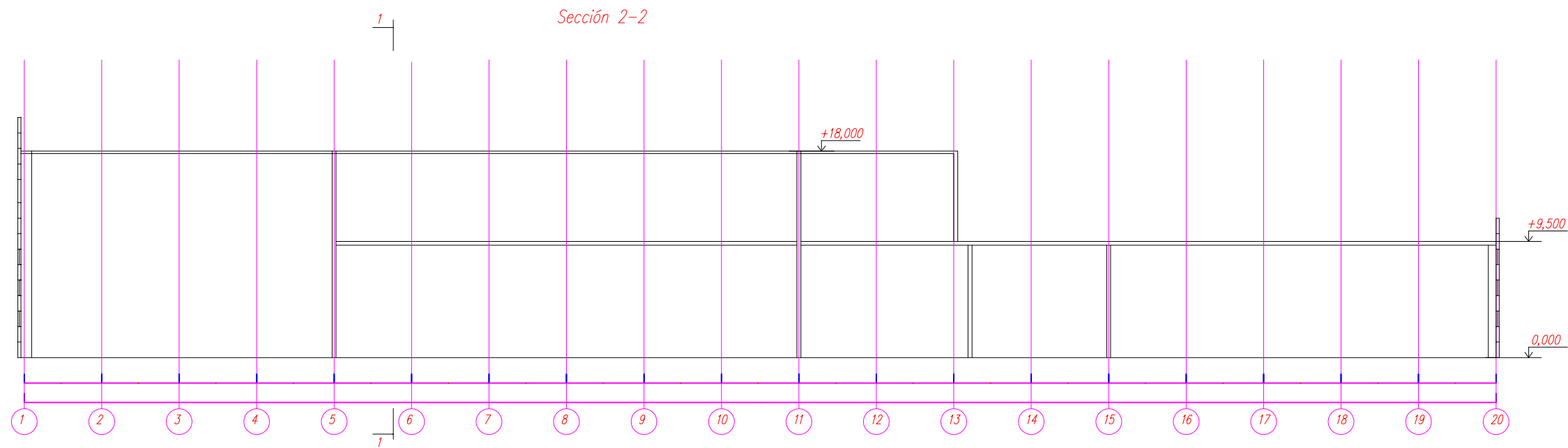
Plano en planta. elev: +9.500



Vista en planta elev: +0.000

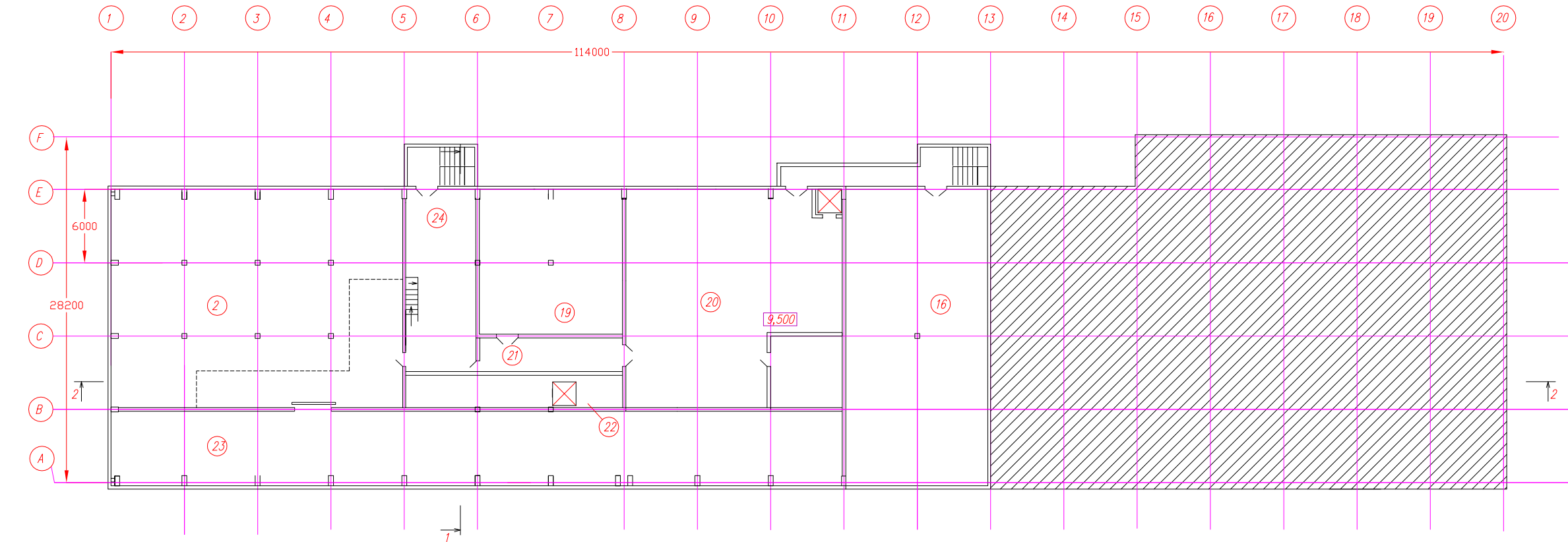


DIBUJADO POR : Francisco Herrera Garcia		PROYECTO DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS	
APROBADO POR : Javier Bárcena Risueño		TÍTULO Layout inicial del Edificio Tecnológico	
FECHA	15/06/2017	PLANO Nº NCR-DET-D-M-0001	
ESCALA	1:400	HOJA 1 DE 14	

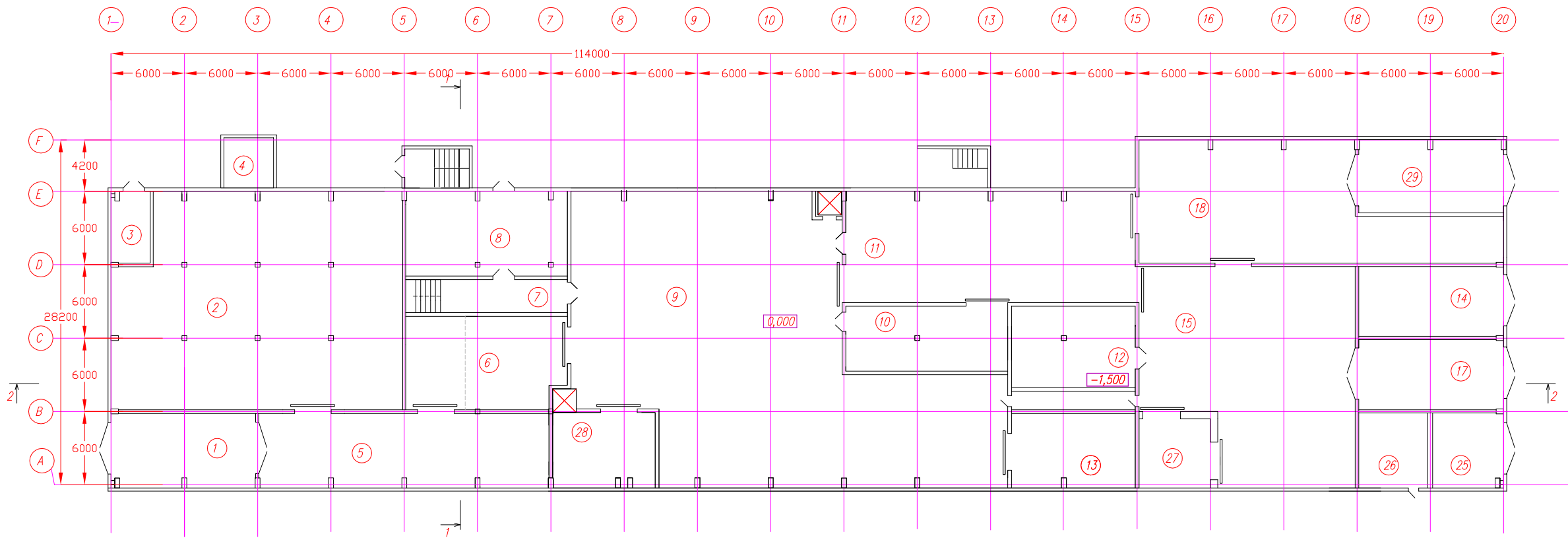


DIBUJADO POR : Francisco Herrera García			PROYECTO DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIACTIVOS	
APROBADO POR : Javier Bárcena Risueño			TÍTULO Vistas auxiliares del Layout inicial del Edificio Tecnológico	
FECHA	15/06/2017	PLANO Nº		HOJA 2 DE 14
ESCALA	1:400	NCR-DET-D-M-0002		

Plano en planta. elev: +9.500



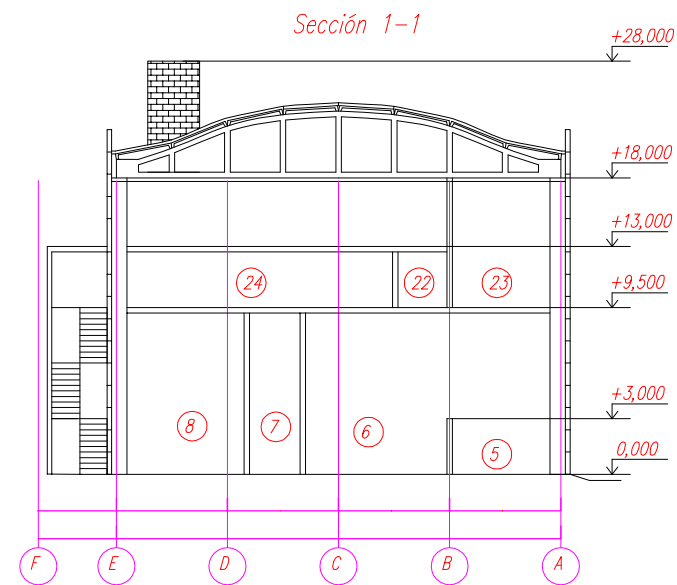
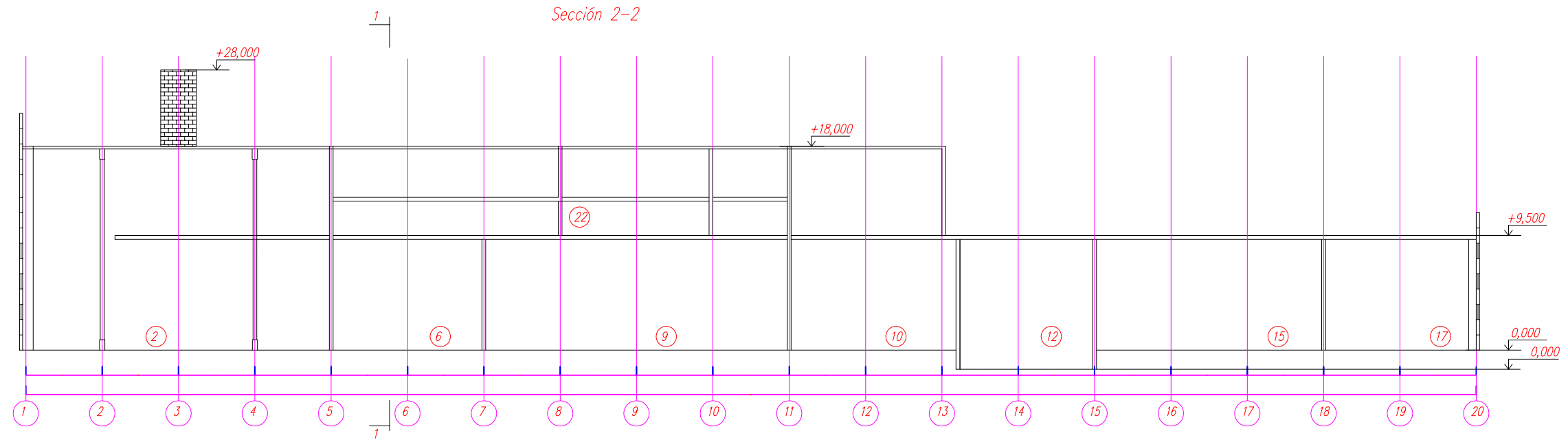
Vista en planta elev: +0.000



Listado de salas

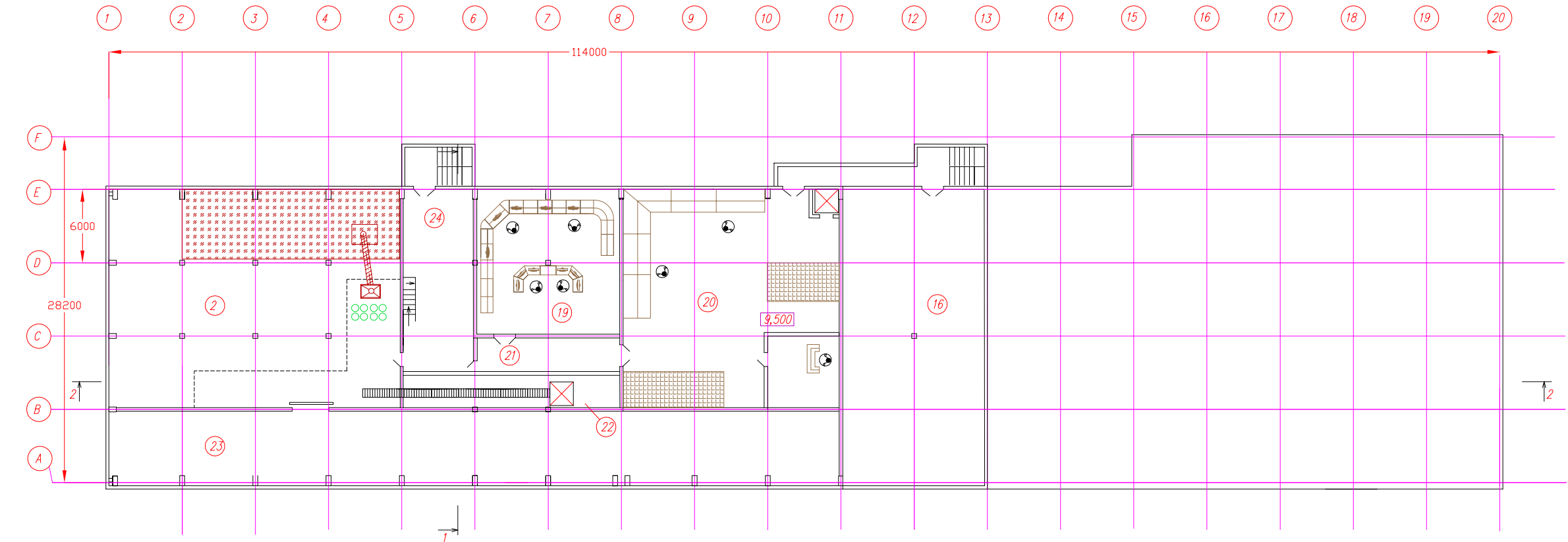
Número	Nombre	Area, m ²
1	Exclusa de acceso de seguridad	71.5
2	Área de incineración	403
3	Sala del compresor	18.76
4	Sala del depósito de gasóleo	16.6
5	Pasillo de descarga	143.8
6	Buffer de residuo recibido	98
7	Acceso limpio a zona de tratamiento	28
8	Almacén de bidones limpios	91.31
9	Área de clasificación y fragmentación	611.16
10	Sala de supercompactación	70.29
11	Sala de cementación	21.53
12	Sala de tanques de drenaje	67.5
13	Sala de descontaminación	62.58
14	Sala de sistemas eléctricos	67.33
15	Área de tránsito de contenedores area	280
16	Cámara de suministro de aire de ventilación	281.3
17	Exclusa de acceso de seguridad	71.5
18	Zoñina de recepción de residuo de CCNN	225
19	Sala de control	138
20	Laboratorio	309.5
21	Pasillo	32.4
22	Pasillo de transporte de residuo área de incineración	47.18
23	área para equipos de ventilación	363
24	Vestuario/ zona limpia de seguridad	84
25	Sala de suministro de agua limpia	35
26	Sala de equipos de protección contra incendios	35
27	Sala de control de radiación GAMS	33
28	Buffer de residuos incinerables	51.45
29	Exclusa de acceso de seguridad	71.5

DIBUJADO POR : Francisco Herrera Garcia		PROYECTO DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS	
APROBADO POR : Javier Bárcena Risueño		TÍTULO Layout Final del Edificio Tecnológico	
FECHA	15/06/2017	PLANO N° NCR-DET-D-M-0003	
ESCALA	1:400	HOJA 3 DE 14	

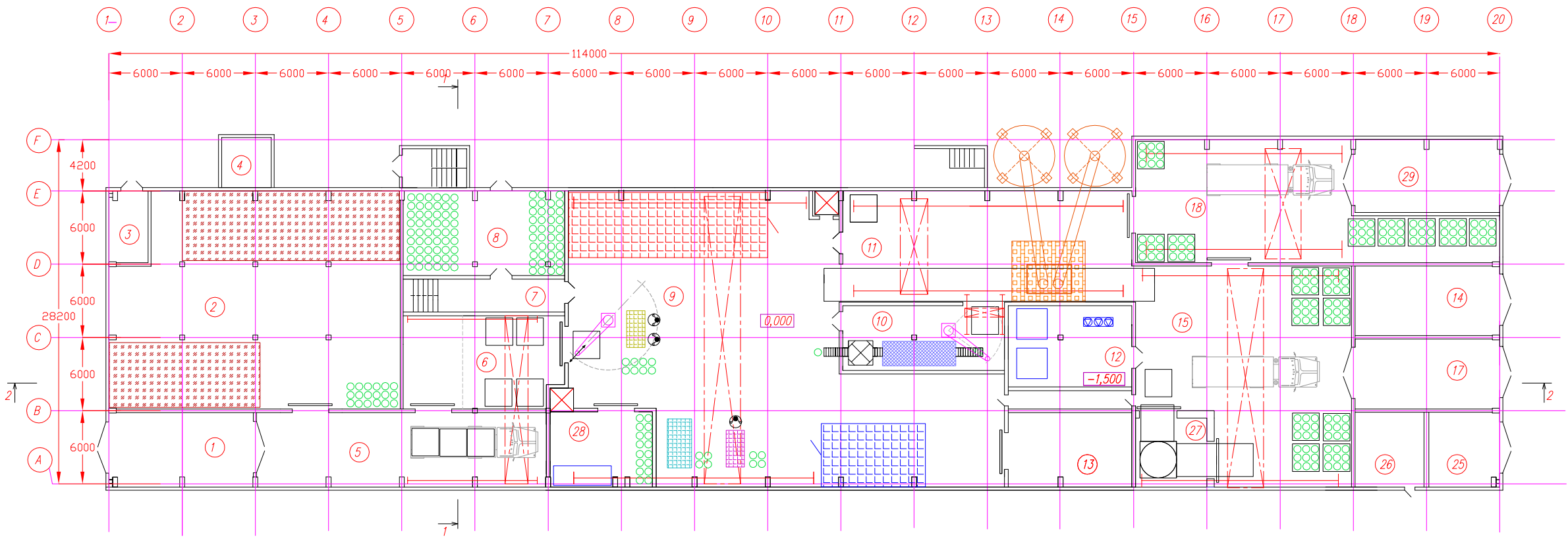


DIBUJADO POR : Francisco Herrera García		PROYECTO DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIACTIVOS
APROBADO POR : Javier Bárcena Risueño		
FECHA	15/06/2017	TÍTULO Vistas auxiliares del Layout final del Edificio Tecnológico
ESCALA	1:400	PLANO Nº NCR-DET-D-M-0004
		HOJA 4 DE 14

Plano en planta. elev: +9.500



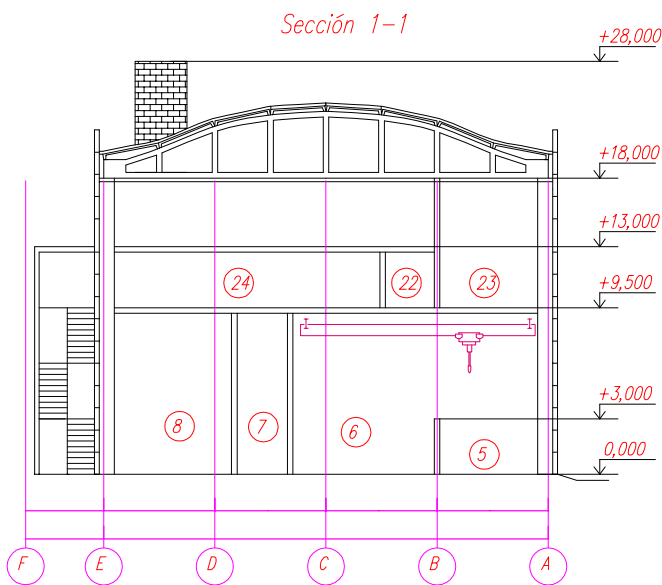
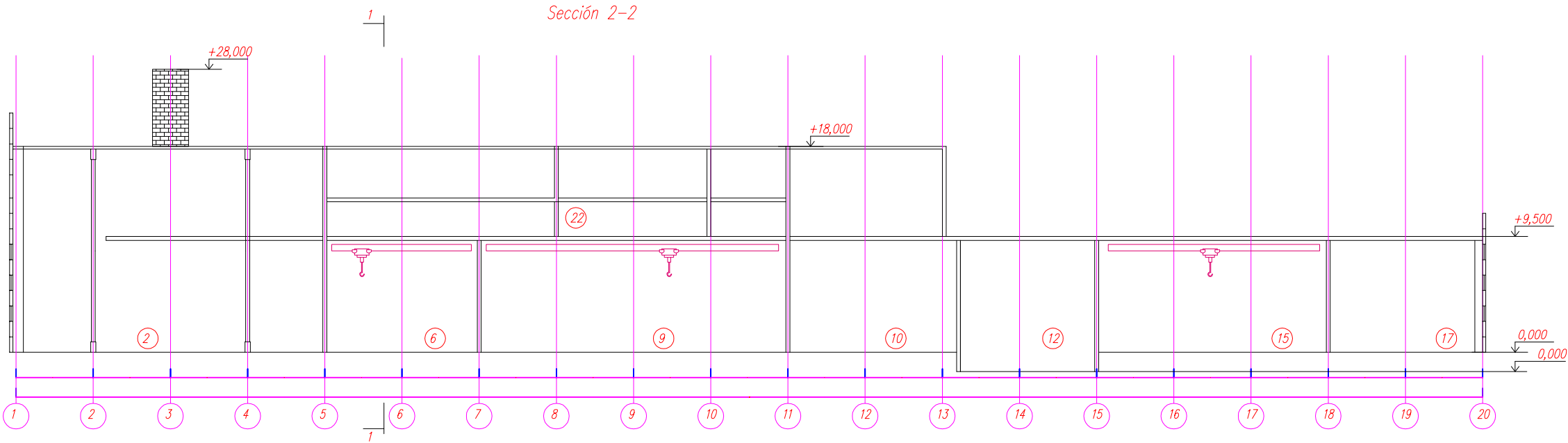
Vista en planta elev: +0.000



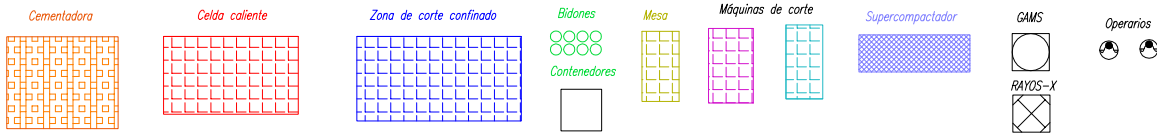
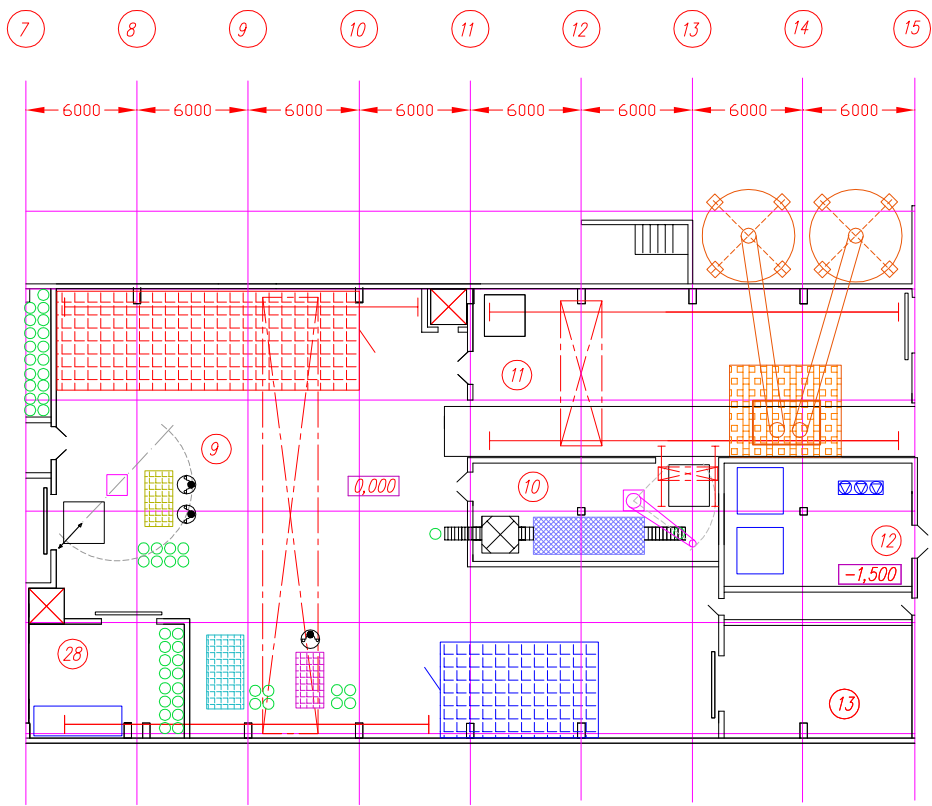
Listado de salas

Número	Nombre	Area, m ²
1	Exclusa de acceso de seguridad	71.5
2	Área de incineración	403
3	Sala del compresor	18.76
4	Sala del depósito de gasóleo	16.6
5	Pasillo de descarga	143.8
6	Buffer de residuo recibido	98
7	Acceso limpio a zona de tratamiento	28
8	Almacén de bidones limpios	91.31
9	Área de clasificación y fragmentación	611.16
10	Sala de supercompactación	70.29
11	Sala de cementación	21.53
12	Sala de tanques de drenaje	67.5
13	Sala de descontaminación	62.58
14	Sala de sistemas eléctricos	67.33
15	Área de tránsito de contenedores area	280
16	Cámara de suministro de aire de ventilación	281.3
17	Exclusa de acceso de seguridad	71.5
18	Zoña de recepción de residuo de CCNN	225
19	Sala de control	138
20	Laboratorio	309.5
21	Pasillo	32.4
22	Pasillo de transporte de residuo área de incineración	47.18
23	área para equipos de ventilación	363
24	Vestuario/ zona limpia de seguridad	84
25	Sala de suministro de agua limpia	35
26	Sala de equipos de protección contra incendios	35
27	Sala de control de radiación GAMS	33
28	Buffer de residuos incinerables	51.45
29	Exclusa de acceso de seguridad	71.5

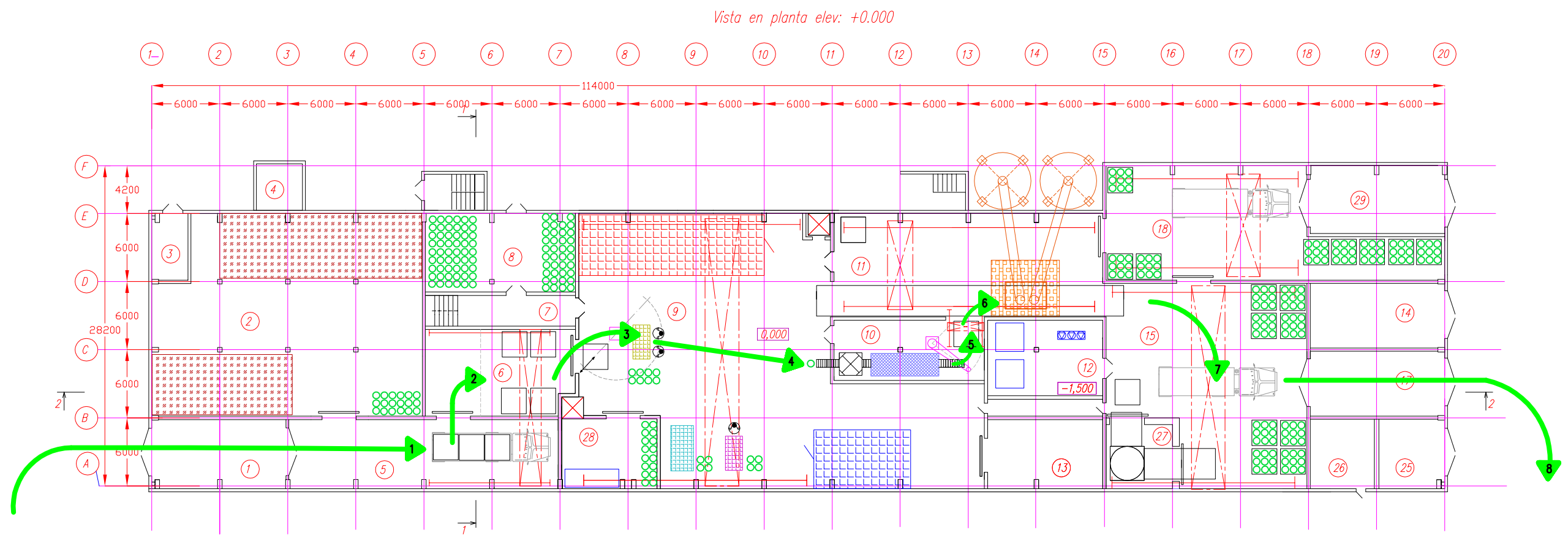
DIBUJADO POR : Francisco Herrera Garcia		PROYECTO DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS	
APROBADO POR : Javier Bárcena Risueño		TÍTULO Layout Final del Edificio Tecnológico con equipos integrados	
FECHA	15/06/2017	PLANO Nº NCR-DET-D-M-0005	
ESCALA	1:400	HOJA 5 DE 14	



Detalle de la sala de clasificación

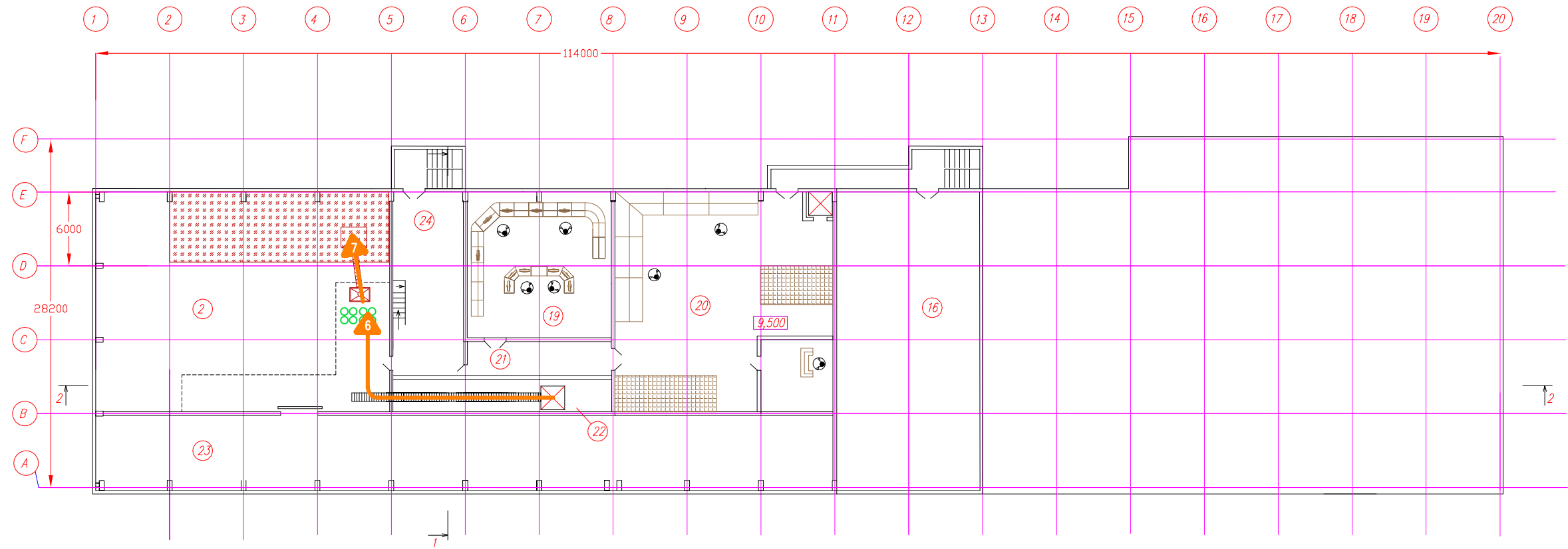


DIBUJADO POR : Francisco Herrera García		PROYECTO DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIACTIVOS	
APROBADO POR : Javier Bárcena Risueño		TÍTULO Vistas auxiliares del Layout final del Edificio Tecnológico con equipos integrados	
FECHA	15/06/2017	PLANO Nº NCR-DET-D-M-0006	
ESCALA	1:400	HOJA 6 DE 14	

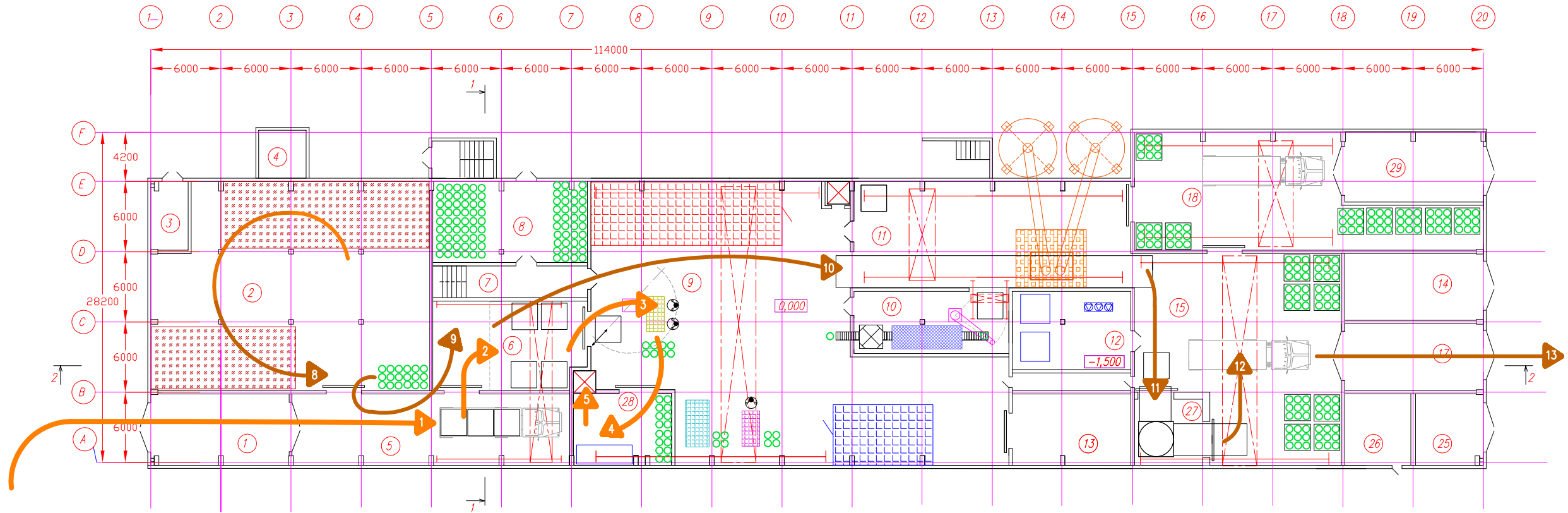


DIBUJADO POR : Francisco Herrera García		PROYECTO DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS	
APROBADO POR : Javier Bárcena Risueño		TÍTULO Flujo de residuos compactables	
FECHA	15/06/2017	PLANO Nº NCR-DET-D-M-0007	
ESCALA	1:400	HOJA 7 DE 14	

Plano en planta. elev: +9.500



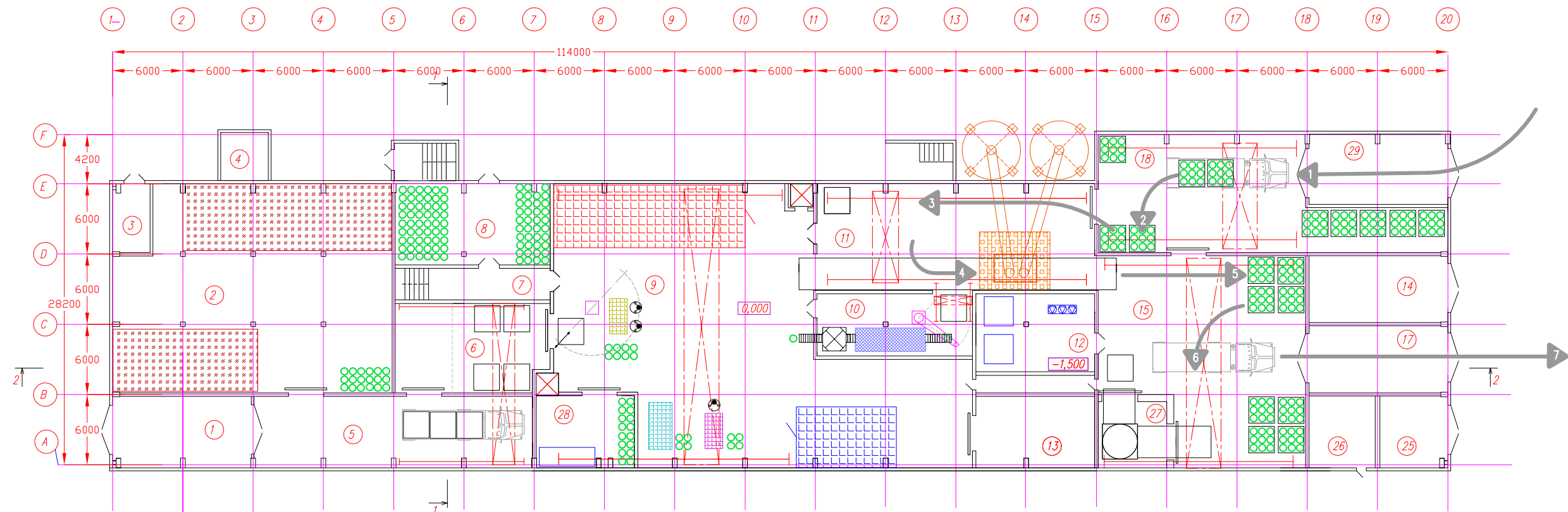
Vista en planta elev: +0.000



DIBUJADO POR : Francisco Herrera Garcia		PROYECTO DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIACTIVOS	
APROBADO POR : Javier Bárcena Risueño		TÍTULO Flujo de residuo incinerable	
FECHA	15/06/2017	PLANO Nº	NCR-DET-D-M-0008
ESCALA	1:400	HOJA 8 DE 14	

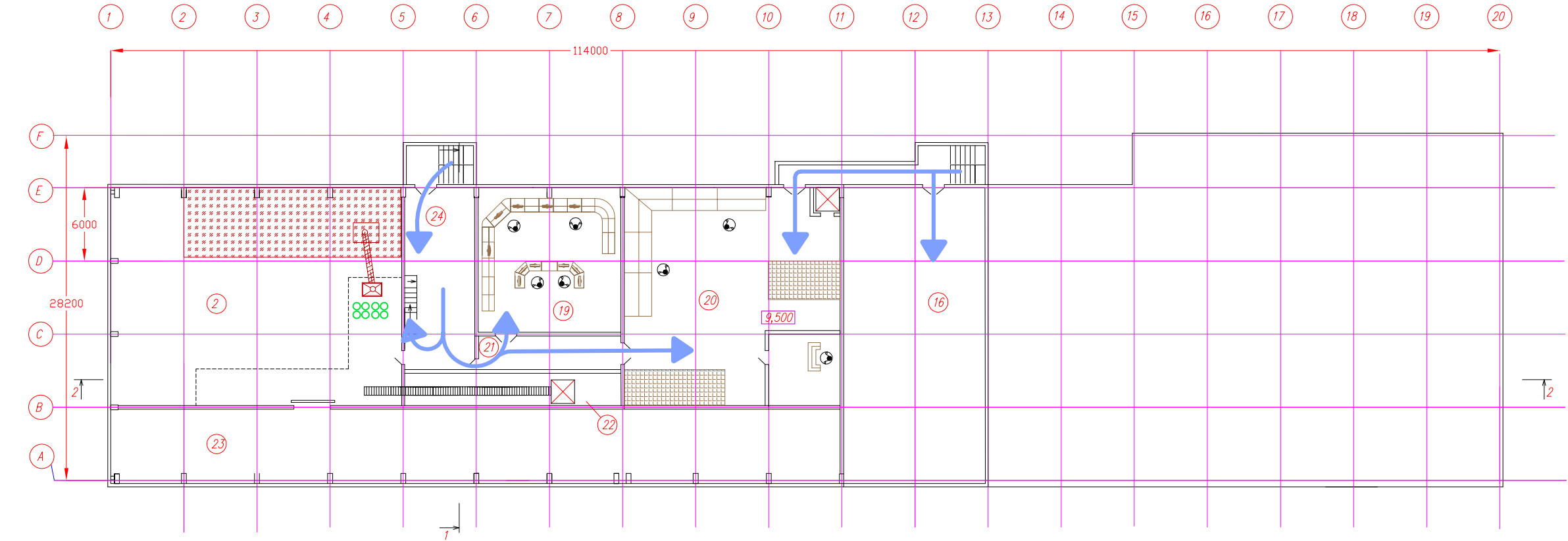
DIBUJADO POR : Francisco Herrera García		PROYECTO DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIACTIVOS
APROBADO POR : Javier Bárcena Risueño		
FECHA 15/06/2017	TÍTULO Flujo de residuo metálico y no procesable	
ESCALA 1:400	PLANO N° NCR-DET-D-M-0009	HOJA 9 DE 14

Plano en planta. elev: +9.500

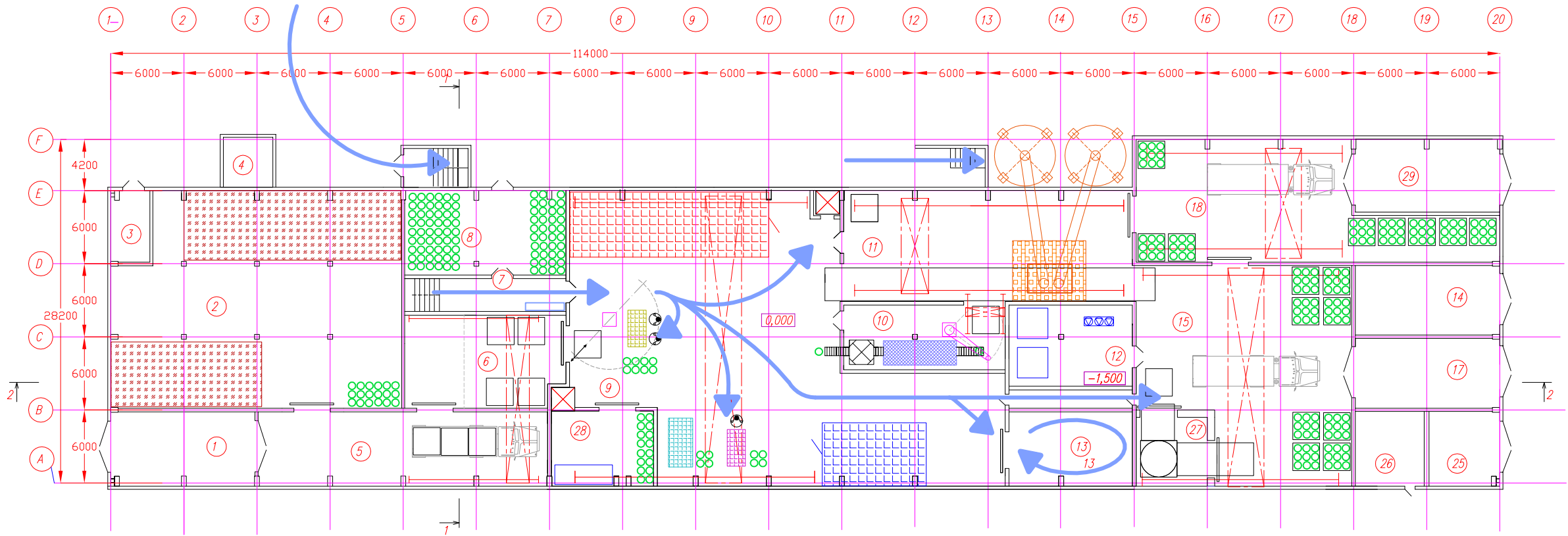


DIBUJADO POR : Francisco Herrera Garcia		PROYECTO DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIACTIVOS	
APROBADO POR : Javier Bárcena Risueño		TÍTULO Flujo de residuos procedentes de centrales nucleares	
FECHA	15/06/2017	PLANO Nº	NCR-DET-D-M-0010
ESCALA	1:400	HOJA 10 DE 14	

Plano en planta. elev: +9.500



Vista en planta elev: +0.000



DIBUJADO POR :
Francisco Herrera García
APROBADO POR :
Javier Bárcena Risueño

PROYECTO
**DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA
EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIACTIVOS**

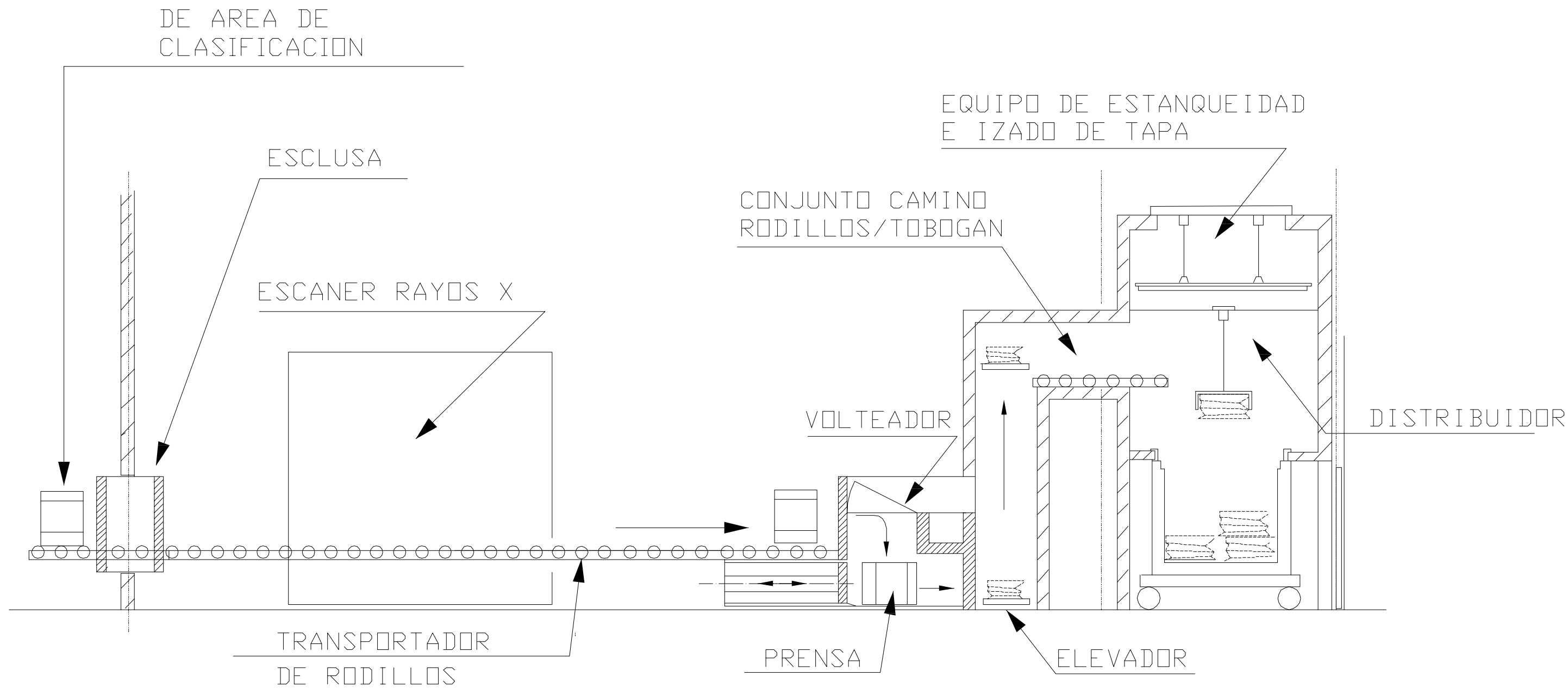
FECHA
15/06/2017

TÍTULO
Flujo de personas en el edificio tecnológico

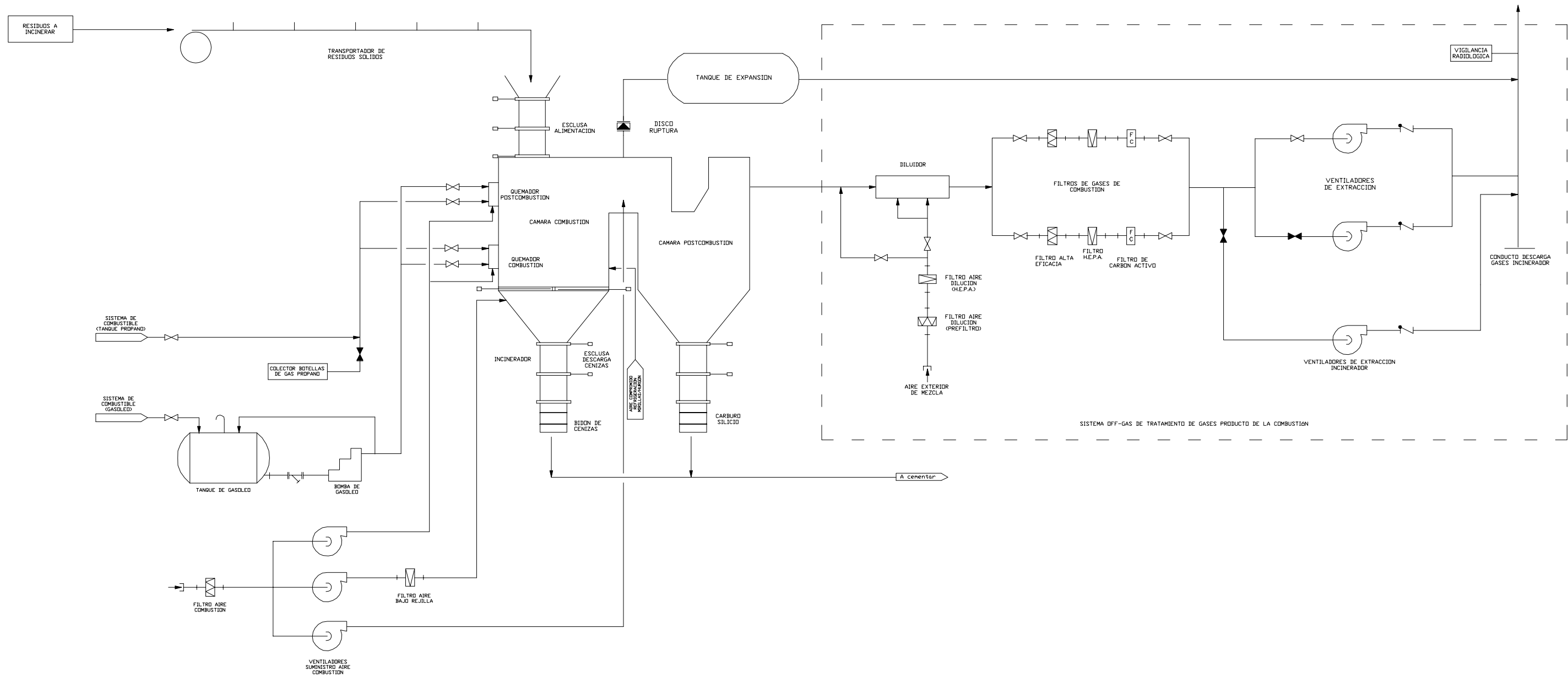
ESCALA
1:400

PLANO Nº
NCR-DET-D-M-0011

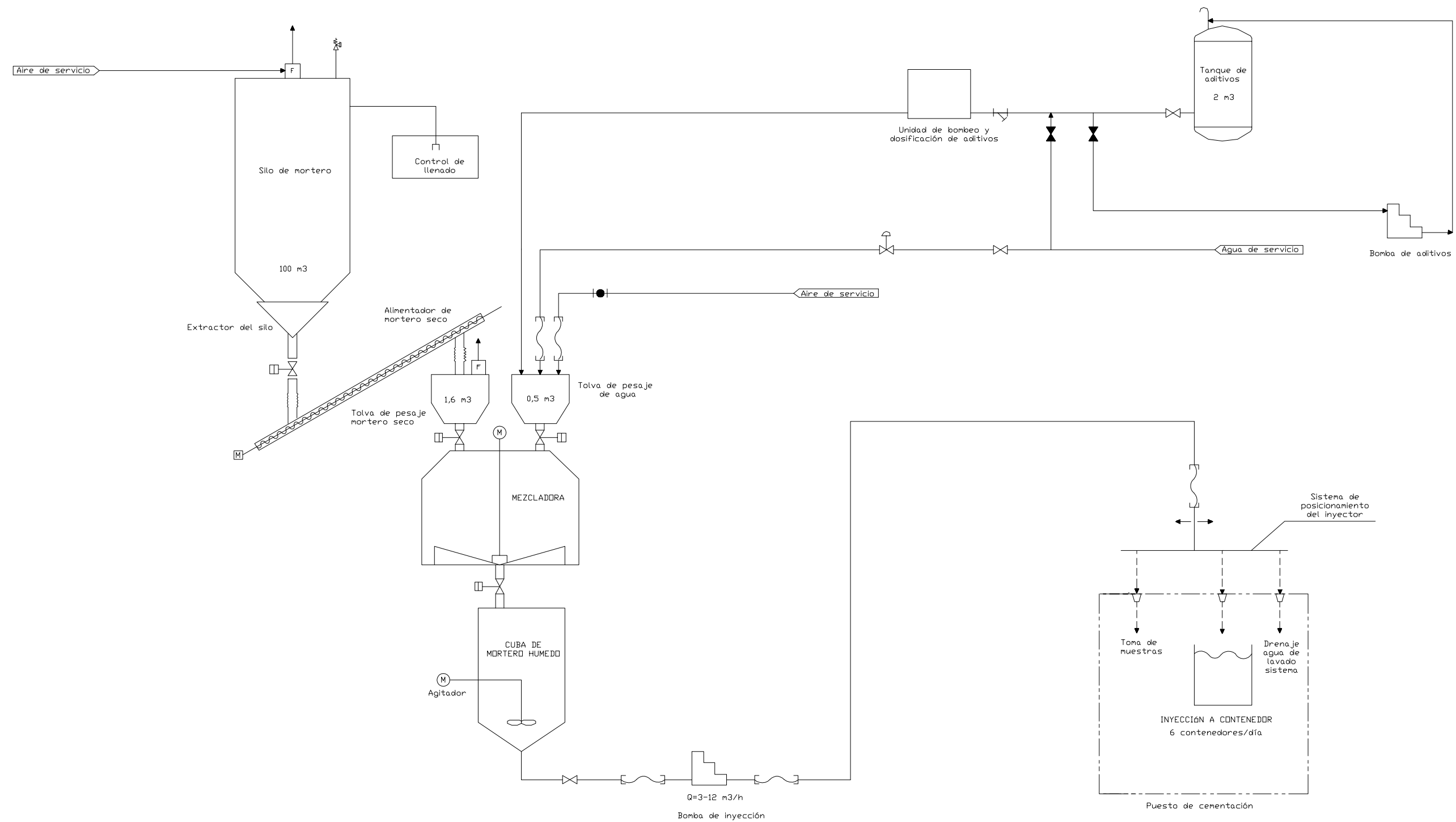
HOJA 11 DE 14



DIBUJADO POR : Francisco Herrera García		PROYECTO DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIACTIVOS	
APROBADO POR : Javier Bárcena Risueño			
FECHA	15/06/2017	TÍTULO Esquema de funcionamiento del sistema de compactación	
ESCALA	-	PLANO Nº NCR-DET-D-M-0012	HOJA 12 DE 14



DIBUJADO POR : Francisco Herrera García			PROYECTO DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIOACTIVOS	
APROBADO POR : Javier Bárcena Risueño			TÍTULO P&ID del sistema de incineración	
FECHA 15/06/2017			PLANO Nº NCR-DET-D-M-0013	
ESCALA -			HOJA 13 DE 14	



DIBUJADO POR : Francisco Herrera García		PROYECTO DISEÑO DE UN EDIFICIO TECNOLÓGICO PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIACTIVOS	
APROBADO POR : Javier Bárcena Risueño		TÍTULO P&ID del sistema de cementación	
FECHA	15/06/2017	PLANO Nº	NCR-DET-D-M-0014
ESCALA	-		HOJA 14 DE 14

Referencias bibliográficas.

- [1] «Blog de ciencia nuclear,» [En línea]. Available:
<http://www.madrimasd.org/blogs/ciencianuclear/2006/12/01/53391>.
 - [2] «Categorización de residuos radiactivos.Gobierno del Reino Unido,» [En línea]. Available:
<https://ukinventory.nda.gov.uk/about-radioactive-waste/what-is-radioactivity/what-are-the-main-waste-categories/>.
 - [3] *IAEA safety standards, Classification of radioactive waste,general safety guide No. GSG-1.*
 - [4] «Tratamiento y acondicionamiento de residuo nuclear. World-Nuclear,» [En línea]. Available:
<http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/treatment-and-conditioning-of-nuclear-wastes.aspx>.
 - [5] IAEA, «Aplicación de métodos térmicos al tratamiento de residuos radiactivos,» [En línea]. Available: http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1527_web.pdf.
 - [6] «Pirólisis de residuo peligroso y radiactivo.NUKEM.G.Kemmler y B.Ganser,» 1995. [En línea]. Available: <http://www.wmsym.org/archives/1990/V1/59.pdf>.
 - [7] M. Ojovan, *Handbook of Advanced Radioactive Waste Conditioning Technologies*, Woodhead, 2011.
 - [8] P. d. v. Hanford, «¿Qué es la vitrificación de residuos radiactivos?,» [En línea]. Available: <http://www.hanfordvitplant.com/vitrification-101>.
 - [9] Westinghouse, «Cementación de residuos radiactivos,» [En línea]. Available: <http://www.westinghousenuclear.com/Portals/0/D&D/Waste-Management/DDR-0100%20Cementation.pdf>.
 - [10] I. NEWMD, «Net Enabled Waste Managenent Batabase. Base de datos de la IAEA con informes, noticias, publicaciones e inventarios de las técnicas de tratamiento de residuos nucleares de cada pais miembro.,» [En línea]. Available: <http://newmdb.iaea.org/librarySearch.aspx>.
 - [11] ANDRA, «Centros de tratamiento de residuos radiactivos de ANDRA,» [En línea]. Available: <https://www.andra.fr/international/pages/en/menu21/international-consultancy/operational-waste-from-nuclear-facilities-1644.html>.
 - [12] S. Energy, «Centros de tratamiento de residuos Energy Solutions,» [En línea]. Available: <http://www.energysolutions.com/waste-management/facilities/>.
-

-
- [13] ENRESA, «El Cabril.Enresa.,» [En línea]. Available: <http://www.enresa.es/esp/inicio/actividades-y-proyectos/ca-el-cabril>.
- [14] N. IAEA, «Informes nacionales de inventario de residuos de los países miembros de la IAEA,» [En línea]. Available: <http://newmdb.iaea.org/reports.aspx>.
- [15] «Residuos radiactivos y combustible nuclear gastado: Reglas de seguridad. Legislación europea,» [En línea]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=uriserv:en0027>.
- [16] «Residuos Nucleares. Directivas de la Comisión Europea.,» [En línea]. Available: <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/nuclear-energy/radioactive-waste-and-spent-fuel>.
- [17] «Reglamento europeo sobre productos de la construcción. Parlamento Europeo.,» [En línea]. Available: https://www.coaat.es/upload/documentos/RE305_2011.pdf.
- [18] «Principio ALARA. Sociedad Nuclear Española.,» [En línea]. Available: <https://www.sne.es/es/recursos/diccionario-de-terminos-nucleares/alara>.
- [19] «Radiación ionizante, Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_ionizante.
-

