

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

Ingeniería básica de una piscina de combustible nuclear gastado

Autor: Sergio Cuenca García

Tutor: Pedro García Haro

Dep. Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Química

Ingeniería básica de una piscina de combustible nuclear gastado

Autor:

Sergio Cuenca García

Tutor:

Pedro García Haro

Investigador Post-Doctoral

Dep. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Grado: Ingeniería básica de una piscina de combustible nuclear gastado.

Autor: Sergio Cuenca García

Tutor: Pedro García Haro

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, los cuales me han inculcado los valores necesarios para hacer frente a esta carrera. Sin su apoyo, la realización de este proyecto jamás hubiera sido posible. Por enseñarme a sacar lo mejor de mí mismo en las situaciones más complicadas. A ellos les debo todo lo que soy a día de hoy.

A todas las personas que han hecho de estos años una etapa maravillosa. Por haber permanecido junto a mí en los momentos más difíciles.

A mi tutor, el Doctor Pedro García Haro, quien me ha dado la oportunidad de elegir un tema que me ha permitido adquirir nuevos conocimientos, aplicando todo lo aprendido durante estos años. Por enseñarme una de las cualidades más importantes de esta profesión: el saber pensar.

RESUMEN

En este proyecto se realiza un estudio de ingeniería básica de la piscina de almacenamiento de combustible nuclear gastado en una central nuclear tipo de tecnología norteamericana con un reactor de agua en ebullición. La potencia térmica de la central es de 3.237 MWt, usando dióxido de uranio enriquecido como combustible.

Para el tipo de central anterior, se lleva a cabo el diseño de la piscina de almacenamiento de combustible nuclear gastado, así como el de la línea de refrigeración del agua de la piscina. En cuanto al sistema de purificación se realiza una descripción del mismo y los cálculos principales, sin llegar al diseño mecánico de los equipos que lo componen.

Aparte del diseño de la piscina, se lleva a cabo un modelado de los fenómenos de transferencia de calor y materia que tienen lugar entre la barra de combustible y el agua de la piscina. Dicho modelo permite conocer la temperatura a la cual se encuentra la barra de combustible para diferentes valores de la temperatura del fluido.

Usando los resultados del modelado de la barra de combustible, se proponen dos situaciones de operación para el diseño del sistema de refrigeración, una primera considerada como situación de emergencia y a partir de la cual se realiza el diseño de los equipos, por ser esta la situación más desfavorable considerada, y una segunda situación considerada de operación normal.

Para el diseño de la piscina, se han seguido las indicaciones descritas en la **Norma ANSI/ANS-57.7.1988**, aplicable a la central tipo estudiada (tecnología americana).

ABSTRACT

In this project, a basic engineering study for a spent fuel pool is done using American technology with a boiling water reactor. The nuclear power plant has 3.237 MWt working with enriched uranium dioxide as fuel.

For the central described above, the design of the spent fuel pool and the cooling system where the water is driven has to be done. About the purification system, the description is given and the main calculations are done, without describing the components or the mechanical design.

In addition, the heat and mass transfer models are done, in order to analyse the phenomena between water and fuel. By this model, the temperature of the pool water could be known.

Two situations are analysed: firstly, an emergency situation from which the main design could be obtained. Secondly, the base charge situation is also studied.

All the following report is led by **ANSI/ANS-57.7.1988** applicable to the kind of power plant analysed (American Technology).

OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo que se persigue con este proyecto es realizar el diseño de la piscina de almacenamiento de combustible nuclear gastado en una central nuclear tipo de tecnología norteamericana, haciendo uso de la normativa correspondiente.

Los límites de batería incluyen la piscina y su sistema de refrigeración y purificación, siendo excluidos de los mismos el resto de sistemas que alberga el edificio de combustible (canal de transferencia de elementos combustibles procedentes del núcleo del reactor, piscina de combustible nuevo, sistema de ventilación del edificio, etc.).

Con el modelado de los fenómenos de transferencia se persigue obtener un perfil de temperatura en el interior de la barra, con el fin de controlar la temperatura a la cual se encuentra la barra de combustible para diferentes situaciones del agua de la piscina.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
OBJETIVOS Y ALCANCE	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Piscina de almacenamiento de combustible nuclear gastado.	1
1.2. Centrales nucleares en España.....	3
1.3. Ciclo del combustible nuclear.	4
1.4. Estado de las piscinas para el caso español. Posibles alternativas.	9
2. ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LAS PISCINAS DE COMBUSTIBLE.	12
2.1. Consideraciones a tener en cuenta durante el diseño de una piscina de combustible nuclear.....	12
2.2. Situaciones de riesgo a las que están sometidas las piscinas de almacenamiento de combustible.....	15
2.3. Descripción de las barras y de los elementos combustibles para los reactores utilizados en España.	18
2.4. Tipos de bastidores utilizados para el almacenamiento de elementos combustibles. ...	23
2.5. Localización de la piscina en la instalación nuclear.	25
2.6. Transporte de los elementos combustibles hasta la piscina de almacenamiento.	26
2.7. Descripción cualitativa de los fenómenos de transferencia que tienen lugar entre la barra de combustible y el agua de la piscina.	28
2.7.1. Transferencia de calor.....	28
2.7.2. Transferencia de materia.	31
3. BASES DE DISEÑO.	34
3.1. Tipo de central a usar como referencia.	34
3.2. Dimensiones de las barras y elementos combustibles.	34
3.3. Rango de temperatura del agua de la piscina.....	34
3.4. Situación límite.....	34
3.5. Potencia disipada por un elemento combustible.	34

3.6. Bases de diseño para el cálculo de las dimensiones de la piscina. Tipo de bastidores seleccionados.	35
3.7 Materiales de la piscina.....	36
3.8. Tiempo de almacenamiento de los elementos combustibles.....	36
3.9 Sistema de refrigeración	36
3.10. Sistema de purificación.	38
4. MODELADO FENÓMENOS DE TRANSFERENCIA.....	40
4.1. Modelo para transferencia de calor.....	41
4.2. Modelo para transferencia de materia.	47
5. CÁLCULOS.	54
5.1. Dimensiones de la piscina y capacidad de almacenamiento.	54
5.2 Diferentes situaciones de extracción para el sistema de refrigeración.	59
5.2.1. Situación 1.....	59
5.2.2. Situación 2.....	61
5.2.3. Cálculos en la línea hidráulica.	62
5.3. Caudal a circular por la línea de purificación.	70
5.4. Pérdidas de agua por evaporación.....	71
5.5. Caudal de refrigeración a aportar a los intercambiadores.	73
5.6. Suministro de agua.....	73
5.6.1. Suministro de agua desmineralizada a la piscina.....	73
5.6.2. Suministro de agua a intercambiadores.	74
5.4. Cálculo de los parámetros del modelo para transferencia de calor.	74
6. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LOS MODELOS DE TRANSFERENCIA	77
6.1. Transferencia de calor.....	77
6.1.1. Resultados obtenidos para el interior de la barra.....	77
6.1.2. Resultados obtenidos para el exterior de la barra (película de líquido).	79
6.1.3. Representación gráfica del modelo completo.	82
6.2. Transferencia de materia.	83
7. CONCLUSIONES.	85
BIBLIOGRAFÍA.....	87
ANEXOS	90
Anexo A: Determinación de los coeficientes de película para diferentes temperaturas de agua.....	90
Anexo B: Modelo para el interior de la barra.	91
Anexo C: Modelo para la película de líquido real.	92

Anexo D: Resultados de la simulación para transferencia de calor.....	93
Anexo D.1: Interior de la barra.....	93
Anexo D.2: Exterior de la barra.....	94
Anexo E: Hoja de especificaciones intercambiadores de calor.....	96
Anexo F: Hoja de especificaciones bombas centrífugas.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características principales de las centrales nucleares operativas en España (Fuente: Consejo de Seguridad Nuclear).....	4
Tabla 2: Grado de ocupación y fecha de saturación previstas para las centrales nucleares españolas operativas a fecha de 31/12/2015 (Fuente: Foro Nuclear [11]).....	10
Tabla 3: Características de las barras de combustible según el tipo de reactor [18] , [19]	19
Tabla 4: Capacidad del núcleo y ciclos de descarga para los reactores españoles.....	35
Tabla 5: resultados obtenidos para las dimensiones de la piscina.	56
Tabla 6: diámetros para tuberías de acero inoxidable disponibles en ASTM.	64
Tabla 7 :valores de longitudes equivalentes para diferentes accesorios y diámetros.	68
Tabla 8: resultados obtenidos de pérdida de carga para los distintos tramos de la situación 1. 68	
Tabla 9: resultados obtenidos para la situación 2.	69
Tabla 10: resultados obtenidos de pérdida de carga para los distintos tramos de la situación 2.	70
Tabla 11: valores de coeficientes de película obtenidos para diferentes temperaturas del fluido.	76
Tabla 12: resultados obtenidos para $h=650,4 \text{ Wm}^2\text{K}$ y $T_\infty = 16 \text{ (}^\circ\text{C)}$	77
Tabla 13: resultados obtenidos para $h=759,34 \text{ Wm}^2\text{K}$ y $T_\infty = 45 \text{ (}^\circ\text{C)}$	78
Tabla 14: resultados obtenidos para $h=871,7 \text{ Wm}^2\text{K}$ y $T_\infty = 90 \text{ (}^\circ\text{C)}$	78
Tabla 15: resultados obtenidos para $h=650,4 \text{ Wm}^2\text{K}$ y $T_\infty = 16 \text{ (}^\circ\text{C)}$	80
Tabla 16: resultados obtenidos para $h=759,34 \text{ Wm}^2\text{K}$ y $T_\infty = 45 \text{ (}^\circ\text{C)}$	80
Tabla 17: resultados obtenidos $h=871,7 \text{ Wm}^2\text{K}$ y $T_\infty = 90 \text{ (}^\circ\text{C)}$	80
Tabla 18: resultados obtenidos para $h=687,8 \text{ Wm}^2\text{K}$ y $T_\infty = 25 \text{ (}^\circ\text{C)}$	93
Tabla 19: resultados obtenidos para $h=725,5 \text{ Wm}^2\text{K}$ y $T_\infty = 35 \text{ (}^\circ\text{C)}$	93
Tabla 20: resultados obtenidos para $h=803,6 \text{ Wm}^2\text{K}$ y $T_\infty = 60 \text{ (}^\circ\text{C)}$	94
Tabla 21: resultados obtenidos para $h=687,8 \text{ Wm}^2\text{K}$ y $T_\infty = 25 \text{ (}^\circ\text{C)}$	94
Tabla 22: resultados obtenidos para $h=725,5 \text{ Wm}^2\text{K}$ y $T_\infty = 35 \text{ (}^\circ\text{C)}$	95
Tabla 23: resultados obtenidos para $h=803,6 \text{ Wm}^2\text{K}$ y $T_\infty = 60 \text{ (}^\circ\text{C)}$	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Piscina de almacenamiento de combustible nuclear gastado (Fuente: ENRESA).....	1
Figura 2:Conjunto de combustible siendo extraído de un bastidor de la piscina de almacenamiento del reactor 4 de la central de Fukushima I (Fuente: The Japan Times News)...	2
Figura 3: Centrales nucleares operativas en España.....	3
Figura 4:Conversión del uranio concentrado a UF6 (Wet route) [5].	6
Figura 5: Características del combustible utilizado en distintos tipos de reactores [7].	7
Figura 6: Ciclo del combustible nuclear (adaptación IAEA).....	9
Figura 7: bastidor normal de almacenamiento 6x6 (izq) y bastidor de almacenamiento compacto 8x8 (derch) [7]	10
Figura 8: Pastillas de combustible [17]	18
Figura 9:Distintas partes de la barra de combustible (FUENTE: www.nuclear-power.net).....	19
Figura 10: Barras de combustible nuclear [17]	19
Figura 11: Procedimiento de fabricación de un elemento de combustible nuclear.....	20
Figura 12: Elemento combustible para un reactor tipo BWR diseñado por General Electric [19]	21
Figura 13:Elemento combustible para reactor tipo PWR diseñado por Westinghouse [18]	22
Figura 14:Bastidores de almacenamiento de elementos combustibles para PWR y BWR [20] .	23
Figura 15:Sección transversal de los bastidores considerados [20]	24
Figura 16:Sección esquemática del edificio de contención de un reactor de tecnología norteamericana [12]	25
Figura 17: del reactor-canal de transferencia-edificio de almacenamiento de combustible [22]	26
Figura 18: Sistema de transferencia de combustible [22]	27
Figura 19: Carro que desplaza los elementos combustibles sobre raíles a través del tubo de transferencia [18]	28
Figura 20:Circulación del fluido por convección natural a través de los bastidores [26].	30
Figura 21: Perfil de temperaturas desde el interior de la barra hasta el agua [26]	31
Figura 22: Sección de la barra de combustible y del revestimiento dañado [28]	32
Figura 23: Tipo de bastidor seleccionado [20]	36
Figura 25: localización de las extracciones en la piscina.....	37
Figura 24: diagrama de flujo del sistema de refrigeración.	37
Figura 26: diagrama de flujo para los sistemas de refrigeración y purificación.	39
Figura 27:Gradiente de temperatura a lo largo de la barra y de la película δ	40
Figura 28:Volumen de control diferencial para el análisis de conducción en coordenadas cilíndricas.....	41
Figura 29:Balance de energía aplicado a un volumen de control.....	42
Figura 30:Avance del flujo de calor por conducción a través de diferentes puntos en el interior de la barra.	44
Figura 31:Conservación de especies en un volumen de control.....	47
Figura 32:Difusividades para diferentes especies [34]	48
Figura 33:gradiente de concentración a medida que avanza el tiempo.....	49
Figura 34: Proceso de sustitución de bastidores con el tiempo.	57
Figura 35: Dimensiones de la piscina y grado de ocupación de la misma.	59

Figura 36:Localización de las extracciones para la situación 2.	61
Figura 37:Tramos seleccionados para el cálculo de las pérdidas en la línea.	63
Figura 38: velocidades típicas de líquidos en tuberías de acero [34]	65
Figura 39:coeficiente $4f$ en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa del tubo [34]	65
Figura 40:valores del coeficiente de rugosidad relativa para diferentes diámetros y materiales [36]	66
Figura 41: nomograma utilizado para el cálculo de las pérdidas de longitudes equivalentes [34]	67
Figura 42: transferencia convectiva de materia entre una superficie y un fluido en reposo.	71
Figura 43: resultados de la simulación obtenida para transferencia de calor en el interior de la barra.	79
Figura 44:resultados de la simulación obtenida para transferencia de calor en el exterior de la barra.	81
Figura 45: representación del modelo completo de transferencia de calor para dos situaciones diferentes.	82
Figura 46: perfil de concentración en la barra y en el líquido para los resultados obtenidos....	84

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Piscina de almacenamiento de combustible nuclear gastado.

En primer lugar, es importante definir qué es una piscina de almacenamiento de combustible nuclear gastado. Según la **Norma UNE 73-501-92 [1]**, una piscina es una masa de agua a presión atmosférica que puede contener elementos combustibles, elementos de control, contenedores, etc. El agua actúa como refrigerante y blindaje por lo que el diseño de la piscina debe impedir la pérdida de agua por fugas y permitir la refrigeración de la misma para evitar su ebullición.



Figura 1: Piscina de almacenamiento de combustible nuclear gastado (Fuente: ENRESA).

Tras la descarga del núcleo del reactor, los elementos combustibles son clasificados como residuos de alta actividad. El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), en la **Instrucción IS-29** sobre criterios de seguridad en instalaciones de almacenamiento temporal de combustible nuclear y residuos de alta actividad **[2]** define los RAA como aquellos residuos que contienen concentraciones apreciables de radionucleidos emisores alfa de vida larga y/o emisores beta-gamma con períodos de semidesintegración superiores a 30 años, que pueden generar calor por efecto de la desintegración radiactiva, dada su elevada actividad específica.

Dichos residuos no son susceptibles de ser almacenados de forma definitiva en almacenamientos geológicos profundos ni almacenamientos temporales individualizados (estas instalaciones son descritas posteriormente), de modo que han de ser almacenados temporalmente en las piscinas de combustible nuclear gastado durante al menos 5 años **[3]** hasta que haya tenido lugar un decaimiento térmico y radiactivo adecuado.

Con esto se pretende que el elemento combustible pierda parte de su radiactividad (reducción de su inventario radiotóxico) y capacidad para generar calor residual, con el fin de poder ser manipulado para su almacenamiento de forma definitiva o posterior reciclado.

Los elementos combustibles se alojan en bastidores en forma de malla, situados en el fondo de la piscina (ver figura 2). Según la **Norma UNE 73-501-92 [1]** los bastidores son estructuras que soportan un conjunto de celdas para el almacenamiento de elementos combustibles. Estos bastidores tienen unos 4 metros de altura y son instalados cerca del fondo de la piscina, habiendo unos 8 metros de agua sobre dichos elementos de almacenamiento. Es de vital importancia mantener la transparencia del agua, con el fin de hacer posible el correcto manejo de los conjuntos almacenados por parte de los trabajadores.

Como se verá más adelante, las piscinas de combustible nuclear gastado tienen una función imprescindible en lo que a tratamiento de combustible gastado se refiere, pues a ellas se les asigna la tarea de conseguir que se produzca el decaimiento radiactivo del combustible nuclear gastado descargado del reactor, para su posterior tratamiento, según proceda, como residuo de menor actividad.

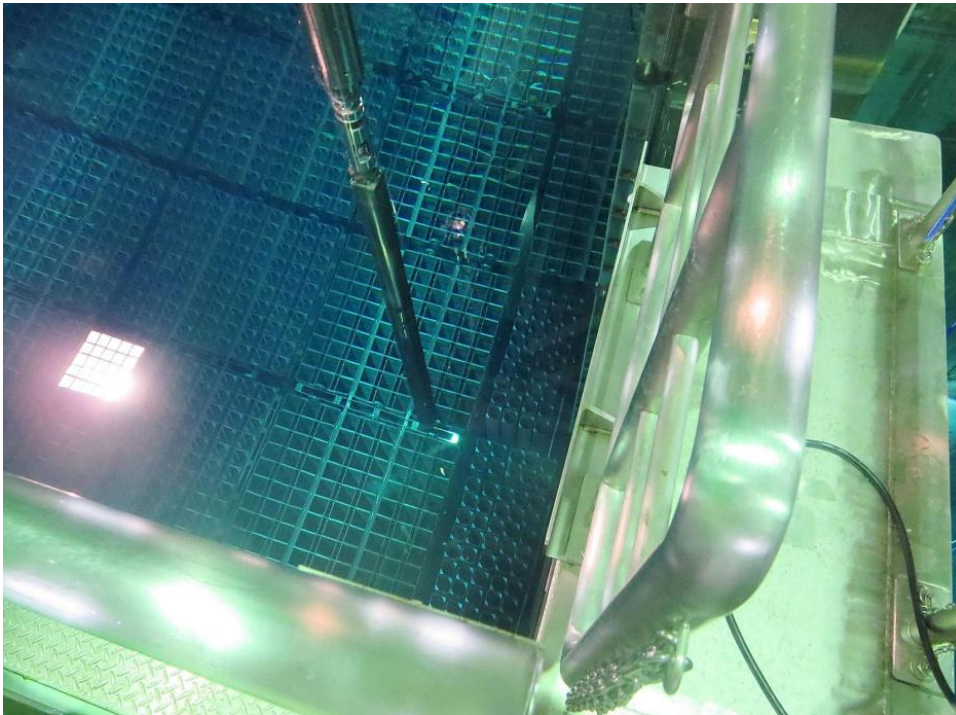


Figura 2: Conjunto de combustible siendo extraído de un bastidor de la piscina de almacenamiento del reactor 4 de la central de Fukushima I (Fuente: The Japan Times News).

	Almaraz I	Almaraz II	Ascó I	Ascó II	Cofrentes	Trillo	Vandellós II
Tipo	PWR	PWR	PWR	PWR	BWR	PWR	PWR
Pot.Térmica (MWt)	2.947	2.947	2.941	2.941	3.237	3.010	2.941
Pot.Eléctrica (Mwe)	1.049	1.044	1.032,50	1.027,20	1.092	1.066	1.087
Suministrador	Westinghouse	Westinghouse	Westinghouse	Westinghouse	General Electric	Siemens-KWU	Westinghouse
Combustible	Dióxido Uranio enriquecido (UO ₂)	Dióxido Uranio enriquecido (UO ₂)	Dióxido Uranio enriquecido (UO ₂)	Dióxido Uranio enriquecido (UO ₂)	Dióxido Uranio enriquecido (UO ₂)	Dióxido Uranio enriquecido (UO ₂)	Dióxido Uranio enriquecido (UO ₂)
Autorización explotación en vigor	07/06/2010	07/06/2010	28/07/2011	28/07/2011	10/03/2011	16/11/2014	26/07/2010
Autorización explotación válida hasta	08/06/2020	08/06/2020	28/07/2021	28/07/2021	20/03/2021	15/11/2024	26/07/2020

Tabla 1: Características principales de las centrales nucleares operativas en España (Fuente: Consejo de Seguridad Nuclear).

1.3. Ciclo del combustible nuclear.

Para poder situar la piscina dentro del proceso de gestión, es necesario conocer el ciclo completo del combustible nuclear. El ciclo del combustible nuclear comprende todas las etapas por las que debe pasar este tipo de combustible para ser usado en reactores nucleares. Se incluyen, además, aquellas etapas destinadas a la gestión del combustible una vez este es descargado del núcleo del reactor. Dichas etapas se describen a continuación.

El ciclo del combustible nuclear puede dividirse en dos etapas principales [5]:

Una primera etapa (*front-end*) que engloba todas las etapas previas a la irradiación del combustible nuclear y una segunda etapa (*back-end*) que comienza con la descarga del combustible nuclear gastado del reactor. Antes de comenzar con la descripción de dichas etapas cabe destacar que en la segunda etapa existen dos opciones de gestión del combustible nuclear gastado. Estas opciones son:

El **ciclo abierto** (*once-through*), donde los combustibles irradiados son considerados como residuos radiactivos de alta actividad (RAA), y por tanto deben ser almacenados de forma definitiva en formaciones geológicas profundas tras el almacenamiento temporal previo que garantice su decaimiento radiactivo y térmico.

El **ciclo cerrado**, donde los combustibles irradiados son tratados para recuperar el uranio y el plutonio presentes, separándolos de los productos de fisión y actínidos minoritarios, con el fin de ser utilizados de nuevo como combustible nuclear en las centrales. Este nuevo combustible está formado por óxidos de uranio y plutonio y recibe el nombre de MOX. Los productos de fisión y actínidos minoritarios son almacenados de forma temporal para lograr su decaimiento radiactivo, para ser almacenados finalmente en formaciones geológicas profundas.

La elección del ciclo depende del tipo de política de cada país [6]. Los países que han optado por la elección del ciclo cerrado son: Francia, Japón, Rusia, Reino Unido, Bélgica, China, India y

Holanda. En el caso de España no se ha tomado ninguna decisión definitiva en cuanto al ciclo a seguir. Si bien, actualmente, los residuos son almacenados de forma temporal en las piscinas de las centrales y de forma definitiva en un almacenamiento geológico profundo.

Dicho esto, se procede a describir las etapas implicadas en el ciclo del combustible nuclear.

Primera etapa

Los procesos que intervienen en esta primera etapa son descritos a continuación:

Búsqueda del mineral

Se incluyen las actividades relacionadas con la búsqueda del uranio en forma de mineral (U_3O_8), que pueda ser utilizado para la producción de uranio a utilizar en el reactor.

Los yacimientos de uranio [7] se encuentran repartidos en zonas muy localizadas del planeta. Entre todos los yacimientos disponibles destacan, debido a su gran volumen disponible en reservas de mineral, los del continente africano (Sudáfrica, Namibia, Gabón y Níger). En el continente europeo, los de mayor volumen son los yacimientos de Francia, seguidos de los de España. En el continente americano destacan Canadá y Estados Unidos, junto con Brasil y Argentina. Por último, en la zona del pacífico destaca Australia

Minería

Quedan incluidas las actividades necesarias para la extracción del mineral de uranio del suelo.

Cabe destacar que para decidir la explotación de un yacimiento es de vital importancia tener en cuenta la riqueza en uranio del mineral, o ley del mineral [7]. El mineral más rico en uranio es la Pechblenda.

Existen tres alternativas en el proceso de minería del uranio [8] : minas a cielo abierto, minas subterráneas y lixiviación in situ del mineral.

Tratamiento del mineral

Se incluyen las actividades de molienda y concentración del mineral con el fin de producir Uranio concentrado. Con el proceso de concentrado se pretende aumentar la cantidad de uranio presente en el mineral a valores en torno al 70%. El uranio, de número atómico 92, tiene tres isótopos naturales a saber: ^{238}U (99,3%), ^{235}U (0,7 %) y trazas de ^{234}U [5]. Señalar que los porcentajes indicados son másicos.

La molienda se lleva a cabo, generalmente, cerca de la mina. Tienen lugar las operaciones de trituración y tratado químico del mineral extraído con el objetivo de separar el uranio

Conversión

Como se ha mencionado previamente, el porcentaje de ^{235}U en el uranio natural es muy bajo. Se pretende aumentar el porcentaje de ^{235}U , dado que el proceso de fisión mediante el cual se libera energía requiere un porcentaje superior de este isótopo. Dicho incremento se consigue mediante el proceso de enriquecimiento, el cual requiere hexafluoruro de uranio

(UF_6). La conversión de UF_6 se lleva a cabo mediante un proceso de dos etapas; una primera etapa en la que se obtiene tetrafluoruro de uranio (UF_4) y una segunda etapa en la que este se convierte en hexafluoruro de uranio (UF_6). Dicho proceso queda reflejado en la siguiente figura 4 [5].

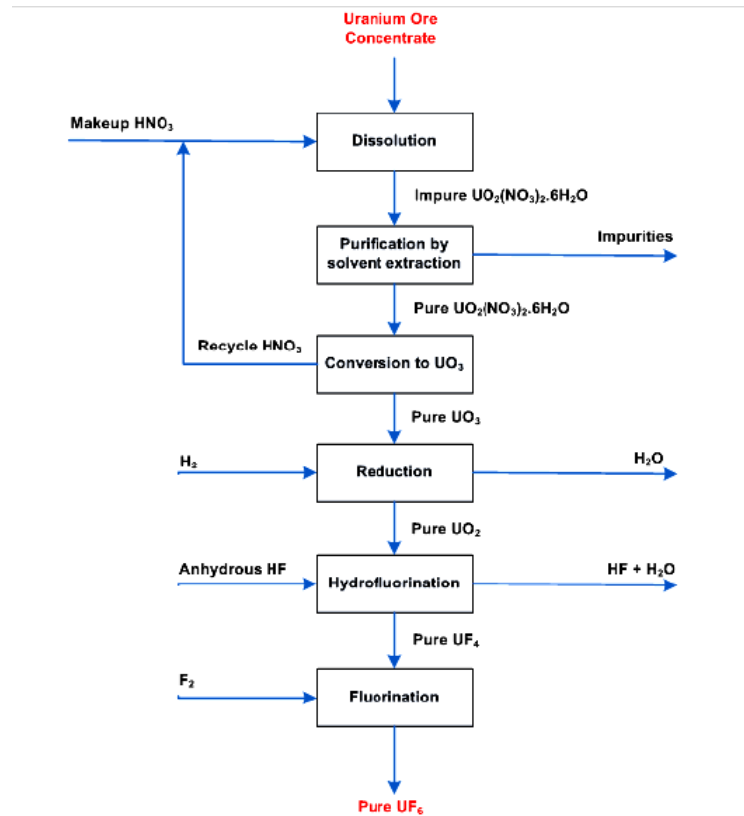


Figura 4: Conversión del uranio concentrado a UF_6 (Wet route) [5].

Enriquecimiento

Vuelve a hacerse hincapié en la importancia del aumento en la concentración del isótopo de ^{235}U , pues es el único isótopo del uranio natural que puede ser utilizado como combustible nuclear en reactores térmicos. La concentración de ^{235}U requerida depende del tipo de reactor utilizado.

En la siguiente figura se muestra el tipo de combustible utilizado, así como el tipo de material de la barra de combustible (revestimiento) y material fisionable utilizado. Todas estas características son función del tipo de reactor.

Tipo de reactor	Tipo de combustible	Material fisionable y fértil	Material de la vaina del combustible	Moderador	Refrigerante
Refrigerado por gas	Uranio metálico o aleación con Mg.	Uranio natural	Aleación de magnesio	Grafito	Anhídrido carbónico (CO ₂)
Agua pesada	Óxido de uranio (UO ₂)	Uranio natural	Zircaloy	Agua pesada (D ₂ O)	Agua pesada (D ₂ O)
Agua a presión	Óxido de uranio (UO ₂)	Uranio enriquecido (3,3%)	Zircaloy	Agua ligera (H ₂ O)	Agua ligera (H ₂ O)
Agua en ebullición	Óxido de uranio (UO ₂)	Uranio enriquecido (2,6%)	Zircaloy	Agua ligera (H ₂ O)	Agua ligera (H ₂ O)
Generador rápido	Óxidos mixtos de uranio (80%) y plutonio (20%)	Uranio empobrecido (U-238) y plutonio	Acero inoxidable	Ninguno	Sodio fundido

Figura 5: Características del combustible utilizado en distintos tipos de reactores [7].

Teniendo en cuenta el tipo de reactores utilizados en España, para el caso español se necesita aumentar la concentración del isótopo ^{235}U a unos valores comprendidos entre el 2,6% y 3,3% dependiendo de la central (valores orientativos), de modo que la etapa de enriquecimiento resulta necesaria.

Fabricación de elementos combustibles

Se trata del último paso de esta primera etapa. Como se ha mencionado anteriormente, dependiendo del tipo de reactor se requiere un tipo específico de combustible (ver figura 3).

En España, la Empresa Nacional del Uranio S.A. (ENUSA) es la encargada de proporcionar productos y servicios relacionados con la primera parte (front-end) del ciclo del combustible nuclear [5].

Para el caso de los reactores de agua a presión (PWR) y agua en ebullición (BWR) el proceso de fabricación consta de tres fases [7] : un proceso físico de transformación de UF₆ a UO₂ en polvo; un proceso cerámico en el que el UO₂ se transforma en pastillas cerámicas de alta densidad; por último, un proceso mecánico que incluye la carga de las pastillas en tubos de un determinado material (dependiendo del tipo de reactor) y fabricación de elementos necesarios para dar lugar al elemento combustible final que será introducido en el reactor.

Las dimensiones de las pastillas son tratadas con detalle posteriormente.

Segunda etapa

Esta segunda etapa se centra en el tratamiento del combustible una vez este es descargado del reactor. Se adelanta que es en esta etapa del ciclo en la que las piscinas de combustible nuclear gastado juegan un papel imprescindible, tras la descarga de los elementos combustibles del núcleo del reactor, existiendo alternativas de almacenamiento temporal

diferentes al almacenamiento en húmedo una vez se ha producido el decaimiento térmico y radiactivo necesario.

Los procesos que intervienen en esta segunda etapa (*back-end*) son los siguientes [5]:

Almacenamiento temporal del combustible nuclear gastado

Se distinguen dos etapas dentro del almacenamiento temporal del combustible.

En una primera etapa, el combustible nuclear gastado descargado del núcleo del reactor es almacenado en las piscinas nucleares situadas en las instalaciones del propio reactor o en edificios adjuntos a este. El tiempo de residencia en dichas piscinas será el necesario para que la actividad de los residuos radiactivos sea lo suficientemente baja, así como la temperatura de los mismos, para ser trasladados a otro almacenamiento. Las piscinas pueden estar localizadas dentro del edificio que contiene el reactor o en un edificio independiente conectado al mismo .

En una segunda etapa, cuando las condiciones del combustible son las adecuadas, se dispone al almacenamiento de los elementos combustibles en un almacén temporal individualizado (ATI). Este almacenamiento puede llevarse a cabo en piscinas (almacenamiento en húmedo) o en contenedores metálicos (almacenamiento en seco). Señalar que estas instalaciones no tienen por qué pertenecer al reactor como en el caso anterior. Dicha etapa tendría lugar en el caso de que el ciclo de gestión sea el abierto, descrito al principio de este punto.

Reproceso y reciclado del combustible nuclear gastado

Dicho proceso tiene lugar en el caso del ciclo cerrado. Al ser descargado del núcleo del reactor, el combustible gastado tiene una composición de 96% de uranio, 1% de plutonio y un 3% de actínidos minoritarios y productos de fisión (porcentajes másicos) [8]. Al principio de este punto se ha descrito brevemente en el fundamento de la opción del ciclo cerrado, que engloba el reprocesado y reciclado del combustible nuclear gastado.

Existen dos procesos para la separación de elementos combustibles presentes en combustibles nucleares irradiados. Estos procesos son los procesos de separación hidrometalúrgicos (entre los que destaca el proceso PUREX por ser el más utilizado) y los procesos pirometalúrgicos [9].

Almacenamiento definitivo

Consiste en el aislamiento definitivo de los residuos, tras el período de almacenamiento temporal que garantice su decaimiento radiactivo, en formaciones geológicas profundas, con el fin de aislarlos del medio el tiempo necesario hasta que el nivel de actividad de los mismos sea admisible para el medio. En España se dispone de un almacenamiento de residuos sólidos (el Cabril), situado en Sierra Albarrana (Córdoba). Dicha instalación está capacitada para el almacenamiento de residuos de baja y media actividad, no resultando apto para el almacenamiento de residuos de alta actividad que han de ser almacenados previamente tal y como se ha descrito previamente [10].

Anteriormente, se ha mencionado que las piscinas de almacenamiento de combustible nuclear gastado son imprescindibles para el almacenamiento de combustible nuclear gastado tras su descarga del reactor, cuando este se trata de un residuo de alta actividad. Con el fin de

corroborar dicha afirmación, se hace mención a la **Instrucción IS-29** sobre criterios de seguridad en instalaciones de almacenamiento temporal de combustible nuclear y residuos de alta actividad [2], que en el segundo punto, apartado tercero, señala que las piscinas de almacenamiento de las centrales nucleares "*se tratan de un sistema propio y necesario para la operación de las mismas*".

Si bien, las piscinas de almacenamiento pueden estar complementadas con otros sistemas de almacenamiento temporal, como el almacenamiento en seco

A modo de resumen, se incluye la figura 6, que describe el ciclo del combustible nuclear.

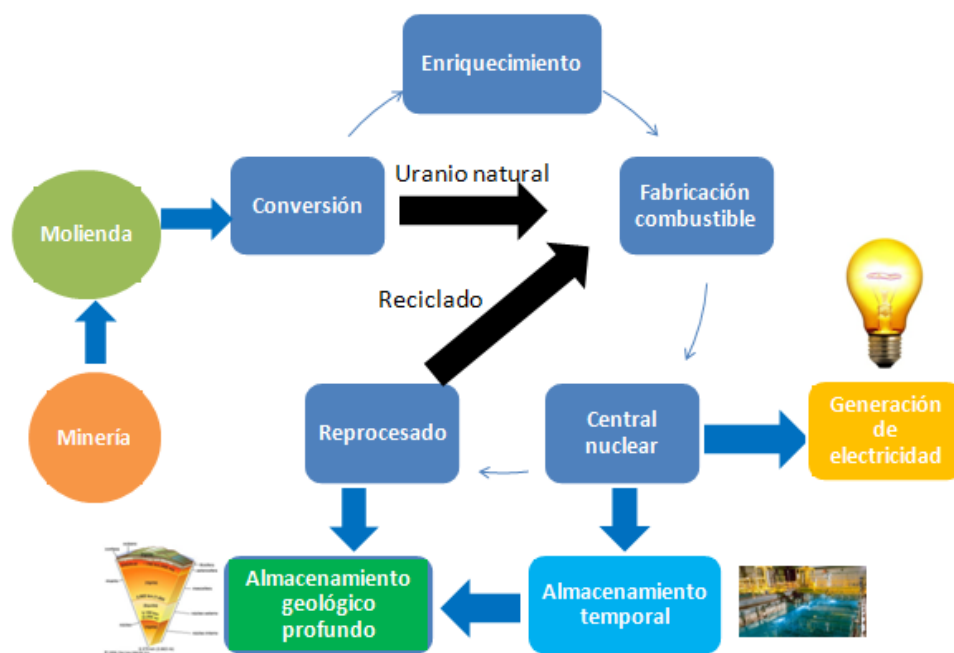


Figura 6: Ciclo del combustible nuclear (adaptación IAEA).

1.4. Estado de las piscinas para el caso español. Posibles alternativas.

El principal problema al que se enfrentan las piscinas de combustible nuclear gastado es a la saturación de las mismas, en lo que a capacidad de almacenamiento se refiere.

Una solución provisional a este problema sería la sustitución de los bastidores por otros que incrementasen la capacidad de las piscinas de combustible, disminuyendo la distancia entre los bastidores que contienen los elementos combustibles. Dicha técnica recibe el nombre de "reracking". La figura 6 [5] permite visualizar lo descrito.

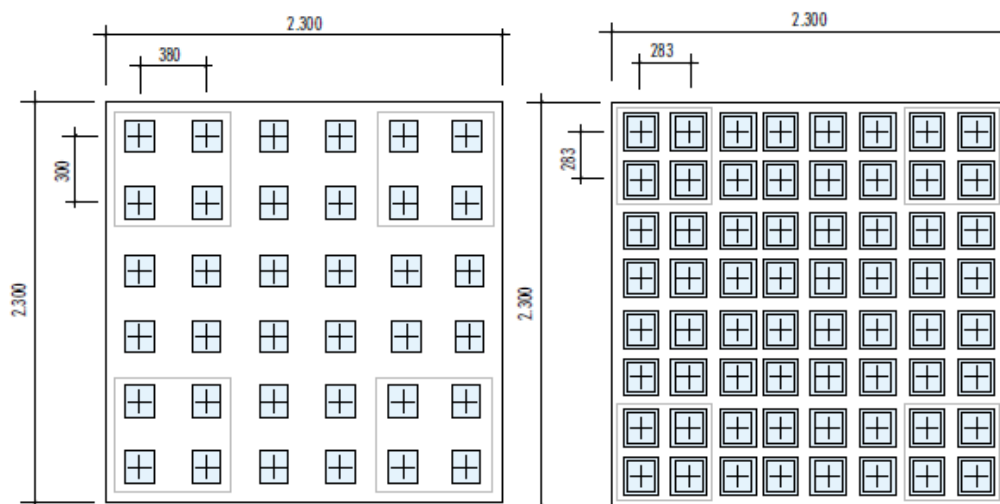


Figura 7: bastidor normal de almacenamiento 6x6 (izq) y bastidor de almacenamiento compacto 8x8 (derch) [7].

En España, inicialmente se optó por reprocesar el combustible gastado de las centrales de Vandellós I, José Cabrera y Santa María de Garoña. Dicha práctica fue interrumpida en 1982, salvo para Vandellós I, que dejó de operar en 1989 y cuyo combustible hubo que reprocesar en su totalidad por razones técnicas [11].

Salvo las excepciones comentadas, todo el combustible nuclear gastado que se ha generado en las centrales nucleares españolas se ha ido almacenando en las piscinas de almacenamiento instaladas en las propias centrales. Esto tiene como consecuencia el agotamiento de la capacidad de almacenamiento de las mismas con el tiempo. En la tabla 2 se refleja el grado de ocupación de las piscinas de las centrales nucleares españolas a fecha de 31/12/2015, así como la fecha de saturación de las mismas [11].

	Toneladas Uranio	Grado ocupación (%)	Fecha saturación
Almaraz I	1.392	84,52	2020
Almaraz II	1.380	83,79	2022
Ascó I	1.228	97,15	2016
Ascó II	1.200	94,94	2014
Vandellós II	1.148	79,89	2021
Cofrentes	4.232	88,54	-
Trillo	506	80,57	-

Tabla 2: Grado de ocupación y fecha de saturación previstas para las centrales nucleares españolas operativas a fecha de 31/12/2015 (Fuente: Foro Nuclear [11]).

La C.N. de Trillo cuenta desde 2002 con un Almacén Temporal Individualizado (ATI) [11] en seco en el que, durante 2015 se ha realizado la carga de un contenedor ENSA-DPT fabricado por la empresa Equipos Nucleares, con un total de 42 elementos combustibles gastados, con lo que a 31 de Diciembre de 2015 se encuentran en el ATI 30 contenedores con un total de 630 elementos combustibles.

La central nuclear de Ascó cuenta, desde abril de 2013, con un Almacén Temporal Individualizado construido por ENRESA [11] para sus dos unidades, en el que, durante el año

2015, se cargaron dos contenedores HI-STORM con 64 elementos combustibles irradiados procedentes de la piscina de la unidad I y otros dos contenedores HI-STORM con 64 elementos combustibles irradiados procedentes de la piscina de la unidad II, con lo que a 31 de diciembre de 2015 se encontraban en el mismo cuatro contenedores con 128 elementos combustibles de la unidad I y cinco contenedores con 160 elementos combustibles de la unidad II, almacenados en las respectivas losas correspondientes a cada unidad.

Cuando la técnica del "*reracking*" no es suficiente, se tiene que optar por la instalación de un almacén temporal individualizado (ATI), como se ha comentado previamente, que consiste en el almacenamiento en seco (tras el período de enfriamiento en piscinas de la central) o en húmedo del combustible gastado. Dicho almacenamiento se lleva a cabo en contenedores metálicos o de hormigón-metal.

En este caso estamos hablando de una nueva alternativa al almacenamiento del combustible nuclear, el almacenamiento en seco. Dicha alternativa se utiliza cuando las piscinas de almacenamiento de las centrales están próximas a la saturación, el caso de las centrales nucleares de Trillo y Ascó, o cuando es necesario evacuar el combustible para iniciar el desmantelamiento de la central, este fue el caso de la central nuclear de José Cabrera.

2. ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LAS PISCINAS DE COMBUSTIBLE.

2.1. Consideraciones a tener en cuenta durante el diseño de una piscina de combustible nuclear.

En este apartado se desarrollan los criterios de diseño y seguridad esenciales a tener en cuenta para el correcto diseño de la instalación.

El almacenamiento en piscinas de combustible nuclear gastado tiene tres objetivos fundamentales [12] :

1- Enfriar el combustible para evitar el calentamiento a altas temperaturas debido al decaimiento radiactivo o, lo que es lo mismo, eliminar el calor residual del combustible irradiado..

2- Proteger a los trabajadores y al público, así como al medio ambiente, de la radiación emitida durante el decaimiento radiactivo, proporcionando barreras contra la liberación de la radiactividad. Para ello es necesario el correcto confinamiento del combustible, de forma que se eviten daños en los sistemas de contención del mismo (cestas y bastidores).

3- Impedir que se produzcan accidentes críticos, como consecuencia de la liberación de material radiactivo fuera de la zona controlada.

A continuación, se detallan las consideraciones específicas a tener en cuenta para el diseño de una piscina de almacenamiento de combustible nuclear gastado [13]:

- **Subcriticidad**

Debe comprobarse que se cumplen los requisitos de diseño establecidos con el fin de garantizar la subcriticidad. Según la **Norma UNE 73-501-92 [1]** ,será preciso demostrar mediante análisis que existe cierto margen de subcriticidad del conjunto y de las partes que componen un almacenamiento de elementos combustibles en bastidores, en cualquier condición o estado de la central.

Se tendrán en cuenta todas las situaciones posibles, en condiciones normales y accidentales, tanto en la situación de almacenamiento como en los movimientos de combustible debido a las operaciones de manejo y transporte de los elementos.

Según la norma mencionada [1], las posibles condiciones accidentales son las siguientes:

1- Mala colocación del elemento combustible, incluyendo su inserción en alojamientos no previstos para el mismo y su apoyo en horizontal sobre el fondo de la piscina o sobre la parte superior del bastidor.

2- Caída del elemento desde el dispositivo de manejo sobre el propio bastidor o en los huecos libres entre bastidores.

3- Colocación errónea del elemento combustible en el espacio libre entre los bastidores y las paredes de la piscina, quedando pegado a la periferia del bastidor y en la posición de más interacción neutrónica con los elementos ya almacenados.

4- Variación de la temperatura del agua fuera del margen normal debido a insuficiente o excesiva capacidad del sistema de refrigeración de la piscina.

5- Extracción accidental de las placas de veneno, en el caso de bastidores que dispongan de ellas, salvo que se demuestre su imposibilidad.

6- Pérdida parcial del refrigerante y sus efectos posteriores, especialmente en aquellas situaciones en que se da crédito al boro disuelto en la piscina para asegurar la subcriticidad.

El análisis de criticidad debe demostrar que en la piscina se cumple que el factor de multiplicación neutrónica efectivo, K_{eff} , del combustible manejado y almacenado es menor o igual a 0,95, incluyendo incertidumbre con un 95% de probabilidad y un nivel de confianza del 95%, considerando la presencia de agua borada.

- **Diseño y estructura**

Los límites de la piscina y los componentes de retención del agua de refrigeración han de ser diseñados de forma que resistan estados de operación límite y condiciones de accidente, sin que se produzca una pérdida apreciable de agua por fuga o daños en la estructura.

Debe evitarse, en cualquier caso, el descenso del nivel de agua por debajo del mínimo que garantiza la protección radiactiva y el enfriamiento del combustible almacenado. El valor adecuado para dicho nivel es de 4 metros sobre parte superior de los elementos combustibles almacenados [14]. De este modo, las piscinas se diseñan con un nivel de agua de 8 metros por encima de los bastidores que almacenan los elementos. Con esto se asegura que durante las operaciones de manejo de los elementos combustibles, haya siempre un mínimo de 4 metros de agua sobre la parte superior de los elementos combustibles

Un descenso en el nivel de agua por debajo de los límites especificados tiene como consecuencia un enfriamiento ineficaz del combustible, produciéndose un aumento en la temperatura del agua y un aumento en la liberación de material radiactivo. Al aumentar la temperatura de la barra de combustible, la presión del gas en el interior de la barra aumenta, dando lugar a la rotura del revestimiento. Las barras de combustible nuclear son descritas en posteriormente.

Si el enfriamiento es muy bajo se pueden producir daños en la estructura. Del mismo modo ocurre si las temperaturas son cercanas a la congelación. Han de evitarse cambios bruscos de temperatura dentro de la piscina.

La temperatura del agua de la piscina debe mantenerse por debajo de 60°C (140°F) para todas las condiciones de descarga de combustible, incluyendo la descarga completa del núcleo [14].

Es por ello que durante el diseño de la piscina tiene que tenerse en cuenta la instalación de sistemas de vigilancia de nivel y temperatura.

El trazado de tuberías debería realizarse de forma que, en el caso de efecto sifón o de rotura de alguna tubería conectada, el nivel de agua de la piscina de combustible gastado no descienda por debajo del nivel necesario para que el combustible nuclear gastado almacenado permanezca sumergido en condiciones de seguridad.

Las tuberías han de diseñarse con el número mínimo de bridas y elementos en los que pudiera acumularse material radiactivo.

En el caso de que se utilicen varias piscinas conectadas entre sí mediante compuertas, estas deben diseñarse para resistir la máxima presión estática por ambos lados. El nivel inferior de las compuertas debe de estar lo suficientemente por encima de la parte superior donde se encuentran los bastidores con el combustible almacenado, con el fin de garantizar una protección efectiva. Además, las compuertas deben de disponer de juntas de estanqueidad resistentes a la radiación. El correcto diseño de dichas compuertas permite que cualquier piscina pueda aislarse de las otras para minimizar la propagación de los contaminantes en caso de accidente de una piscina, o pueda ser vaciada sin afectar el nivel de agua de las piscinas adyacentes.

- **Protección frente a la radiación**

El nivel de radiación al que están expuestos los trabajadores depende de la protección proporcionada por el agua. De modo que es de vital importancia mantener el nivel de agua de forma óptima, para que el grado de protección sea el adecuado.

Para ello es necesario disponer de un sistema de aprovisionamiento que suministre el agua necesaria cuando se produzcan situaciones de accidente. El sistema de aprovisionamiento de agua de la piscina ha de ser diseñado para proporcionar agua desmineralizada en una cantidad suficiente tal que compense las pérdidas por evaporación o por vaciado inadvertido de la piscina.

El diseño de las instalaciones debe incluir sistemas de purificación del agua de la piscina. La eliminación controlada de los materiales radiactivos (disueltos y en suspensión) es necesaria para limitar los campos de radiación en la superficie de la piscina. Por tanto, debe disponerse de equipos de eliminación de partículas en suspensión en la superficie de la piscina.

Dicho sistema de purificación ha de ser diseñado de forma que garantice la eliminación de impurezas radiactivas y sólidos en suspensión procedentes de productos de activación, de forma que la tasa de radiación emitida por el agua protectora pueda mantenerse dentro de los límites exigidos.

Debe estar presente el equipo necesario para proceder a la limpieza de las paredes de la piscina, ya que los lodos radiactivos depositados sobre el revestimiento de las paredes han de ser eliminados periódicamente.

Es de vital importancia mantener la claridad y la pureza del agua en todo instante.

- **Materiales**

Todos los materiales han de ser químicamente compatibles con el agua de la piscina y proteger, de forma efectiva, contra la corrosión y degradación. Los bastidores y demás estructuras de contención no deben contaminar el agua.

Las condiciones químicas del agua han de ser compatibles con los revestimientos de protección del combustible, la estructura de la piscina y los equipos que intervengan en el proceso de enfriamiento.

Además de ser compatibles con el agua, los materiales han de ser compatibles con el combustible y no deberían de contaminarlo con materias extrañas que pudieran dañar la integridad del mismo durante su almacenamiento.

Deberían tenerse en cuenta los posibles efectos acumulativos de la radiación sobre los materiales que, probablemente, estén sometidos a altos niveles de radiación.

- **Equipos de manipulación**

El diseño de sistemas y equipos de manipulación de combustible deben evitar la fuga o escape de lubricantes u otras sustancias que pueden alterar la pureza del agua de la piscina. Dichas sustancias no deben de entrar en la zona de almacenamiento en húmedo o, en el caso de que lo hagan, deben ser totalmente compatibles con el combustible, estructuras y equipos de almacenamiento.

El equipo para izar conjuntos de combustibles u otros componentes del núcleo [15] debería ser diseñado de tal manera que la elevación quede controlada dentro de límites fijos y aceptables. Los equipos han de ser recalibrados periódicamente.

Debería impedirse [15], por medios físicos, que el combustible se eleve en exceso, usando para ello barras de longitud adecuada que conecten la pinza de agarre con la grúa, o mediante topes mecánicos en el cable del elevador. Deberían también preverse enclavamientos eléctricos para impedir el movimiento de la máquina de recarga mientras el combustible esté en una posición incorrecta.

2.2. Situaciones de riesgo a las que están sometidas las piscinas de almacenamiento de combustible.

Pueden darse sucesos que comprometan la seguridad de la piscina de combustible nuclear gastado, así como a los trabajadores y al medioambiente. Dichos sucesos pueden tener origen interno o externo a la central [16].

Sucesos de origen interno

Son aquellos sucesos originados dentro de la central.

Uno de los principales sería los fallos operacionales durante el manejo de cargas, los cuales ya han sido descritos anteriormente.

Fallo en equipos

El diseño ha de ser tal que los fallos de equipos o sistemas, en el interior o exterior de la instalación de almacenamiento, no excedan los límites tolerables para los cuales han sido diseñados. Ejemplos de dichos sucesos son: Fallo en el funcionamiento de los sistemas de refrigeración, que pueda dar lugar a un incremento de la temperatura o a la ebullición del agua de la piscina, la dilución del material absorbente de neutrones en el agua, el atasco de un conjunto de combustible en una posición incorrecta.

Proyectiles de origen interno

Deberían tenerse en cuenta los proyectiles causados por el fallo de máquinas rotatorias, así como la posible rotura de componentes bajo presión y disponerse de la protección necesaria para garantizar que no habrá consecuencias que comprometan la seguridad. Debería de presentarse especial atención al almacenamiento de gases y de combustibles corrientes, así como a las disposiciones correspondientes para su suministro a fin de prevenir explosiones.

Incendios y explosiones

Han de llevarse a cabo estudios que permitan determinar las consecuencias que tendrían sobre el combustible almacenado, así como para la estructura de la piscina y equipos de almacenamiento (bastidores, celdas...), un fallo provocado en el sistema de refrigeración o en el suministro eléctrico. Ello podría provocar, en el caso de que no se tomasen las medidas adecuadas, un incremento de la temperatura del combustible almacenado, que podría derivar en un incendio descontrolado con consecuencias fatales.

Las estructuras deben ser las adecuadas para resistir ondas de choque provocadas por una explosión en la propia central o en centrales o edificios colindantes a la misma.

Errores humanos

Es de vital importancia hacer un estudio de los posibles errores que tengan origen humano, con el fin de diseñar estrategias que permitan corregirlos y, en el mejor de los casos, evitarlos. Los errores, así como sus consecuencias, han de ser considerados durante la etapa de diseño.

Sucesos de origen externo

Se trata de sucesos ajenos a las condiciones de operación internas de la propia central.

Sucesos sísmicos

Es necesario realizar un estudio sísmico con el fin de determinar la resistencia sísmica de las estructuras que componen las instalaciones. La Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) ha desarrollado una lista con las posibles consecuencias de un desastre sísmico. A continuación se mencionan algunas de las posibles:

-Caída de cargas.

-Rotura de tuberías que den lugar a fallos en la piscina de almacenamiento y fallos en los sistemas de refrigeración.

-Deslizamiento, vuelco o impacto de los bastidores de almacenamiento con otros objetos u otros bastidores.

-Deformación de los bastidores de combustible.

Vientos de elevada intensidad y tornados

Han de tenerse en cuenta las sobrecargas en la estructura ocasionadas por vientos de alta intensidad, así como el impacto de proyectiles originado por tornados.

Inundaciones

Deben de llevarse a cabo estudios que permitan predecir las posibles consecuencias de una inundación. Dichos estudios tienen que llevarse a cabo sin excepción en aquellas instalaciones próximas a ríos y costa, donde está presente el riesgo de inundación. La estructura de las instalaciones ha de estar preparada para resistir estos fenómenos. Una inundación podría traer consigo consecuencias indeseables, ya que la estructura podría no resistir el impacto de las olas (en caso de tsunami) o los sistemas de refrigeración (como posible causa de un fallo en el suministro eléctrico) podrían quedar inutilizados debido a la inundación.

Ataques terroristas

Como se ha mencionado anteriormente, un accidente que tendría importantes consecuencias sería el descenso del nivel de agua por debajo del límite de seguridad que garantiza la correcta refrigeración del combustible nuclear gastado y la protección de los trabajadores frente a la radiación. Un hecho que puede provocar el vaciado total o parcial de la piscina y que puede tener consecuencias catastróficas para la instalación, los trabajadores y el medioambiente es la posibilidad de un ataque terrorista. Pueden considerarse cuatro clases de ataques terroristas [12]:

- Ataques aéreos en los que se utilizan aviones civiles de gran tamaño o aviones más pequeños cargados con explosivos.
- Ataques terrestres llevados a cabo por grupos entrenados y armados.
- Combinación de asaltos aéreos y terrestres.
- Robo de combustible nuclear gastado para usos terroristas en dispositivos de dispersión radiológica.

Con el fin de mantener la seguridad en la central, es de vital importancia tener en cuenta los diferentes tipos de ataques a los que puede estar expuesta la instalación.

2.3. Descripción de las barras y de los elementos combustibles para los reactores utilizados en España.

Las barras de combustible están formadas por pastillas de dióxido de uranio enriquecido (para los reactores utilizados en España). Las dimensiones genéricas de dichas pastillas engloban un diámetro comprendido entre 0,3 centímetros y 1,25 centímetros y una longitud que va desde 1 centímetro hasta 1,65 centímetros [17]. En la figura 8 [17] puede apreciarse la estructura física de dichas pastillas de combustible una vez fabricadas.



Figura 8: Pastillas de combustible [17].

Una vez fabricadas las pastillas, el siguiente paso sería introducirlas en los tubos de Zircaloy. Según el procedimiento seguido por ENUSA, los tubos de Zircaloy son soldados previamente con un tapón por la parte inferior para posteriormente proceder a cargarlos con las pastillas de combustible. Para prevenir que durante las operaciones de manipulación tenga lugar el deslizamiento de las pastillas en el interior del tubo, se introduce un muelle de compresión situado entre la parte superior de la pila de pastillas y el tapón superior. Finalmente, para incrementar la seguridad de las barras, se procede a presurizar el interior del tubo con un gas inerte (generalmente helio) con el fin de evitar el colapso de las mismas debido a la elevada diferencia de presión entre el agua de refrigeración que circula por el reactor, superior a 140 bar en el caso de PWR [18] y 60 bar en el caso de BWR [19], y el interior de la barra. Una vez realizado esto se procede a soldar el tapón superior, quedando terminada la barra de combustible. Destacar que el diámetro de las pastillas es ligeramente inferior a el diámetro final de la barra, puesto que existe una pequeña capa de gas inerte. En la figura 9 se muestra un corte de la barra, con medidas orientativas de las distintas secciones y en la figura 10 queda reflejado como sería la estructura de la barra finalmente.

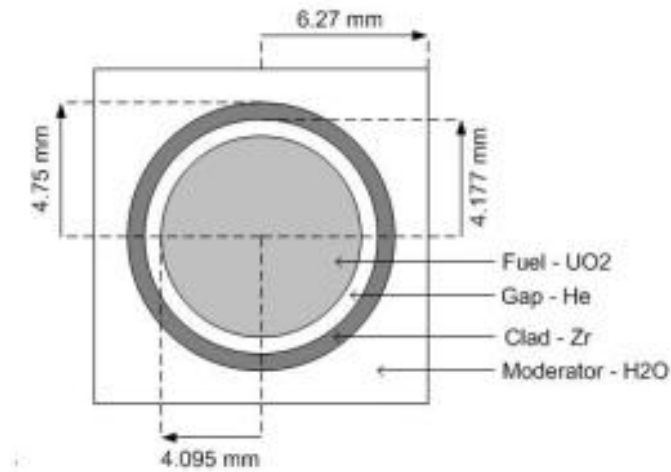


Figura 9: Distintas partes de la barra de combustible (FUENTE: www.nuclear-power.net)

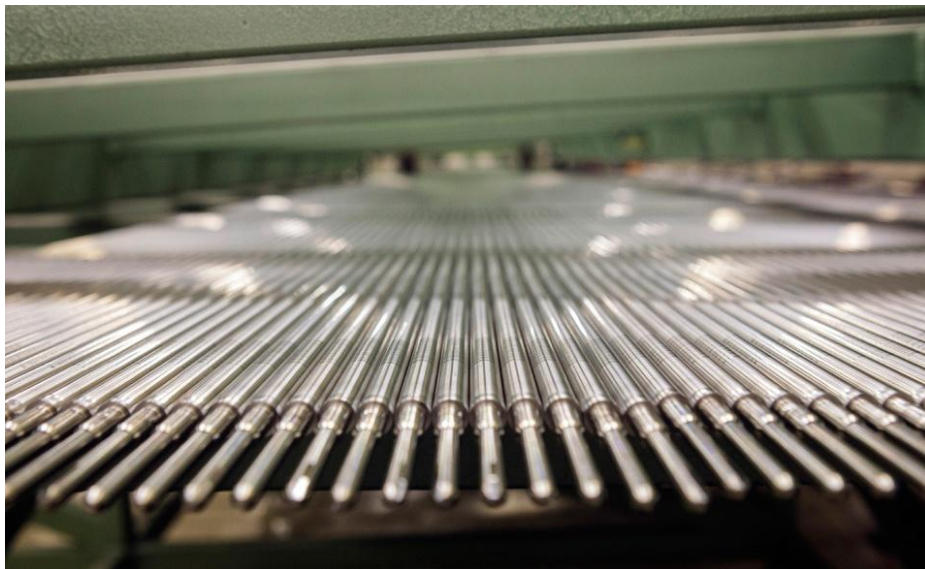


Figura 10: Barras de combustible nuclear [17] .

Como se ha mencionado anteriormente, las dimensiones de la barra, así como el material de la misma, dependen del tipo de reactor utilizado. Para el caso de Westinghouse y General Electric (suministradores de reactores PWR y BWR), las características de las barras quedan recogidas en la tabla 3.

	PWR	BWR
Material	Zircaloy-4	Zircaloy-2
Longitud (m)	3,65	4,07
Diámetro exterior (mm)	9,14	12,3
Espesor revestimiento (mm)	0,57	0,81
Diámetro capa de helio (mm)	0,16	0,23
Diámetro pastilla (mm)	7,84	10,45
Presión gas interior (bar)	30-33	3-5

Tabla 3: Características de las barras de combustible según el tipo de reactor [18] , [19] .

Dichas características pueden variar dependiendo del país. Si bien, en el caso de ENUSA las características de diseño de las barras son muy aproximadas a las que han sido reflejadas en la tabla 3.

El siguiente paso tras la fabricación de las barras de combustible sería la fabricación del esqueleto que contiene las barras. Dicho diseño varía en función del tipo de reactor. El conjunto formado por las barras y el esqueleto se denomina conjunto o elemento de combustible, que será introducido en el núcleo del reactor y posteriormente en los bastidores de las piscinas de almacenamiento.

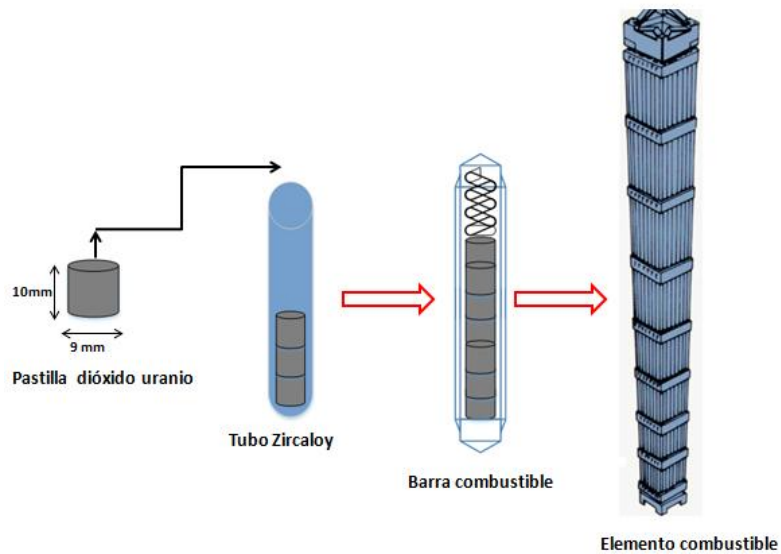


Figura 11: Procedimiento de fabricación de un elemento de combustible nuclear.

Como se ha mencionado previamente, la estructura del conjunto de combustible varía dependiendo del tipo de reactor utilizado. En la figura 12 [19] se representa un elemento combustible utilizado en un reactor de tipo agua en ebullición (BWR).

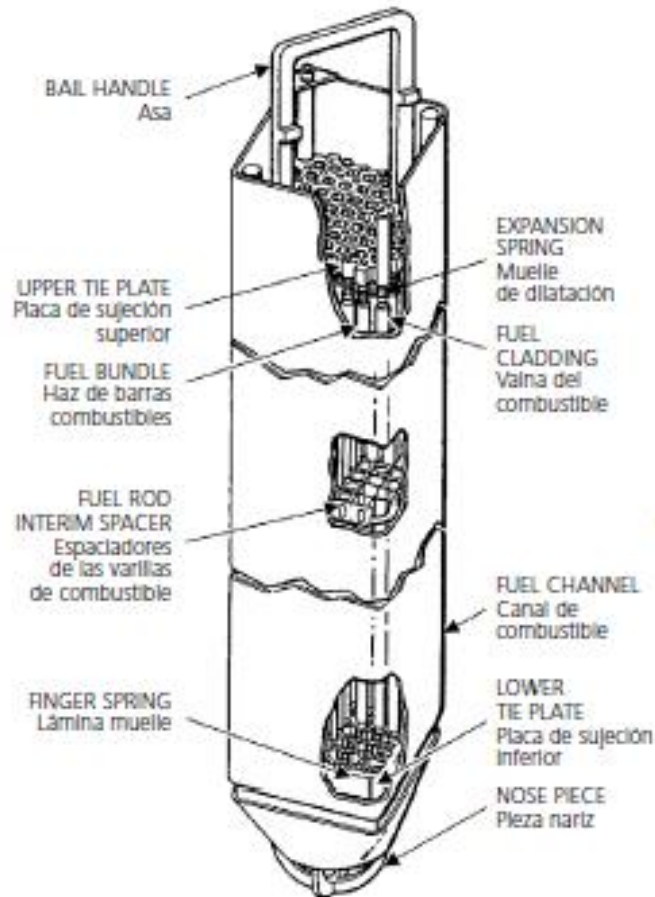


Figura 12: Elemento combustible para un reactor tipo BWR diseñado por General Electric [19] .

Cada haz de barras combustibles cuenta con 64 barras distribuidas en una matriz cuadrada de 8x8 y apoyadas sobre los platos de sujeción superior e inferior [19]. El plato de sujeción inferior dispone de una pieza denominada "nose piece" (pieza nariz), cuya función principal es servir de soporte y distribuir el refrigerante a las barras de combustible. El plato de sujeción superior dispone de un asa para el manejo del elemento combustible. El canal de combustible rodea el haz de barras combustibles, dando lugar al conjunto de combustible y tiene una longitud aproximada de 4,2 metros [19].

Para mantener la posición relativa entre canal de combustible y plato de sujeción inferior, se dispone de la lámina muelle.

En el caso de ENUSA, los elementos combustibles para el caso de reactores BWR tienen unas dimensiones aproximadas de **4 metros** de alto y una base cuadrada de **133 mm x 133 mm**.

Para el caso de un reactor de tipo agua a presión (PWR) la estructura es diferente a la anterior, tal y como se muestra en la siguiente figura.

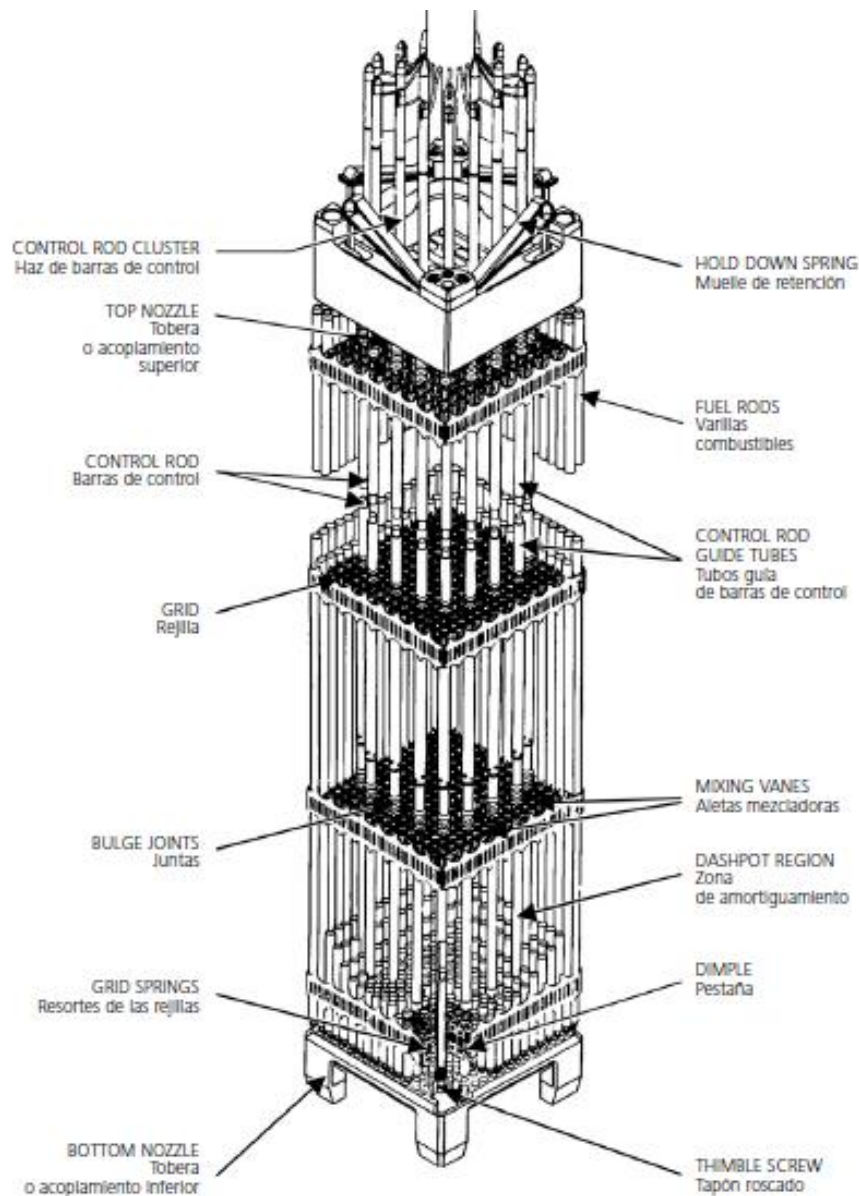


Figura 13:Elemento combustible para reactor tipo PWR diseñado por Westinghouse [18] .

En este caso las barras se disponen en una matriz de 17x17, habiendo aproximadamente un total de 264 barras por elemento combustible [18].

Para este caso las dimensiones son algo superiores que para BWR, siendo aproximadamente **4,5 metros** de alto y una base cuadrada de **214 mm x 214 mm**.

2.4. Tipos de bastidores utilizados para el almacenamiento de elementos combustibles.

La función de los bastidores es soportar y contener los elementos combustibles durante su período de enfriamiento y decaimiento radiactivo en la piscina. Dependiendo del tipo de instalación, existen numerosos tipos de bastidores. Los más usados en la actualidad [20] se presentan en la siguiente figura:

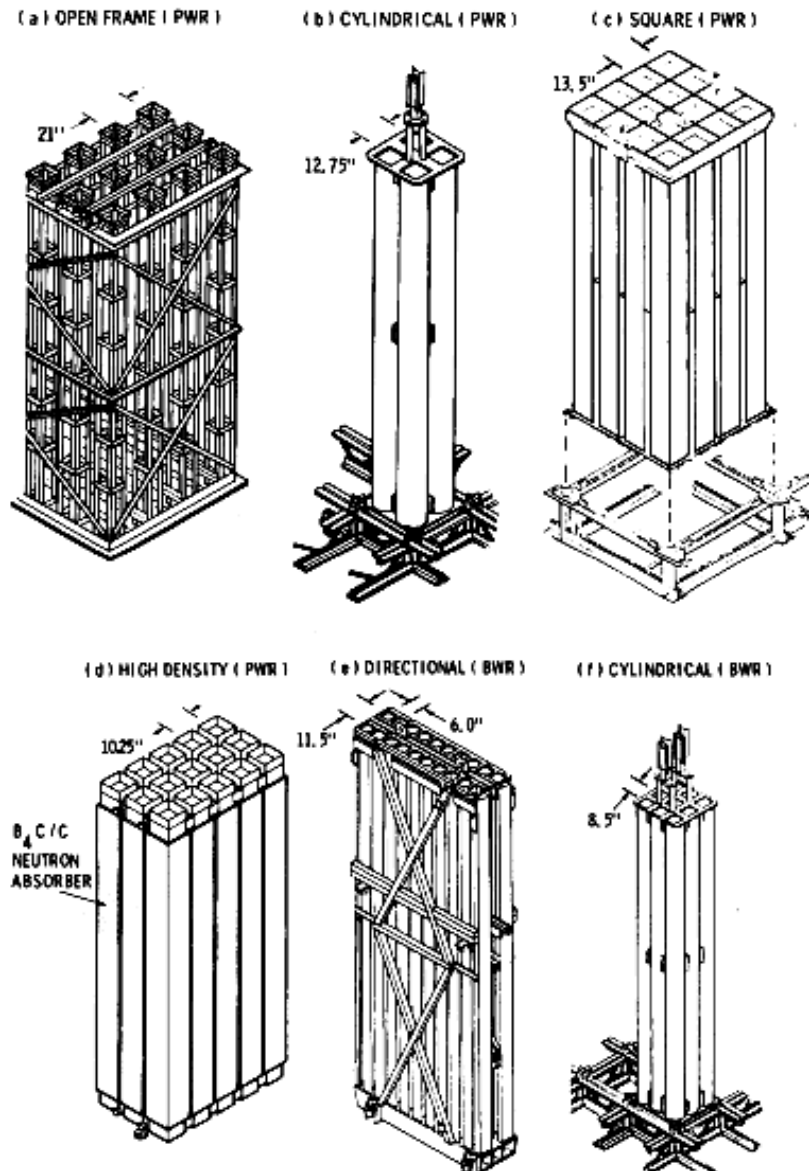


Figura 14: Bastidores de almacenamiento de elementos combustibles para PWR y BWR [20].

En la figura anterior puede apreciarse la distancia que separa el centro de las celdas que contiene el bastidor.

El agua entra por la parte inferior de los bastidores y circula, por diferencia de densidad, de forma ascendente debido al calentamiento del agua en contacto con los elementos combustibles. Para los casos a, y b se dispone de un orificio en la parte inferior de los bastidores de 37,5 mm, para hacer posible la circulación del agua por el interior de las celdas.

Para los bastidores del tipo c, el orificio de entrada de agua tiene un diámetro de 75 mm. En el caso de los bastidores tipo d, el diámetro de dicho orificio es de 125 mm y en el caso de los bastidores e y f, el orificio tiene un diámetro de 90,625 mm.

En la figura 15 [20] se adjunta la sección transversal de los bastidores anteriores.

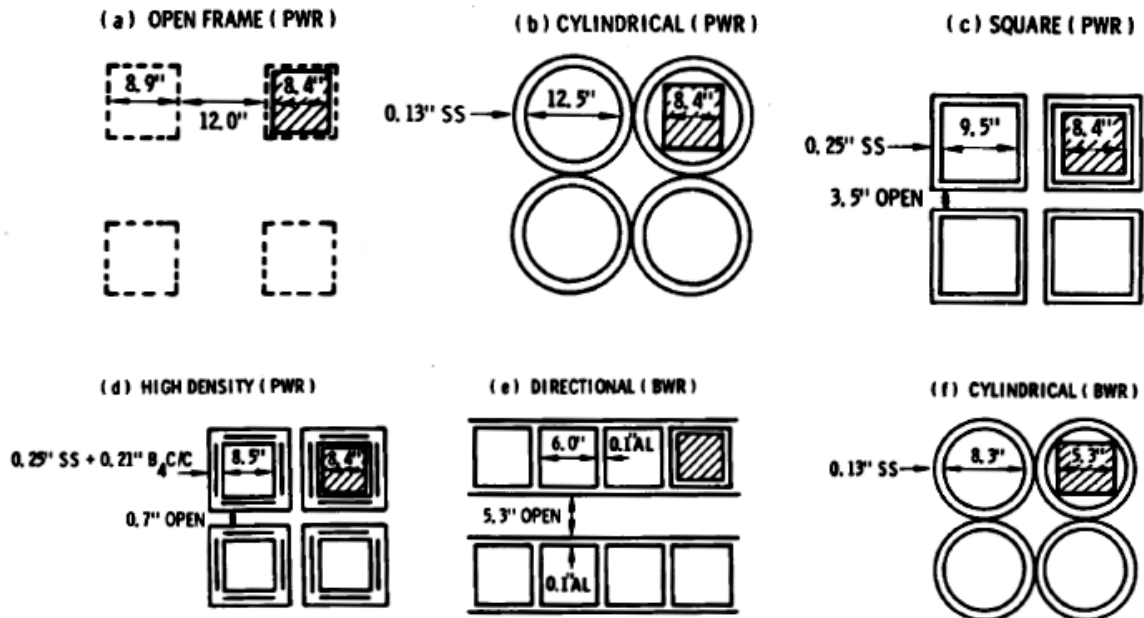


Figura 15:Sección transversal de los bastidores considerados [20] .

En la figura anterior, además de la distancia entre los centros de las celdas, se aprecia el espacio disponible para la circulación del agua entre las mismas, así como el espesor estas.

Puede comprobarse que las dimensiones de las celdas son tales que el elemento combustible puede introducirse en las mismas. Las dimensiones de los elementos combustibles aparecen en el punto anterior.

Los bastidores anteriores presentan una altura aproximada de 4,27 metros. La altura de los mismos tiene que ser compatible con la altura de los elementos combustibles: 4,2 metros para reactores tipo BWR y 4,5 metros para reactores tipo PWR (ver punto 3).

En cuanto al material de los bastidores, estos están fabricados de acero borado [21].

2.5. Localización de la piscina en la instalación nuclear.

En función del fabricante y tipo de reactor, las piscinas de almacenamiento pueden estar localizadas en el propio edificio del reactor o en un edificio contiguo al mismo (ver figura 16 [12]).

El diseño correspondiente a la figura 16 [12] es de tecnología norteamericana. Todas las centrales nucleares españolas se basan en este tipo de diseño (Westinghouse y General Electric), excepto la central nuclear de Trillo, cuya tecnología es alemana (Siemens-KWU) y se caracteriza por la localización de la piscina en el propio edificio del reactor, a diferencia de las demás centrales.

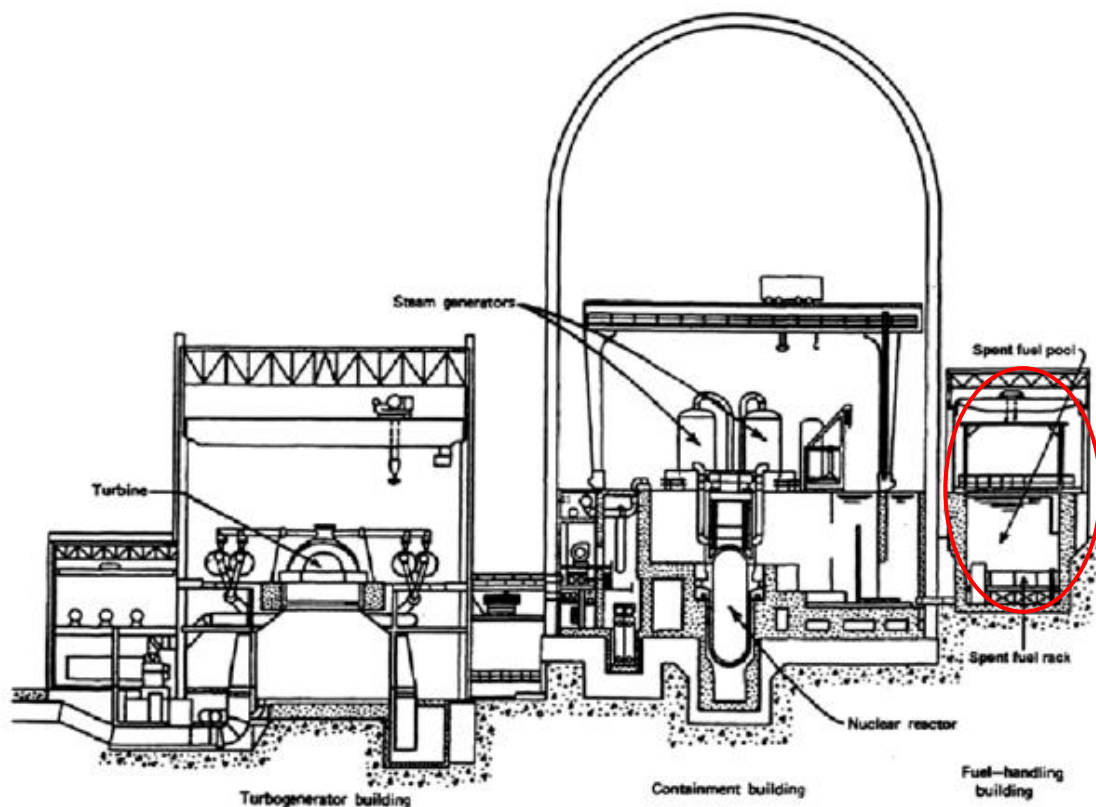


Figura 16: Sección esquemática del edificio de contención de un reactor de tecnología norteamericana [12].

Para los diseños de tecnología americana, las dimensiones típicas de la piscina de almacenamiento son: **11,89 m x 7,32 m x 12,19 m** (largo, ancho y profundo respectivamente) [18], [19].

2.6. Transporte de los elementos combustibles hasta la piscina de almacenamiento.

Con el fin de garantizar una protección efectiva frente a la radiación, así como una visualización clara del elemento combustible mientras es transportado, todas las operaciones de transporte de los elementos combustibles hacia la piscina de almacenamiento se realizan bajo agua.

Las instalaciones de manejo de combustible quedan localizadas en dos zonas principales [12]:

Zona 1: Cavidad de descarga y canal de transferencia de combustible.

La cavidad de recarga está reforzada de una estructura de hormigón y durante la descarga se encuentra llena de agua, teniendo aspecto de piscina sobre el reactor. Durante el traslado del combustible desde el núcleo del reactor hasta el sistema de transferencia, la cavidad de recarga tiene una masa de agua aproximada de 8 metros (aproximadamente 4 metros sobre la parte superior del elemento combustible). Es de vital importancia que previamente a la extracción de los elementos combustibles, la cavidad haya sido inundada. Dicha cavidad se encuentra situada en el edificio del reactor (figuras 16 y 17 [22]). Es en esta cavidad es donde tiene lugar la retirada de los elementos combustibles del núcleo del reactor, que son trasladados a lo largo del canal de transferencia hasta el edificio de combustible.

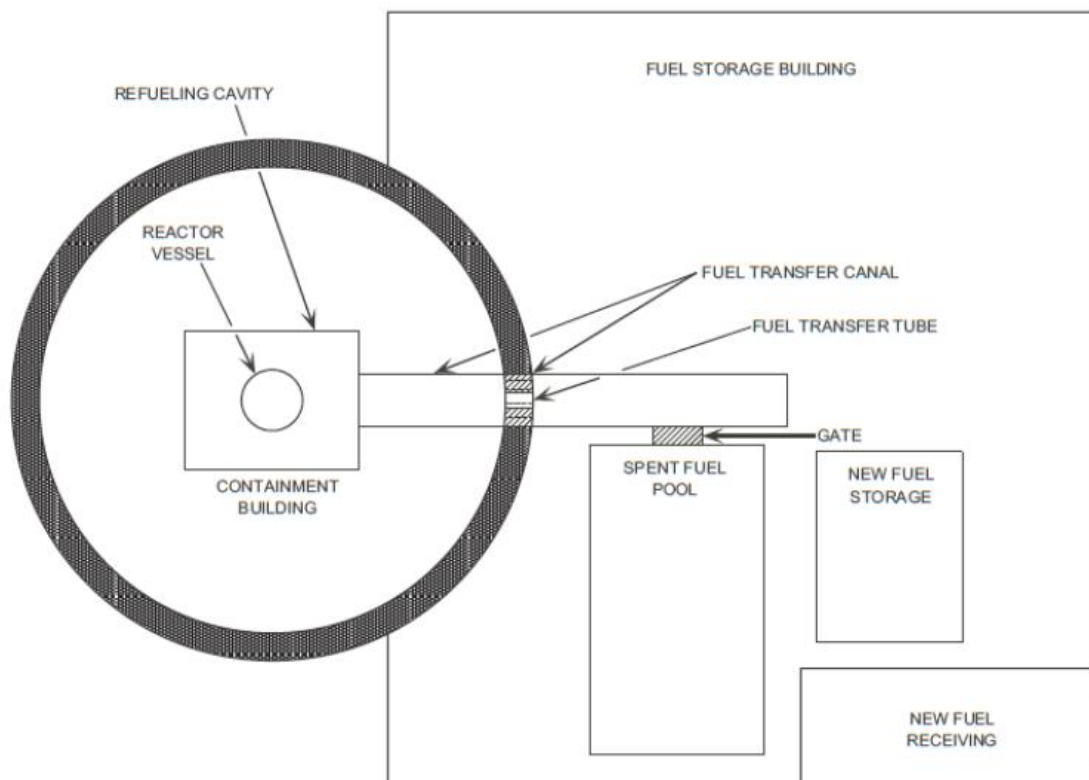


Figura 17: del reactor-canal de transferencia-edificio de almacenamiento de combustible [22] .

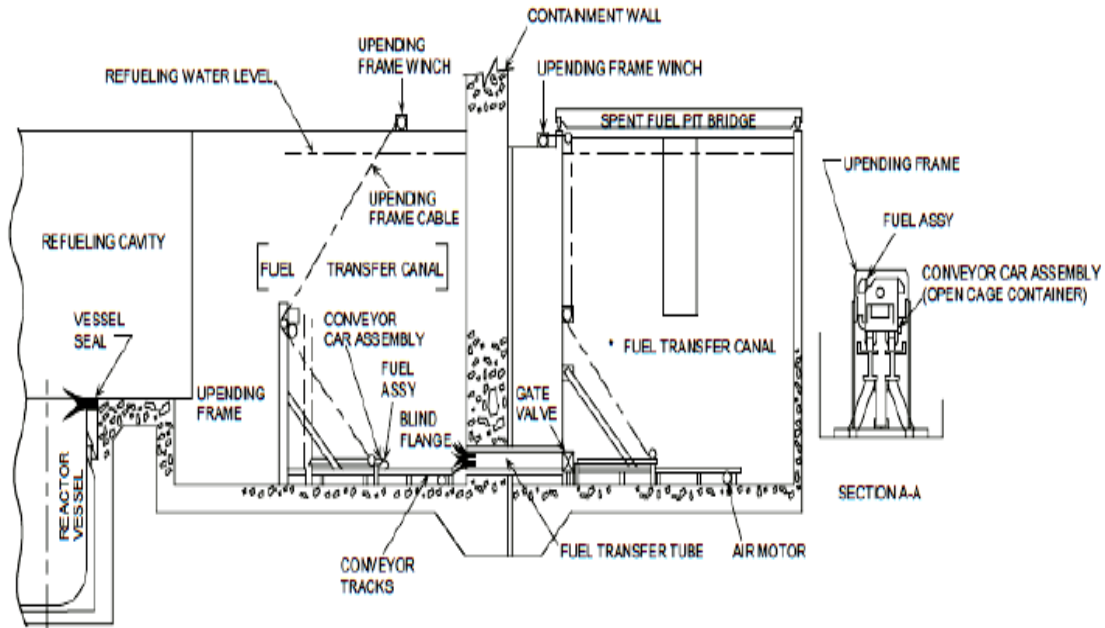


Figura 18: Sistema de transferencia de combustible [22].

El canal de transferencia de combustible consiste en un pasaje que se extiende desde la cavidad de recarga hasta la superficie interna del edificio de contención del reactor.

Dicho canal está formado por paredes con un refuerzo de hormigón, las cuales se extienden hasta la misma altura que la cavidad de recarga, quedando parte del canal a una cota inferior a la de la cavidad de recarga. Dicho diseño favorece que haya espacio suficiente para el dispositivo giratorio encargado de transferir los elementos combustibles en posición horizontal hacia el edificio de almacenamiento de combustible. Dicha transferencia se realiza a través del tubo de transferencia, el cual conecta el canal de transferencia con el edificio de almacenamiento donde se encuentra la piscina de combustible nuclear gastado. Dicho tubo permanece cerrado por ambos extremos mediante una válvula de compuerta cuando no se esté produciendo la transferencia de combustible a través del canal. El tubo está construido de acero inoxidable y tiene un diámetro aproximado de 0,5 metros [22].

El dispositivo giratorio mencionado (ver figura 19 [18]) consiste en un carro que se desliza bajo el agua y sobre raíles. Recibe los elementos combustibles en posición vertical y realiza la rotación de los mismos para transportarlos horizontalmente a través de tubo de transferencia, para volver a rotar los elementos hasta la posición vertical una vez han llegado al edificio de combustible.

Por tanto, se dispone de un dispositivo en el canal de transferencia del reactor y otro en el edificio de combustible.

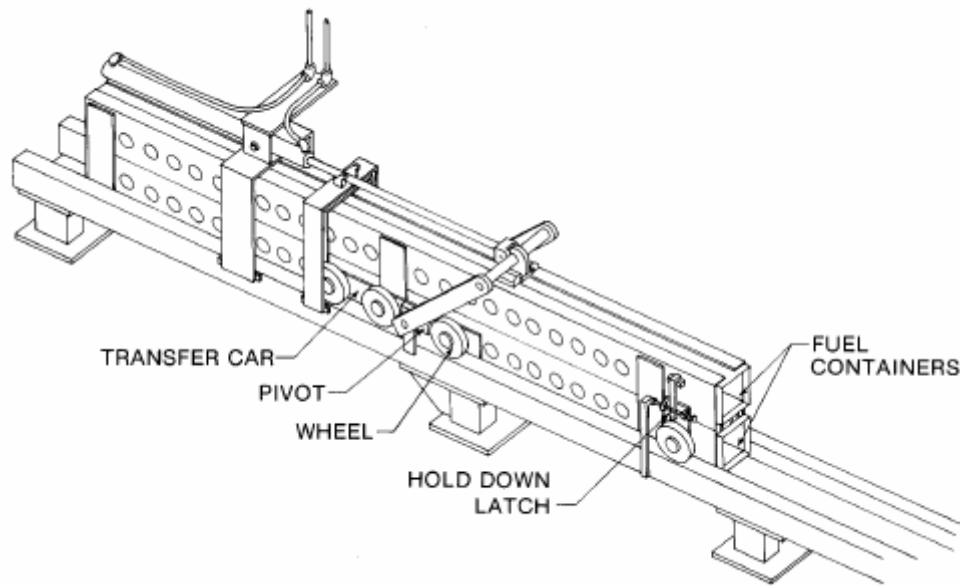


Figura 19: Carro que desplaza los elementos combustibles sobre raíles a través del tubo de transferencia [18] .

2.7. Descripción cualitativa de los fenómenos de transferencia que tienen lugar entre la barra de combustible y el agua de la piscina.

2.7.1. Transferencia de calor.

Para que tengan lugar fenómenos de transferencia de calor, es necesario que exista un gradiente térmico debido a una diferencia de temperaturas entre un cuerpo o entre cuerpos, ya que la transferencia de calor se define como la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas [23] .

Teniendo en cuenta que el agua de la piscina debe mantenerse en torno a los 45°C en condiciones normales de operación (por debajo de 60°C en condiciones de accidente) [24] y que la temperatura de las barras de combustible tras ser descargadas del reactor es aproximadamente 400°C (para el caso concreto de una central nuclear española [25]), es lógico que en el interior de la piscina exista un gradiente térmico que da lugar a fenómenos de transferencia de calor.

En primer lugar se describe, a modo de resumen, los tres fenómenos de transporte de calor que pueden tener lugar entre dos sistemas [23] para, posteriormente, seleccionar aquellos que tienen lugar dentro de la piscina de almacenamiento.

Conducción: La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones de las mismas. En presencia de un gradiente de temperatura, la transferencia de energía por conducción debe ocurrir en dirección de la temperatura decreciente. Para un gradiente de temperatura

establecido, el flujo de calor aumenta con el incremento de la conductividad térmica. Señalar que la conductividad térmica es una propiedad de transporte que ofrece una indicación de la velocidad a la que se transfiere energía en el proceso de difusión, dependiendo de la estructura física de la materia. La conductividad térmica en sólidos es mayor que en líquidos y mucho mayor que en gases.

Convección: Transferencia de energía entre una superficie y un fluido que se mueve sobre esta. Existencia de una capa límite entre la superficie y el fluido, que puede ser laminar o turbulenta, dependiendo de si el movimiento del fluido es altamente ordenado (laminar) o altamente irregular (turbulento). En el caso de régimen turbulento la transferencia se ve favorecida. El régimen se puede determinar a partir del número de Reynolds.

Es importante diferenciar dos tipos de convección: la convección libre y la convección forzada. La diferencia principal entre ambas es la velocidad de flujo, que es mucho menor para convección libre. En el caso de convección libre el movimiento del fluido se debe a las fuerzas de empuje en el fluido, mientras que en la convección forzada el movimiento del fluido se impone de forma extrema. El empuje se debe a un gradiente de densidad del fluido y una fuerza de cuerpo proporcional a la densidad (generalmente la fuerza de la gravedad).

Radiación: En este caso se tienen dos superficies separadas por un medio que no participa en intercambio de energía. Dicho medio no emite, absorbe ni dispersa energía. Dichos requisitos los cumple de forma exacta un vacío, siendo cumplidos con gran exactitud por la mayoría de los gases.

Como se ha indicado anteriormente la temperatura del agua de refrigeración es mucho menor que la temperatura de las barras descargadas del núcleo del reactor, de modo que tendrá lugar un gradiente térmico que hará posible la transferencia de calor entre el conjunto de combustible y el agua. De este modo es posible el enfriamiento de las barras de combustible. La eliminación del calor residual se logra principalmente mediante convección natural del agua a través de la matriz de almacenamiento [26]. Los bastidores de almacenamiento están diseñados con el fin de garantizar el flujo del agua a través de los mismos. En cualquiera de las secciones del bastidor, este calentará el agua adyacente a cada parte sumergida

estas mismas tienen lugar mediante la circulación del fluido desde la parte inferior a la superior de las mismas [26]. Esto se debe a que al introducirse el fluido frío, éste desciende ya que está a una temperatura inferior al fluido en contacto con las barras (fluido caliente). Por tanto, se tiene una diferencia de temperaturas, que se traduce en una diferencia de densidad. El fluido frío, introducido por la parte superior, desciende por diferencia de densidad hacia la parte inferior de los bastidores. Al estar en contacto con las barras, éste se calienta y comienza a ascender. Puesto que la refrigeración es continua, en todo instante se introduce fluido frío, tiene lugar una circulación continua por diferencia de densidad. Por tanto, puede decirse que tiene lugar una convección natural. En la figura 20 [26] puede apreciarse el fenómeno descrito de forma esquemática.

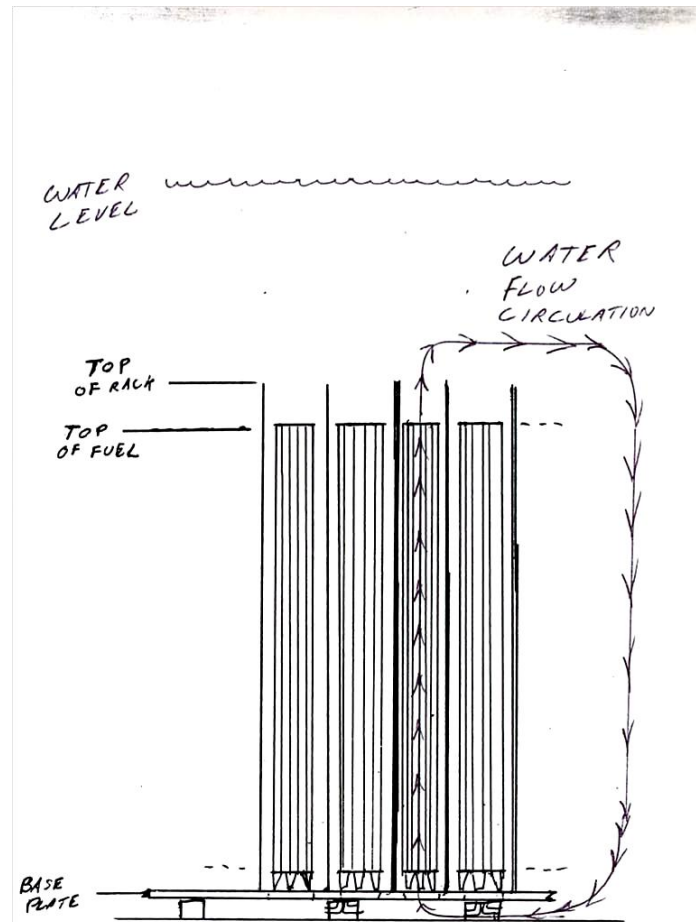


Figura 20: Circulación del fluido por convección natural a través de los bastidores [26].

Antes de transferirse al agua, el calor tiene que "viajar" desde el foco emisor a través de las diferentes resistencias que se interponen entre la barra de combustible y el agua.

A fin de evitar la oxidación del combustible por contacto con el refrigerante, las barras de combustible están revestidas por una capa protectora que depende del tipo de reactor. Para el caso de las centrales españolas, cuyos reactores son del tipo PWR y BWR el revestimiento utilizado es de generalmente de Zircaloy-2 (Ver tabla 3). Teniendo esto en cuenta, se observa que antes de llegar al agua el calor ha de atravesar el revestimiento del combustible. La temperatura es máxima en el centro de la barra, descendiendo a medida que se avanza radialmente (ver figura 21). Esto se verifica posteriormente con el modelo realizado.

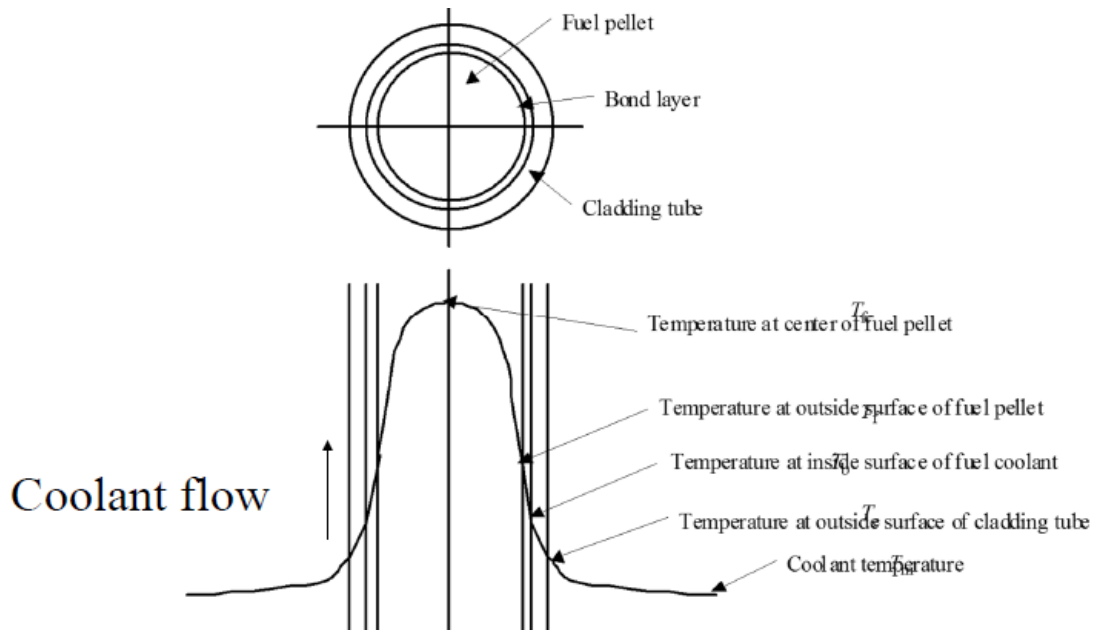


Figura 21: Perfil de temperaturas desde el interior de la barra hasta el agua [26] .

Fuera de la piscina también tienen lugar fenómenos de transferencia, pues el calor ha de ser evacuado al ambiente. La eliminación del calor del edificio de almacenamiento de combustible nuclear gastado se lleva a cabo con la ayuda de un sistema de ventilación forzada.

Hasta ahora, únicamente se ha hablado de la conducción y convección natural como mecanismos de transferencia de calor en el interior de la piscina, sin hacer mención a la radiación. Dicho fenómeno no tiene lugar en el interior de la piscina en condiciones normales de operación, es decir, cuando la piscina se encuentra con el nivel de agua adecuado y esta circula de forma adecuada a través de los conjuntos de combustible. Sin embargo, puede darse una situación de accidente, como las mencionadas en el primer informe de este proyecto, que tengan como consecuencia el vaciado parcial o total del nivel de agua. En este caso la radiación sí entra en juego y hay que tenerla en cuenta, ya que tiene lugar entre las barras de combustible, así como entre bastidores y demás elementos [27].

2.7.2. Transferencia de materia.

Para que se produzca una migración de los radionucleidos desde la barra de combustible nuclear gastado hasta el agua de la piscina, se pueden dar dos situaciones:

-*Situación 1:* Aparición de una grieta en la capa de revestimiento, produciéndose la penetración del agua a través de dicha grieta.

-*Situación 2:* Difusión de los radionucleidos a través de la capa de revestimiento en contacto con el combustible.

Situación 1

La rotura del revestimiento puede darse por varios factores, como ya se indicó en el primer informe de este proyecto, ya sea durante el manejo del combustible nuclear gastado o por aumentos de presión en el gas como consecuencia de un aumento de temperatura en la barra.

En este caso se propone un modelo que consiste en la difusión de radionucleidos procedentes de la barra de combustible nuclear gastado a través de una pequeña grieta en el revestimiento tal y como se refleja en la figura 22 [28]. Se tienen en cuenta las siguientes suposiciones:

-Cuando el agua penetre en el interior de la grieta, tendrá lugar una etapa de contacto directo entre el agua de refrigeración y la barra de combustible nuclear gastado. De modo que existe un flujo externo de agua sobre la superficie de la barra de combustible.

-Dado que existe un gradiente de concentración, puesto que la concentración de radionucleidos en la barra de combustible es mayor que en el agua, se produce una difusión que tiene lugar desde la superficie del combustible hasta el agua de refrigeración.

-Tras la difusión de los radionucleidos desde la superficie de la barra hasta el seno del fluido, estos abandonan la grieta son emitidos a lo largo de toda la piscina.

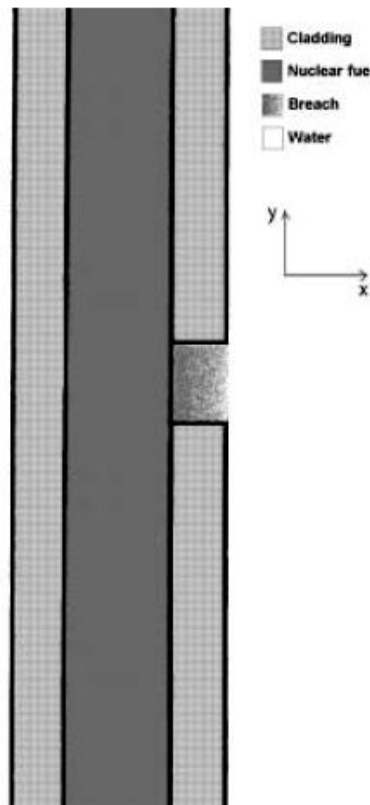


Figura 22: Sección de la barra de combustible y del revestimiento dañado [28] .

En la figura anterior se muestra esquemáticamente la situación planteada, en la que se ha producido una grieta en el revestimiento de la barra de combustible.

Por tanto, se puede decir que tiene lugar un flujo de radionucleidos desde el interior de la barra hasta el agua.

Situación 2

En este caso no existe grieta alguna que permita el contacto directo entre la barra de combustible y el agua de refrigeración. La difusión tiene lugar, en un principio, a través del revestimiento de la barra y, posteriormente se produce una difusión molecular desde el revestimiento hacia el agua de refrigeración.

En este caso se tiene una difusión entre dos sólidos, la superficie de la barra de combustible y la superficie del revestimiento.

Se considera que la concentración de radionucleidos existente en el centro de la barra es distinta a la que hay en la interfase con la capa de revestimiento. La concentración de radionucleidos en la interfase es mayor que la concentración existente al otro lado del revestimiento, en la zona de contacto con el agua. Por tanto se tiene un gradiente de concentración, es decir, una fuerza impulsora que da lugar a un flujo de radionucleidos a través de la capa de revestimiento.

3. BASES DE DISEÑO.

3.1. Tipo de central a usar como referencia.

Los cálculos de diseño llevados a cabo corresponden con una de las centrales de tipo agua en ebullición (BWR) de tecnología norteamericana. La potencia térmica de dicha central es de 3.237 MWt.

Por tanto, se hace una selección de los elementos necesarios que se corresponden con dicho tipo de centrales.

3.2. Dimensiones de las barras y elementos combustibles.

Señalar que para los cálculos y simulaciones realizadas, se considera la barra de combustible como un elemento macizo, sin espesores ni capas internas. Dichas dimensiones se corresponden con las descritas en el punto 2.3 (tabla 3).

Para el caso de estudio se consideran las siguientes dimensiones de las barras (ver tabla 3):

- Radio exterior de la barra: se le asigna un valor de **0,00615 metros**.
- Longitud de la barra: se le asigna un valor de **4,02 metros**.

En el caso de los elementos combustibles, las dimensiones correspondientes a BWR son:

- Longitud: se le asigna un valor de **4,1 metros**.
- Base cuadrada: presenta unas dimensiones de **133x133 milímetros**.

3.3. Rango de temperatura del agua de la piscina.

El intervalo normal de operación para la temperatura del agua de una central española en concreto es: $[15,6 < T_{\infty} < 51,2]$ °C [25].

Anteriormente se ha visto que la temperatura del agua nunca debe sobrepasar los 60°C. Por tanto, el intervalo considerado para el diseño en este proyecto es: $[16 < T_{\infty} < 60]$ °C.

3.4. Situación límite.

La situación límite considerada es aquella en la que la temperatura del agua sobrepasa el límite superior de temperatura impuesto en el punto anterior.

3.5. Potencia disipada por un elemento combustible.

La potencia de un elemento combustible recién descargado a la piscina es de aproximadamente **0,12 MW**, pero en un solo día disminuye hasta los **0,04 MW**. Estos datos son específicos para el caso de una central nuclear española [25].

Para el modelo desarrollado de transferencia de calor, se va a suponer que la potencia liberada por el elemento combustible tiene un valor constante de **0,04 MW**. Dicha suposición se debe a que el tiempo considerado para el análisis del fenómeno de transferencia es mucho menor que el tiempo de desintegración media durante el cual los productos de fisión y actínidos minoritarios que contiene la barra estarán liberando energía térmica y radiactiva. Entre los

dichos elementos se encuentran el Americio (Am) y el Neptunio (Np), cuyos períodos de semidesintegración son 500 años y $2,25 \times 10^6$ años respectivamente [29].

El dato anterior de potencia se corresponde con la potencia liberada en la superficie del elemento. Pero dicha potencia es liberada por un elemento combustible, no por una barra. Una elemento combustible para el caso de un reactor BWR tiene un total de 64 barras (ver punto 2.3).

3.6. Bases de diseño para el cálculo de las dimensiones de la piscina. Tipo de bastidores seleccionados.

Para poder realizar un diseño de la piscina, en cuanto a dimensiones se refiere, es necesario conocer el número de bastidores que se quiere almacenar, así como las dimensiones de los mismos.

Además de las dimensiones de las celdas, las cuales están presentes en las figuras 14 y 15 [20], es necesario conocer:

1. Distancia existente entre bastidores.
2. Distancia existente entre los bastidores y el suelo de la piscina.
3. Distancia existente entre los bastidores y las paredes de la piscina.
4. Nivel de agua entre la parte superior de los bastidores y la superficie de la piscina.

Se asume que en la mayoría de los casos, existe una distancia de **40 centímetros** (cm) entre los bastidores y el suelo de la piscina y entre los bastidores y las paredes de la piscina [30].

El nivel de agua mínimo considerado sobre la parte superior de los bastidores es de **8 metros**, de acuerdo con lo visto en el punto 2.1 de la memoria.

Para determinar la capacidad de la piscina es necesario conocer el tipo de reactor, así como la capacidad de su núcleo y los ciclos de recarga de combustible.

La capacidad del núcleo varía dependiendo del tipo de reactor. En la siguiente tabla se recoge la capacidad de los núcleos para los reactores españoles [31], así como los ciclos de descarga de los mismos [32].

	Trillo	Vandellós II	Ascó I y II	Almaraz I y II	Cofrentes	Garoña
Tipo reactor	PWR	PWR	PWR	PWR	BWR	BWR
Capacidad núcleo (elementos)	177	157	157	157	624	400
Ciclo de descarga (meses)	18	18	18	18	24	24

Tabla 4: Capacidad del núcleo y ciclos de descarga para los reactores españoles.

Para los cálculos que se van a llevar a cabo se considera un reactor agua a presión (BWR) con un núcleo de 624 elementos y unos ciclos de descarga de 24 meses.

Otra de las bases de cálculo es la fracción del núcleo retirada durante los ciclos de recarga. Lo más habitual es que **un tercio** del núcleo sea retirado durante estos ciclos [18], [19].

En cuanto a los bastidores utilizados se seleccionan los de tipo **directional**:

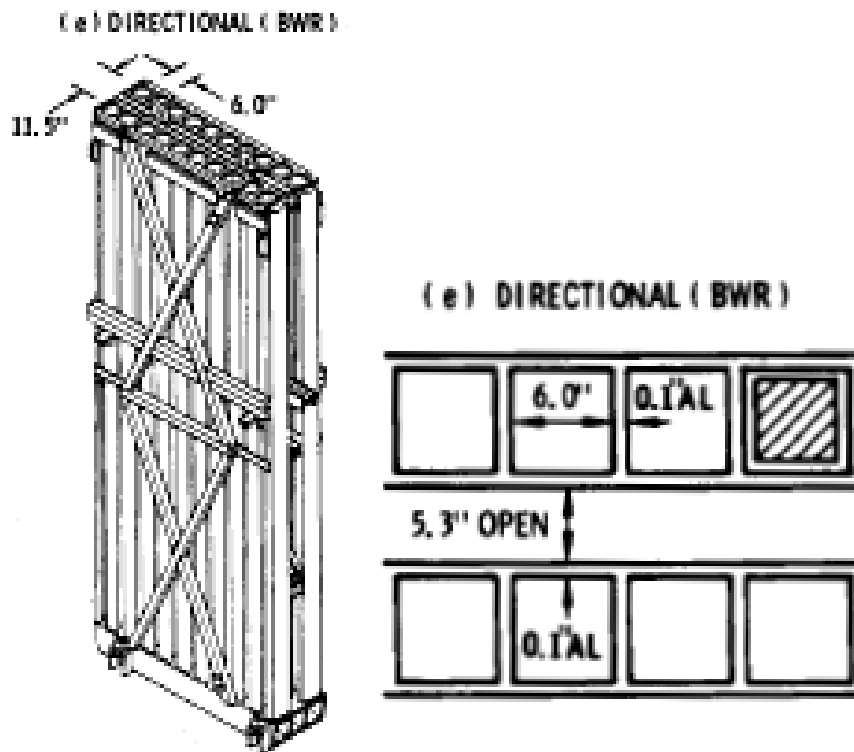


Figura 23: Tipo de bastidor seleccionado [20] .

En cuanto a la distancia existente entre los bastidores, se conoce que ésta es de **3 milímetros** (mm) [25].

3.7 Materiales de la piscina.

La piscina está construida de hormigón armado con un espesor en las paredes y suelo de **1,5 metros**. Las paredes y el suelo de la piscina poseen un revestimiento de acero inoxidable de **8 milímetros** [14] .

3.8. Tiempo de almacenamiento de los elementos combustibles.

Como se ha mencionado en la introducción, los elementos han de pasar un mínimo de 5 años almacenados bajo agua. Para este diseño se considera un tiempo de almacenamiento de los elementos combustibles de **10 años** en el interior de la piscina.

3.9 Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración considerado que cumpla con las condiciones redactadas en el punto 2.1 de la memoria es el siguiente:

Consta de cuatro líneas de extracción, idénticas entre sí, situadas en cada uno de los extremos de la piscina. De esta forma se garantizan unas condiciones de extracción homogéneas. Cada línea consta de dos bombas (denotadas por **B** en el diagrama) en paralelo que succionan el agua de la piscina a una profundidad de **4 metros** bajo la superficie de la misma, haciéndola

circular a través de dos intercambiadores también en paralelo (denotados por **HX** en el diagrama). La descarga del agua de refrigeración se realiza directamente sobre los bastidores, considerándose, para este caso, la descarga a una profundidad de **7,8 metros** sobre la parte superior de los bastidores. Las condiciones de aspiración y descarga están impuestas en los manuales de operación de Westinghouse [18] y General Electric [19]. El propósito de colocar las bombas en paralelo es que cumplan con las necesidades de caudal de la línea, que como se verá en el siguiente punto son elevados. Todos los equipos disponen de válvulas de compuerta (denotado por **V** en el diagrama de la figura 24) en los puntos de entrada y salida del fluido, con el fin de permitir la sustitución de los mismos por otros de reserva en condiciones de avería y/o mantenimiento. Además, las bombas disponen de válvulas antirretorno (**VR** en diagrama) en los puntos de impulsión como medida de seguridad.

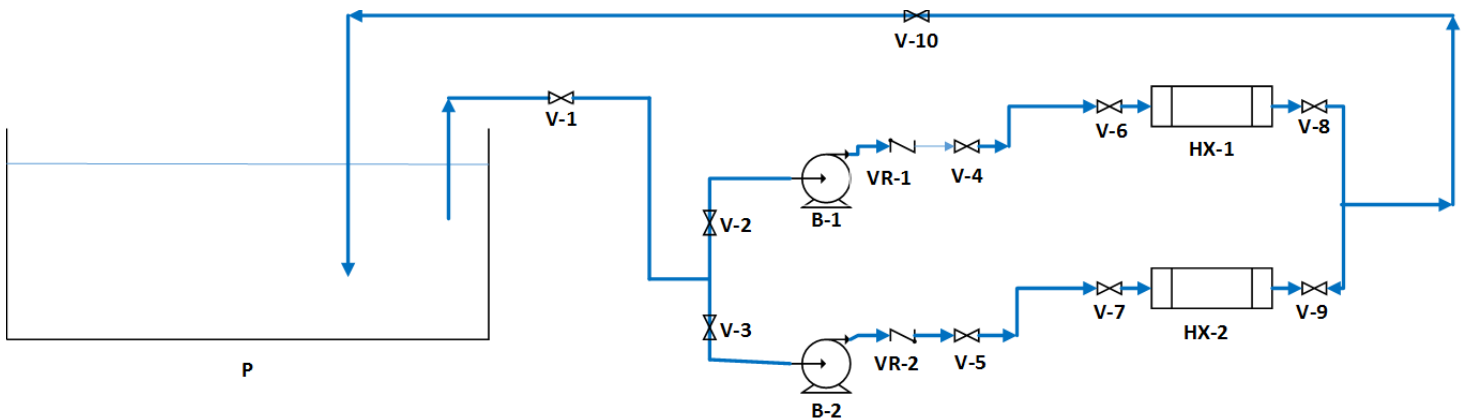


Figura 24: diagrama de flujo del sistema de refrigeración.

A continuación, se presenta la situación de las líneas en la piscina de forma esquemática (ver figura 25).

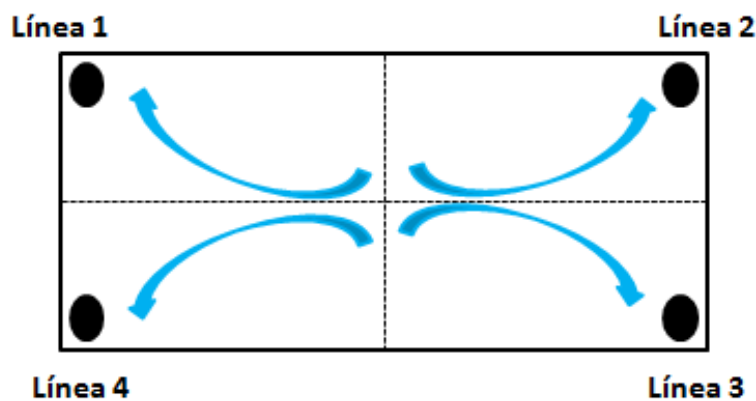


Figura 25: localización de las extracciones en la piscina.

Señalar que dichas líneas no estarán en funcionamiento en todas las condiciones de operación, pudiéndose operar con cualquiera de las cuatro para las diferentes situaciones. Dichas situaciones se consideran dependiendo de la potencia térmica a eliminar y el caudal a extraer en cada instante. Para la definición de dichas situaciones, es necesario conocer el número de elementos que pueden estar almacenados en la piscina para diferentes tiempos de operación. La capacidad de la piscina en elementos, así como el número de elementos que habrá almacenado en cada instante viene desarrollado en el siguiente apartado, donde se llevan a cabo los cálculos para la piscina. Una vez obtenidos los resultados, se consideran las situaciones de operación que se van a considerar para el diseño de los equipos de extracción de caudal y refrigeración.

3.10. Sistema de purificación.

El objetivo del sistema de purificación, tal y como se ha mencionado en el punto 2.1 de la memoria, es la eliminación de los productos de fisión liberados al agua, ya sea por difusión a lo largo de la barra de combustible o por la rotura de una de las barras

La línea de purificación consiste en una bifurcación a la salida de los intercambiadores de calor. Dicha línea está dotada de una bomba, que desvía una pequeña cantidad de agua procedente de los intercambiadores, haciéndola pasar por un filtro (denotado por **F** en el diagrama de la figura 26), seguidamente por un desmineralizador (denotado por **D** en el diagrama) y a la salida de este por un nuevo filtro. Finalmente el agua se devuelve a la piscina, descargándose directamente sobre los bastidores.

Es necesario tener una buena filtración previa al desmineralizador, de lo contrario la resina catiónica actuará como filtro de desbaste, reteniendo partículas que transporta el agua, lo que acaba por inutilizar la resina [33]. También se realiza una filtración a la salida del desmineralizador, por si el filtrado previo no hubiera sido el deseado o por si se hubiera producido el desprendimiento de resina.

El desmineralizador utilizado es de resinas HOH de lecho mixto, que elimina los productos de fisión mediante intercambio iónico, manteniendo la claridad y la pureza del agua. Dicho desmineralizador tiene la capacidad de tratar un caudal correspondiente a el volumen total de la piscina en un día [33]. Señalar que dicho lecho no es regenerable, sustituyéndose la resina gastada por una fresca cuando el lecho se agota.

La línea de purificación se instala como bifurcación en una de las cuatro líneas de refrigeración. Se realiza otra implantación en una segunda línea como medida de seguridad, por si se produjera una avería en la línea donde se encuentra el desmineralizador y los filtros. En los manuales de operación de General Electric [33], se especifica que el caudal aproximado que circula por la línea de purificación es aproximadamente un 10% del caudal que circula por la línea de refrigeración. En el apartado de cálculos se comprueba la veracidad de dicho dato.

El diagrama de flujo, considerando el sistema de purificación y refrigeración queda tal que así:

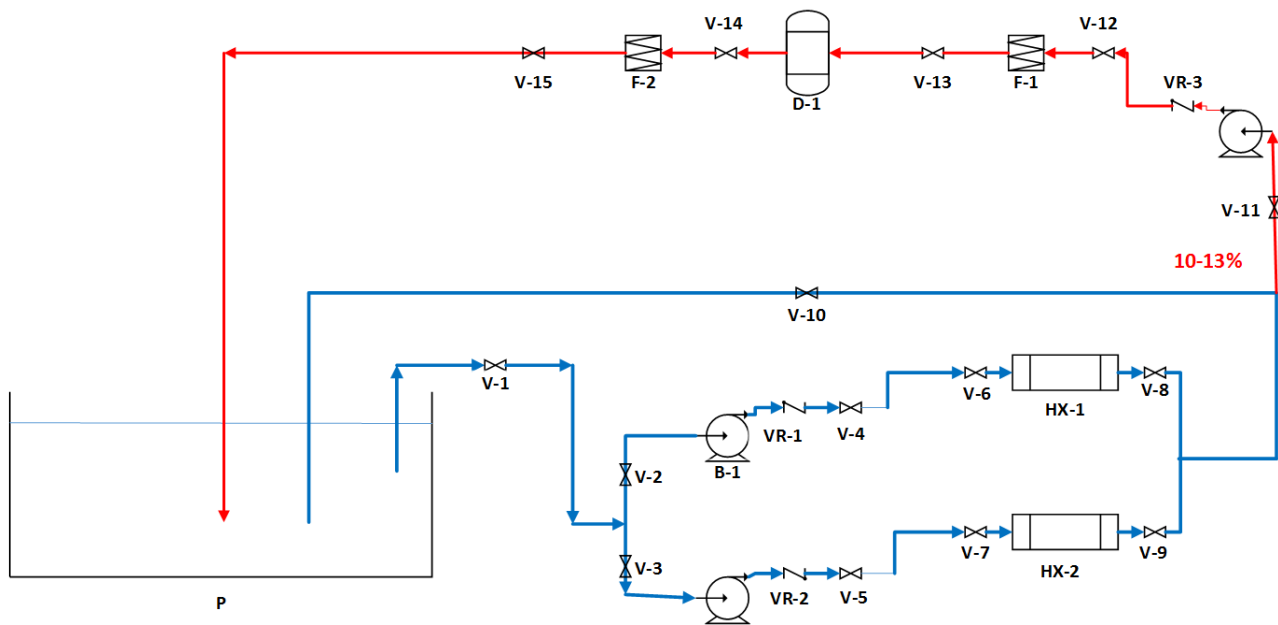


Figura 26: diagrama de flujo para los sistemas de refrigeración y purificación.

4. MODELADO FENÓMENOS DE TRANSFERENCIA.

Como se ha comentado en las bases de diseño, se va a considerar la barra como un elemento único sin revestimiento, con una longitud infinita, de dióxido de uranio en la que tiene lugar una generación volumétrica de potencia, para el caso de la transferencia de calor, y de elementos transuránicos, para el caso de la transferencia de materia. Se considera la barra como un material isótropo. Dicha generación volumétrica tiene lugar a nivel puntual en el interior de la barra, es decir, en todos los puntos de la barra existe una generación volumétrica constante. No ocurre lo mismo en el exterior de la barra, zona en contacto con el agua, donde no existe generación volumétrica, de modo que tanto el modelo como las representaciones gráficas serán diferentes para los dos casos.

En la figura 27 se adjunta una representación esquemática de cómo sería el gradiente de temperatura a lo largo de la barra de combustible y de la película en contacto con el fluido (δ), hasta igualarse finalmente a la temperatura del agua de la piscina.

Señalar que la representación sería idéntica para transferencia de materia.

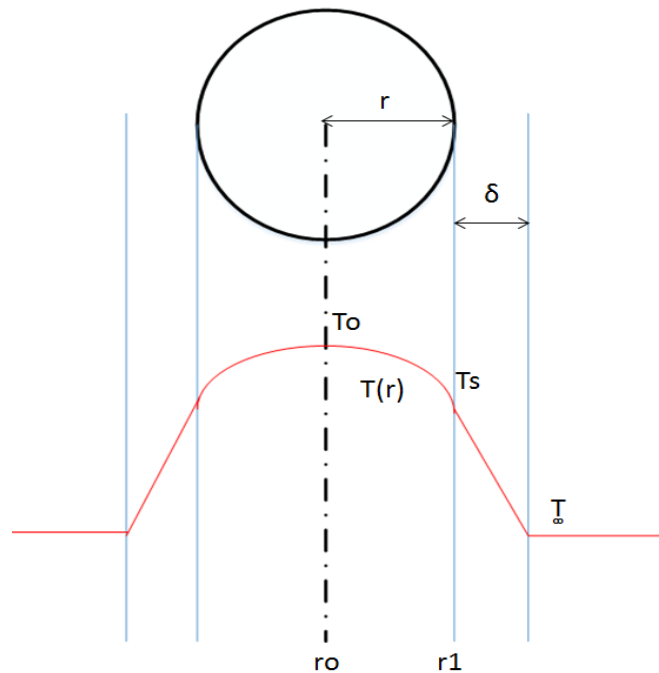


Figura 27: Gradiente de temperatura a lo largo de la barra y de la película δ .

4.1. Modelo para transferencia de calor.

En el presente apartado se lleva a cabo el modelado a partir de la ecuación de difusión calor para coordenadas cilíndricas [34].

Si se aplica un balance de energía al volumen de control de la figura 28 [34]

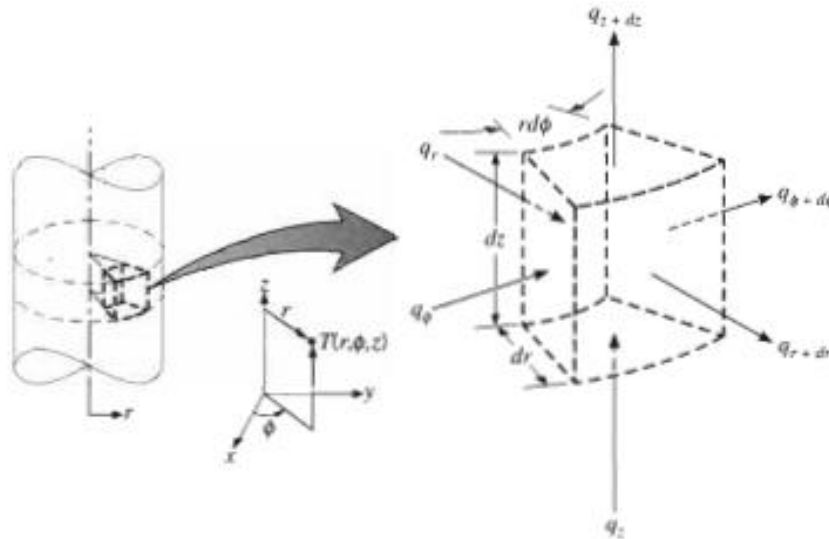


Figura 28: Volumen de control diferencial para el análisis de conducción en coordenadas cilíndricas

donde:

$$q''_r = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

$$q''_\phi = -\frac{k}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial \phi} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

$$q''_z = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Son respectivamente los componentes de flujo de calor en las direcciones radial, angular y axial [34], se obtiene la siguiente forma de general de la ecuación de calor:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \gamma = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

donde:

r: radio del cuerpo cilíndrico (m)

k : conductividad térmica del material $\left(\frac{W}{mK} \right)$

T: temperatura (°C)

γ : generación volumétrica uniforme de energía térmica $\left(\frac{W}{m^3} \right)$

ρ : densidad del material $\left(\frac{Kg}{m^3} \right)$

C_p : capacidad calorífica del material $\left(\frac{KJ}{Kg^{\circ}C}\right)$

En cuanto a $\frac{\partial T}{\partial t}$, se denomina término temporal o de acumulación, puesto que indica la acumulación de energía térmica en un volumen de control determinado. Dicha energía térmica se acumula debido a que la velocidad con que se genera energía térmica (\dot{E}_{gen}) en el sistema más la velocidad con que entra dicha energía (\dot{E}_{entra}) es mayor que la velocidad con que la energía térmica sale del sistema (\dot{E}_{sale}) [34]. Esto puede verse fácilmente con el siguiente balance en el volumen de control:

$$\dot{E}_{entra} + \dot{E}_{gen} - \dot{E}_{sale} = \dot{E}_{alm} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

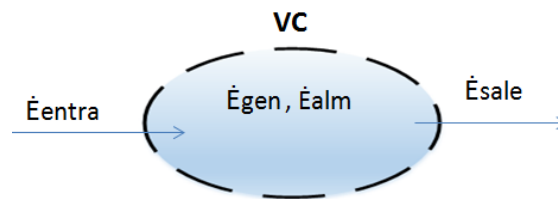


Figura 29: Balance de energía aplicado a un volumen de control.

En el caso que se va a tratar en este proyecto, puede desprejarse dicho término, puesto que se supone que toda la energía térmica que se genera en la barra se disipa rápidamente al fluido mediante convección natural, tal y como se verá más adelante.

Puesto que, como se ha dicho en el principio del apartado, la longitud de la barra es infinita y se considera que el material es isótropo, es decir, que sus propiedades no cambian con las coordenadas, se pueden desprejciar los términos azimutal y axial.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, la ecuación general (ecuación 4) queda de la forma:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \gamma = 0 \quad \text{(Ecuación 6)}$$

la cual se puede agrupar tal que,

$$r \frac{d^2 T}{dr^2} = -\frac{\gamma \cdot r}{k} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

integrando una vez se obtiene,

$$r \frac{dT}{dr} = -\frac{\gamma \cdot r^2}{2 \cdot k} + C1 \quad \text{(Ecuación 8)}$$

donde C1 es una constante de integración que se pretende eliminar.

Si se integra la ecuación anterior de nuevo se tiene,

$$T(r) = -\frac{\gamma \cdot r^2}{4 \cdot k} + C1 \cdot \ln(r) + C2 \quad \text{(Ecuación 9)}$$

Al igual que para el caso anterior, C2 es una constante a eliminar.

Si aplicamos la condición de eje de simetría a la ecuación 8, se tiene que $\frac{dT}{dr} = 0$, por lo que $C1=0$.

Evaluando ahora en $r=r_1$ (ver figura 1), se tiene que $T(r)=T_s$ (siendo T_s la temperatura de la superficie). Aplicando dicha condición a la ecuación 9, se tiene que $C2 = T_s + \frac{\gamma \cdot r_1^2}{4 \cdot k}$.

Introduciendo el valor de las constantes en la ecuación 9 y reordenando se tiene lo siguiente:

$$T(r) - T_s = \frac{\gamma \cdot r_1^2}{4 \cdot k} \left(1 - \frac{r^2}{r_1^2} \right) \quad \text{(Ecuación 10)}$$

Ahora bien, en la superficie de barra el calor se transfiere al fluido por convección. La ecuación de flujo de calor por convección por unidad de longitud de barra es la siguiente:

$$\frac{q_{cv}}{L} = h2\pi r_1(T_s - T_\infty) \quad \text{(Ecuación 11)}$$

donde:

h: coeficiente convectivo $\left(\frac{W}{m^2K} \right)$

r_1 : radio evaluado en la superficie de la barra (m)

T_∞ : temperatura del fluido ($^\circ\text{C}$)

Señalar de nuevo que se está considerando una barra de longitud infinita, luego se trabaja por unidad de longitud.

Si se observan las ecuaciones 10 y 11, puede verse que ambas tienen el término correspondiente a la temperatura de la superficie. Despejando dicho término de ambas ecuaciones se tiene:

$$T_s = T(r) + \frac{\gamma \cdot r_1^2}{4 \cdot k} \left(\frac{r^2}{r_1^2} - 1 \right) \quad \text{(Ecuación 12)}$$

$$T_s = \frac{q'_{cv}}{h2\pi r_1} + T_\infty \quad \text{(Ecuación 13)}$$

siendo q'_{cv} el flujo de calor de convección por unidad de longitud.

Si se reflexiona, puede llegarse a la conclusión de que el término de flujo de calor por convección es función de la generación volumétrica de energía térmica.

.

Esto puede verse fácilmente atendiendo a la figura 30.

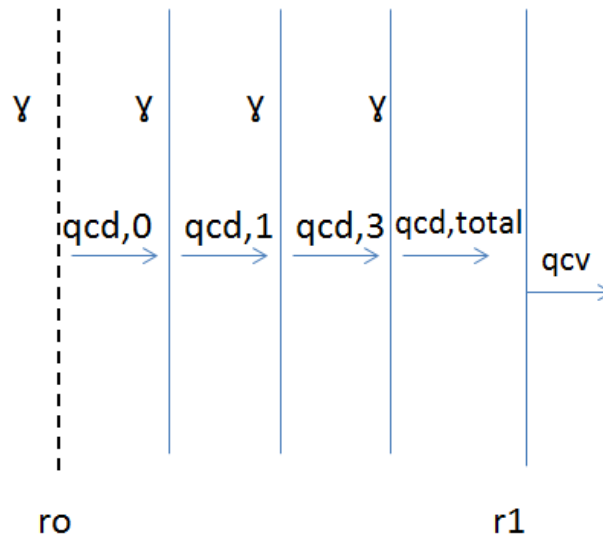


Figura 30: Avance del flujo de calor por conducción a través de diferentes puntos en el interior de la barra.

La generación volumétrica es constante en todos los puntos de la barra. Dicha generación de energía térmica es un fenómeno independiente de la temperatura, depende exclusivamente de la desintegración de radionucleidos. Haciendo un balance de energía en cada punto (tener presente ecuación 5) y despreciando el término de acumulación, se pueden determinar fácilmente los términos de conducción intermedios.

La potencia que llega a la superficie debido a la conducción interna se disipa al fluido por convección natural. Dicha conducción, denotada en la figura como $q_{cd,total}$, se calcula como:

$$q'_{cd,total} = \int_{r_0}^{r_1} \gamma 2 \pi r dr \quad \text{(Ecuación 14)}$$

que a su vez es igual al calor de convección en la superficie.

Vuelve a hacerse hincapié en que dicha potencia es por unidad de longitud, puesto que la barra es infinita.

Resolviendo dicha integral e introduciendo el resultado en la ecuación 13 (sabiendo que $q'_{cd,total} = q'_{cv}$), se tiene la siguiente ecuación:

$$T_s = \frac{\gamma}{2} \cdot \frac{r_1^2 - r_0^2}{hr_1} + T_\infty \quad \text{(Ecuación 15)}$$

donde, $r_0 = 0$.

Ahora se está en condiciones de igualar las ecuaciones 15 y 12. Al reagrupar todos los términos y sacar factor común, se obtiene la siguiente ecuación:

$$T(r) - T_\infty = \frac{\gamma}{4kh} [2kr_1 + r_1^2 h - r^2 h] \quad \text{(Ecuación 16)}$$

Si se evalúa la ecuación 16 en $r=0$, la temperatura $T(r)$ coincide con la temperatura máxima de la barra (ver figura 1). La ecuación anterior, haciendo uso de dicha condición de contorno quedaría de la forma:

$$T_{max} - T_{\infty} = \frac{\gamma}{4kh} [2kr_1 + r_1^2 h] \quad \text{(Ecuación 17)}$$

Por último, si se divide la ecuación 16 por la 17, quedaría una expresión tal que así:

$$\frac{T(r)-T_{\infty}}{T_{max}-T_{\infty}} = \frac{2kr_1+r_1^2 h-r^2 h}{2kr_1+r_1^2 h} \quad \text{(Ecuación 18)}$$

Llamando theta a el cociente de temperaturas, se tiene el primer número adimensional:

$$\theta = \frac{T(r)-T_{\infty}}{T_{max}-T_{\infty}} \quad \text{(Ecuación 19)}$$

Si se reagrupa el segundo miembro de la ecuación 18, se puede ver claramente que se tiene un término constante y un término dependiente del radio, r .

$$\theta = \frac{2kr_1+r_1^2 h}{2kr_1+r_1^2 h} - \frac{h}{2kr_1+r_1^2 h} r^2 \quad \text{(Ecuación 20)}$$

Se denota al término independiente del radio **B**, y al término que multiplica al radio **A**, el cual puede descomponerse de forma más simplificada de la forma: $A = \frac{1}{\left[\frac{2k}{r_1 h} + 1\right]} \cdot \frac{1}{r_1^2}$.

Donde,

$$\sigma = \frac{1}{\left[\frac{2k}{r_1 h} + 1\right]} \quad \text{(Ecuación 21)}$$

Además, puede verse claramente en la ecuación 20 que **B=1**.

Finalmente, teniendo esto en cuenta, se llega a la ecuación objetivo. El modelo quedaría tal que así:

$$\theta = 1 - \sigma \xi^2 \quad \text{(Ecuación 22)}$$

Donde,

$$\xi = \frac{r}{r_1}$$

Puede comprobarse que todos los términos de la ecuación 22 son adimensionales.

Las condiciones de contorno del modelo obtenido son las siguientes:

1. Si $\xi = 0$, $r=0$, de modo que $\theta = 1$. Lo que significa que $T(r)=T_{max}$
2. Si $\xi = 1$, $r=r_1$, de modo que $\theta = \theta_s$. Lo que significa que $T(r)=T_s$
3. Si $\xi = 1 + \frac{\delta}{r_1}$, $r=r_2$, de modo que $\theta = 0$. Lo que significa que $T(r)=T_{\infty}$

La condición 3 no es válida para la película de líquido, puesto que en esa zona no hay generación de energía térmica. Por tanto, el modelo anterior (ecuación 22) es válido únicamente para las dos primeras condiciones, es decir, $\forall \xi \in [0, 1]$.

Los valores de σ oscilan entre 0 y 1. La justificación es la siguiente:

- Si $\sigma > 1$, se obtienen valores de $\theta < 0$, lo cual no resulta lógico, pues significaría que la barra en lugar de enfriarse se calentaría, ya que $T(r) < T_\infty$.
- Si $\sigma < 0$, no tiene sentido, ya que $\sigma = f(h, k)$. No resulta lógico que las propiedades del fluido y material sean negativas.

Se sabe que cuando $\xi = 1 + \frac{\delta}{r_1}$, $\theta = 0$. De modo que: $\xi = \sqrt{\frac{1}{\sigma}}$. Además, se ha comentado previamente que $\xi = \frac{r}{r_1}$.

Por tanto, para diferentes valores a sigma, se obtienen diferentes valores de θ , que varían en función del radio o, lo que es lo mismo, en función de ξ .

Como se ha dicho anteriormente, se necesita construir un modelo válido para $\xi > 1$. En el que no existe generación de energía térmica, de modo que para valores de $\xi > 1$, la curva será diferente.

Dicho modelo tiene que cumplir las siguientes condiciones de contorno:

1. Si $\xi = 1$, $r=r_1$, de modo que $\theta = \theta_s$. Lo que significa que $T(r)=T_s$
2. Si $\xi = 1 + \frac{\delta_T}{r_1}$, $r=r_2$, de modo que $\theta = 0$. Lo que significa que $T(r)= T_\infty$

Se puede calcular una pendiente que cumpla dichas condiciones y, por tanto una ordenada en el origen. Haciendo cálculos se obtiene que:

$$\alpha = -\frac{\theta_s}{\delta_T} r_1 \quad \text{(Ecuación 23)}$$

$$\beta = \frac{\theta_s}{\delta_T} r_1 \cdot \left(1 + \frac{\delta_T}{r_1}\right) \quad \text{(Ecuación 24)}$$

donde,

α : pendiente de la recta

β :ordenada en el origen de la recta

δ_T : espesor de la película de líquido para transporte de calor (m)

Para el cálculo real de el espesor de la película de líquido se hace uso de la siguiente ecuación [35]:

$$h = \frac{k_{agua}}{\delta_T} \quad \text{(Ecuación 25)}$$

Donde,

k_{agua} : conductividad térmica del agua $\left(\frac{W}{mK}\right)$

Puede comprobarse que el valor de dicha película es menor que para el caso no real.

Definido todo lo anterior, el nuevo modelo para la película queda tal que así:

$$\theta = -\alpha\xi + \beta \quad \text{(Ecuación 26)}$$

4.2. Modelo para transferencia de materia.

Para el caso de transferencia de materia, al igual que para el caso anterior, se parte de la ecuación de difusión de materia para coordenadas cilíndricas. Dicha ecuación es la siguiente [34]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{AB} r \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial z} \right) + \lambda = \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad \text{(Ecuación 27)}$$

donde:

D_{AB} : Difusividad de elementos transuránicos (A) en dióxido de uranio (B) $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

C_A : Concentración de elementos transuránicos $\left(\frac{mol}{m^3}\right)$

λ : Generación volumétrica de elementos transuránicos $\left(\frac{mol}{m^3s}\right)$

Puede apreciarse que la ecuación anterior es análoga a la ecuación de difusión de calor (ecuación 4).

Como ya se hizo para transferencia de calor, puesto que se considera material isótropo y longitud de barra infinita, los términos azimutal y axial pueden ser despreciados. Sin embargo, ¿ocurre lo mismo con el término temporal o de acumulación?. Esto vuelve a discutirse en el punto 6.2 de la memoria.

Para responder a dicha cuestión, ha de conocerse cuán rápido se difunden los radionucleidos o elementos transuránicos a lo largo de la barra para, finalmente, ser liberados al agua por difusión convectiva.

Para que el término temporal pueda despreciarse, es decir, se pueda asumir que no hay acumulación de radionucleidos en la barra, se debe de cumplir que la cantidad de radionucleidos generados por unidad de volumen de barra se disipen inmediatamente hacia el exterior. Puede hacerse un análisis análogo al que se hizo para transferencia de calor.

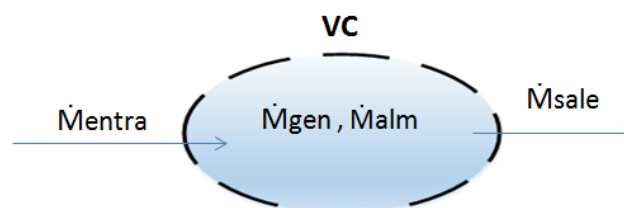


Figura 31: Conservación de especies en un volumen de control.

Donde \dot{M}_{entra} , \dot{M}_{sale} , \dot{M}_{gen} y \dot{M}_{alm} son las velocidades con las que entran, salen, se generan y acumulan radionucleidos respectivamente. Aplicando la ecuación de conservación de especies se obtiene:

$$\dot{M}_{entra} + \dot{M}_{gen} - \dot{M}_{sale} = \dot{M}_{alm} \quad \text{(Ecuación 28)}$$

El fenómeno de difusión molecular está fuertemente influenciado por el espacio intermolecular [34], de modo que es mayor en gases que en líquidos y a su vez mucho mayor que en sólidos. En la figura 32 [34], se adjuntan valores de difusividad para el caso de gases, líquidos y sólidos. Puede apreciarse lo que se acaba de comentar, la difusividad en sólidos es muy pequeña si se compara con gases o líquidos.

Substance A	Substance B	T (K)	D_{AB} (m ² /s)
Gases			
NH ₃	Air	298	0.28×10^{-4}
H ₂ O	Air	298	0.26×10^{-4}
CO ₂	Air	298	0.16×10^{-4}
H ₂	Air	298	0.41×10^{-4}
O ₂	Air	298	0.21×10^{-4}
Acetone	Air	273	0.11×10^{-4}
Benzene	Air	298	0.88×10^{-5}
Naphthalene	Air	300	0.62×10^{-5}
Ar	N ₂	293	0.19×10^{-4}
H ₂	O ₂	273	0.70×10^{-4}
H ₂	N ₂	273	0.68×10^{-4}
H ₂	CO ₂	273	0.55×10^{-4}
CO ₂	N ₂	293	0.16×10^{-4}
CO ₂	O ₂	273	0.14×10^{-4}
O ₂	N ₂	273	0.18×10^{-4}
Dilute Solutions			
Caffeine	H ₂ O	298	0.63×10^{-9}
Ethanol	H ₂ O	298	0.12×10^{-8}
Glucose	H ₂ O	298	0.69×10^{-9}
Glycerol	H ₂ O	298	0.94×10^{-9}
Acetone	H ₂ O	298	0.13×10^{-8}
CO ₂	H ₂ O	298	0.20×10^{-8}
O ₂	H ₂ O	298	0.24×10^{-8}
H ₂	H ₂ O	298	0.63×10^{-8}
N ₂	H ₂ O	298	0.26×10^{-8}
Solids			
O ₂	Rubber	298	0.21×10^{-9}
N ₂	Rubber	298	0.15×10^{-9}
CO ₂	Rubber	298	0.11×10^{-9}
He	SiO ₂	293	0.4×10^{-13}
H ₂	Fe	293	0.26×10^{-12}
Cd	Cu	293	0.27×10^{-18}
Al	Cu	293	0.13×10^{-33}

Figura 32: Difusividades para diferentes especies [34].

Dicho esto, a diferencia del caso de transferencia de calor, no sería correcto despreciar el término de acumulación, puesto que la velocidad con que se transfieren radionucleidos al exterior será, en la mayoría de los casos, inferior a la velocidad de generación.

Por tanto, a medida que el tiempo aumenta se tienen diferentes perfiles de concentración, tanto en el interior de la barra como en la película de fluido. Es lógico que tenga lugar una disminución de la concentración con el tiempo, ya que a medida que este aumenta, más tiempo lleva la barra liberando radionucleidos y, por tanto, menos quedan en su interior.

Esto puede apreciarse en la figura 33.

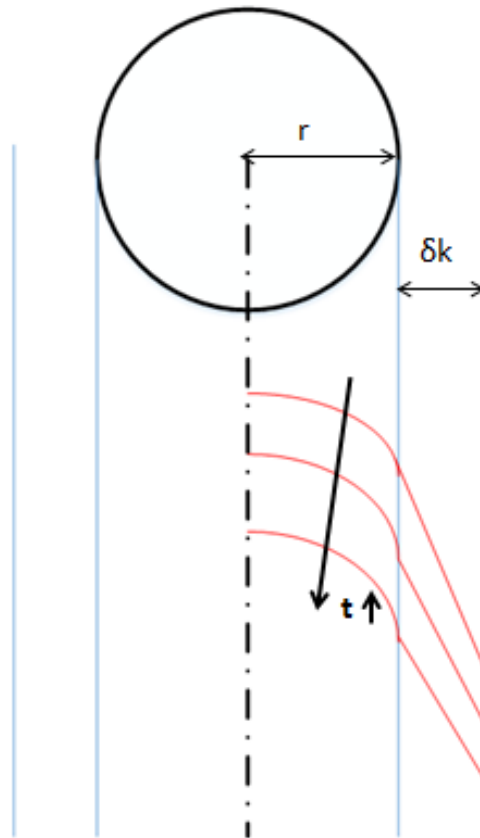


Figura 33: gradiente de concentración a medida que avanza el tiempo.

Una vez aclarado lo anterior, se procede a adimensionalizar la ecuación 27. Despreciando los términos azimutal y axial, desarrollando el término correspondiente a la variación de la concentración con el radio y sacando como factor común la difusividad, se tiene:

$$\frac{dC_A}{dr} + r \frac{d^2C_A}{dr^2} + \frac{\lambda r}{D_{AB}} = \frac{r}{D_{AB}} \frac{dC_A}{dt} \quad \text{(Ecuación 29)}$$

Dicha ecuación puede adimensionalizarse imponiendo los siguientes números adimensionales:

$$\Omega = \frac{C_A}{C_{A0}} \quad \text{(Ecuación 30)}$$

$$\xi = \frac{r}{r_1} \quad \text{(Ecuación 31)}$$

donde,

C_{A0} : Concentración en el instante inicial $\left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}\right)$

Sustituyendo los términos anteriores en la ecuación 29 y sacando factor común C_{A0} , la ecuación queda:

$$\frac{d\Omega}{d\xi} + \xi \frac{d^2\Omega}{d\xi^2} + \xi \frac{r_1^2 \lambda}{D_{AB} C_{A0}} = \xi \frac{r_1^2}{D_{AB}} \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{(Ecuación 32)}$$

Puede apreciarse que los dos miembros de la ecuación 32 son adimensionales. Se agrupan los términos constantes de la forma:

$$\varphi = \frac{r_1^2 \lambda}{D_{AB} C_{A0}} \quad \text{(Ecuación 33)}$$

$$\mu = \frac{r_1^2}{D_{AB}} \quad \text{(Ecuación 34)}$$

Finalmente, sustituyendo en la ecuación 32 se obtiene la siguiente expresión adimensional:

$$\frac{d\Omega}{d\xi} + \xi \frac{d^2\Omega}{d\xi^2} + \xi\varphi = \xi\mu \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{(Ecuación 35)}$$

En la ecuación anterior se pueden presentar dos situaciones límite:

1. $\mu = 0$. Lo que significa que el término temporal se desprecia, produciéndose una situación análoga a lo visto en transferencia de calor.
2. $\mu \neq 0$. De modo que no puede despreciarse el término temporal, teniendo lugar una acumulación de radionucleidos en el interior de la barra.

En cuanto a la situación 1, ¿cuándo tendría lugar?. Para que $\mu = 0$, tiene que cumplirse alguno de los siguientes casos:

- Valores de r_1 muy bajos. Resulta lógico, pues si el radio es muy pequeño la distancia que los radionucleidos han de recorrer hasta estar en contacto con el fluido será despreciable, de modo que se puede asumir, sin cometer un gran error, que los radionucleidos generados en la barra se disipan instantáneamente hacia el agua.
- Valores de D_{AB} muy elevados. Si la difusividad es muy elevada, la facilidad con la que los elementos transuránicos se difunden a través del sólido es alta. De este modo, alcanzarán la superficie en un intervalo de tiempo pequeño, pudiéndose despreciar el término de acumulación.

A continuación, se estudia el primer caso límite. Para el caso en el que no se desprecia el término temporal no se va a realizar modelado, debido a la complejidad de la ecuación 32. Sin embargo, se estudia (en el apartado de resultados) si existe la posibilidad de despreciar el término temporal.

Este caso es análogo al de transferencia de calor, puesto que no se tiene en cuenta la variable temporal.

Desarrollando la ecuación 32 de forma análoga a lo que se ha hecho en transferencia de calor queda:

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi \frac{\partial \Omega}{\partial \xi} \right) = \frac{-\lambda r_1^2}{C_{A0} D_{AB}} \xi \quad \text{(Ecuación 36)}$$

integrando una vez se obtiene:

$$\xi \frac{\partial \Omega}{\partial \xi} = \frac{-\lambda r_1^2}{2C_{A0} D_{AB}} \xi^2 + C1 \quad \text{(Ecuación 37)}$$

siendo C_1 una constante de integración que se pretende eliminar. Para ello se aplica la condición de simetría en el eje, por la que para $r=0$ y por tanto, $\xi = 0$, $\frac{\partial \Omega}{\partial \xi} = 0$. De esta forma se obtiene que **$C_1=0$** .

Integrando de nuevo la ecuación anterior se obtiene la siguiente expresión:

$$\Omega = \frac{-\lambda r_1^2}{4C_{A0}D_{AB}} \xi^2 + C_2 \quad \text{(Ecuación 38)}$$

Siendo C_2 otra constante de integración a eliminar. Se evalúa la ecuación para $\xi = 1$, donde $\Omega = \Omega_s$. De forma que $C_2 = \Omega_s + \frac{\lambda r_1^2}{4C_{A0}D_{AB}}$, de forma que la ecuación 38 queda:

$$\Omega = \frac{\lambda r_1^2}{4C_{A0}D_{AB}} (1 - \xi^2) + \Omega_s \quad \text{(Ecuación 39)}$$

Por otro lado, al igual que se hizo en transferencia de calor, se sabe que la velocidad de flujo en la superficie (por unidad de longitud) es igual a la velocidad de flujo que sale por convección. La velocidad de flujo que sale por convección por unidad de longitud (barra infinita) se define como:

$$N_A = 2\pi r_1 k_L (C_{As} - C_{A\infty}) \quad \text{(Ecuación 40)}$$

donde:

k_L : coeficiente convectivo de transferencia de materia a través de la fase fluida $\left(\frac{m}{s}\right)$

Dicha velocidad de flujo en la superficie es igual a la suma de todos los flujos conductivos a lo largo de la barra:

$$N_{ATOTAL} = \int_0^{r_1} \lambda 2\pi r dr \quad \text{(Ecuación 41)}$$

Si se iguala la ecuación 41 a la ecuación 40, se introduce el número adimensional Ω y se despeja Ω_s se llega a la siguiente ecuación:

$$\Omega_s = \frac{\lambda r_1}{2k_L C_{A0}} + \Omega_{-\infty} \quad \text{(Ecuación 42)}$$

si se despeja Ω_s de la ecuación 39 y se iguala a la ecuación 42 puede seguirse el procedimiento llevado a cabo para transferencia de calor, tras el que agrupar se llega a la expresión:

$$\Omega - \Omega_{-\infty} = \frac{\lambda r_1}{4C_{A0}D_{AB}k_L} [2D_{AB} + r_1 k_L - r_1 k_L \xi^2] \quad \text{(Ecuación 43)}$$

Evaluando para $\xi = 0$, se tiene que $\Omega = \Omega_{max}$. La ecuación anterior evaluada en dicho punto queda:

$$\Omega_{max} - \Omega_{-\infty} = \frac{\lambda r_1}{4C_{A0}D_{AB}k_L} [2D_{AB} + r_1 k_L] \quad \text{(Ecuación 44)}$$

Dividiendo la ecuación 43 por la ecuación 44 se obtiene:

$$\frac{\Omega - \Omega_{\infty}}{\Omega_{max} - \Omega_{\infty}} = \frac{2D_{AB} + r_1 k_L - r_1 k_L \xi^2}{2D_{AB} + r_1 k_L} = \Omega' \quad \text{(Ecuación 45)}$$

Desarrollando la ecuación anterior y agrupando términos tal y como se hizo en el apartado anterior, se llega a el siguiente modelo adimensional:

$$\Omega' = 1 - \varepsilon \xi^2 \quad \text{(Ecuación 46)}$$

Donde:

$$\varepsilon = \frac{1}{\left(\frac{2D_{AB}}{r_1 k_L} + 1\right)} \quad \text{(Ecuación 47)}$$

Obsérvese que el modelo obtenido es análogo al desarrollado para transferencia de calor.

Las condiciones de contorno del modelo obtenido son las siguientes:

1. Si $\xi = 0$, $r=0$, de modo que $\Omega = 1$. Lo que significa que $C_A(r) = C_{Amax}$
2. Si $\xi = 1$, $r=r_1$, de modo que $\Omega = \Omega_s$. Lo que significa que $C_A(r) = C_{As}$
3. Si $\xi = 1 + \delta$, $r=r_2$, de modo que $\Omega = 0$. Lo que significa que $C_A(r) = C_{A\infty}$

Ya se ha mencionado anteriormente que $C_{A\infty} = 0$. La condición 3 no es válida para la película de líquido, puesto que en esa zona no hay generación volumétrica de elementos transuránicos. Por tanto, el modelo anterior (ecuación 46) es válido únicamente para las dos primeras condiciones, es decir, $\forall \xi \in [0, 1]$.

Del mismo modo que para el caso de transferencia de calor, se le asignan valores a ε entre cero y uno, siendo la justificación la misma que para el término adimensional σ en transferencia de calor. Para dichos valores, se calculan los valores correspondientes de ξ .

Para valores de $\xi > 1$, se necesita un modelo nuevo que se adapte al caso de que no exista generación volumétrica de radionucleidos.

Dicho modelo tiene que cumplir las siguientes condiciones de contorno:

1. Si $\xi = 1$, $r=r_1$, de modo que $\Omega = \Omega_s$. Lo que significa que $C_A(r) = C_{As}$
2. Si $\xi = 1 + \frac{\delta k}{r_1}$, $r=r_2$, de modo que $\Omega = 0$. Lo que significa que $C_A(r) = C_{A\infty}$

Se puede calcular una pendiente que cumpla dichas condiciones y, por tanto una ordenada en el origen. Haciendo cálculos se obtiene que:

$$m = -\frac{\Omega_s}{\delta_K} r_1 \quad \text{(Ecuación 48)}$$

$$b = \frac{\Omega_s}{\delta_K} r_1 \cdot \left(1 + \frac{\delta_K}{r_1}\right) \quad \text{(Ecuación 49)}$$

donde,

m : pendiente de la recta

b : ordenada en el origen de la recta

δ_K : espesor de la película de líquido para transporte de masa (m)

Para el cálculo real de el espesor de la película de líquido se hace uso de la siguiente ecuación [35]:

$$k_L = \frac{D_{AB}}{\delta_K} \quad \text{(Ecuación 50)}$$

Definido todo lo anterior, el nuevo modelo para la película queda tal que así:

$$\Omega' = -m\xi + b \quad \text{(Ecuación 51)}$$

5. CÁLCULOS.

5.1. Dimensiones de la piscina y capacidad de almacenamiento.

Teniendo en cuenta las bases de diseño impuestas para el cálculo de las dimensiones de la piscina (punto 3.6 de la memoria), se llevan a cabo los cálculos necesarios para el dimensionamiento de la misma.

Conociendo la capacidad del núcleo y la fracción del núcleo descargada en cada ciclo, puede calcularse los elementos de combustible gastado recibidos por la piscina cada ciclo de descarga:

$$\text{Elementos recibidos cada ciclo} = \text{elementos núcleo} \cdot \text{fracción descargada} \quad \text{(Ecuación 52)}$$

Aplicando la ecuación anterior a los datos considerados se obtiene que:

$$\text{Elementos recibidos cada ciclo} = 624 \left(\frac{\text{elementos}}{\text{núcleo}} \right) \cdot \frac{1}{3} (\text{núcleo}) = \mathbf{208 \text{ elementos}}$$

Se ha impuesto que la capacidad deseada de la piscina es de 4 núcleos, de modo que los elementos a almacenar por la piscina pueden calcularse de la forma:

$$\text{Capacidad piscina} = \text{número de núcleos} \cdot \text{elementos núcleo} \quad \text{(Ecuación 53)}$$

Dicho esto, puede calcularse que:

$$\text{capacidad piscina} = 624 \left(\frac{\text{elementos}}{\text{núcleo}} \right) \cdot 4 (\text{núcleos}) = \mathbf{2496 \text{ elementos}}$$

Lo siguiente sería calcular el número de bastidores necesarios. Esto puede calcularse conociendo el número de elementos a almacenar y el tipo de bastidor, en concreto el número de celdas que contiene dicho bastidor (20 celdas para el caso seleccionado en punto 3.6)

$$N^{\circ} \text{ de bastidores} = \frac{\text{número elementos piscina}}{\text{numero celdas por bastidor}} \quad \text{(Ecuación 54)}$$

Para el tipo de bastidores seleccionados, *direccional*, se obtiene:

$$N^{\circ} \text{ de bastidores} = \frac{2496 (\text{elementos})}{20 \left(\frac{\text{celdas}}{\text{bastidor}} \right)} = \mathbf{125 \text{ bastidores}}$$

Conociendo las dimensiones de las celdas, el espesor de las mismas, la distancia libre entre filas y/o columnas y el número, puede determinarse el ancho y el largo del bastidor de forma sencilla. Es recomendable tener presente la figura 23 del punto 3.3. No existe una ecuación genérica para estos cálculos, pero puede determinarse fácilmente conociendo las dimensiones. Los cálculos de las ecuaciones 55 y 56 son específicos para el tipo de bastidor seleccionado. Señalar que 1 pulgada corresponde a 0,025 metros: $1'' = \mathbf{0,025 \text{ m}}$.

$$\text{Ancho bastidor} = (0,00245 \cdot 4) + (2 \cdot 0,15) + 0,13 = \mathbf{0,44016 \text{ m}}$$

Todas las dimensiones necesarias para los cálculos serán recogidas posteriormente en tablas.

$$\text{Largo bastidor} = (0,00245 \cdot 11) + (10 \cdot 0,15) = \mathbf{1,52794 \text{ m}}$$

Conociendo lo anterior y sabiendo que la superficie ocupada por el tipo de bastidores seleccionados es rectangular, puede determinarse fácilmente la superficie ocupada por un bastidor, así como la superficie ocupada por el número total de bastidores:

$$\text{Superficie ocupada bastidor} = \text{ancho bastidor} \cdot \text{largo bastidor} \quad (\text{Ecuación 55})$$

$$\text{Superficie ocupada total} = \text{superficie bastidor} \cdot \text{número bastidores} \quad (\text{Ecuación 56})$$

Sustituyendo los valores correspondientes en las ecuaciones 55 y 56 se obtiene que:

$$\text{Superficie ocupada bastidor} = 0,67254 \text{ m}$$

$$\text{Superficie ocupada total} = 83,93275 \text{ m}$$

Se selecciona una forma rectangular para la piscina. Sabiendo esto, es necesario asignar una disposición en forma de matriz rectangular para la colocación de los bastidores en la piscina.

En este caso, se ha optado por seleccionar una disposición tal que haya **16 bastidores a lo ancho** y **8 bastidores a lo largo** o, traducido en número de celdas, 32 celdas a lo ancho y 80 celdas a lo largo. Esto equivale a 128 bastidores, frente a los 125 necesarios calculados anteriormente, por lo que se tiene un sobredimensionamiento de 3 bastidores.

Teniendo en cuenta lo anterior, puede calcularse el ancho de la piscina de forma genérica como:

$$\begin{aligned} \text{Ancho piscina} = & \\ & (\text{bastidores ancho} \cdot \text{ancho bastidor}) + [(n - 1) \cdot \text{separación entre bastidores}] + \\ & (2 \cdot \text{separación bastidor y pared}) \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 57})$$

Donde,

n: número de bastidores a lo ancho

Sustituyendo los resultados obtenidos anteriormente y teniendo en cuenta las bases de diseño fijadas al principio de este punto se obtiene que:

$$\text{Ancho piscina} = 7,88756 \text{ m}$$

Para el caso del largo de la piscina se usa la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Largo piscina} = & \\ & (\text{bastidores largo} \cdot \text{largo bastidor}) + [(n - 1) \cdot \text{separación entre bastidores}] + \\ & (2 \cdot \text{separación bastidor y pared}) \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 58})$$

Donde,

n: número de bastidores a lo largo

Sustituyendo se obtiene:

Largo piscina = 13,04452 m

Por último se calcula el alto de la piscina como teniendo en cuenta la altura de los bastidores, el nivel de agua sobre los bastidores (8 m) y el espacio libre entre los bastidores y el suelo (0,4 m). Dicho esto, se obtiene una altura de la piscina de:

Alto piscina = 4,2 + 8 + 0,4 = 12,6 m

A modo de resumen, se adjunta la tabla 5 donde se recogen las bases de diseño y resultados obtenidos:

	BWR
Elementos núcleo	624
Ciclo descarga (meses)	24
cantidad núcleo descargada por ciclo	1/3
Elementos recibidos por la piscina cada ciclo	208
Capacidad piscina (núcleos)	4
Capacidad piscina (elementos)	2496
Tipo Bastidor	Directional
Geometría caras celdas bastidor	Cuadrada
Tipo de superficie ocupada por bastidor	Rectangular
Distribución celdas	2x10
NºCeldas/bastidor	20
Nº bastidores	125
Separación entre los centros de las celdas (m)	0,29
Dimensión cara celda (Lado o Diámetro) (m)	0,15
Distancia libre entre celdas (m)	0,13
Espesor celda (m)	2,54E-3
Ancho bastidor (m)	0,4402
Largo bastidor (m)	1,5279
Superficie ocupada bastidor (m²)	0,6725
Superficie ocupada total bastidores (m²)	83,9328
Forma Piscina	Rectangular
Bastidores a lo ancho	16
Bastidores a lo largo	8
Capacidad piscina (bastidores)	128
Separación entre bastidores (m)	0,003
Distancia entre bastidores, paredes y suelo (m)	0,4
Ancho piscina (m)	7,8876
Largo piscina (m)	13,0445
Superficie ocupada por la piscina (m²)	102,8894
Altura bastidores (m)	4,2
Nivel agua sobre bastidores (m)	8
Altura Piscina (m)	12,6

Tabla 5: resultados obtenidos para las dimensiones de la piscina.

Para determinar qué posiciones de la piscina estarán ocupadas en cada momento, es necesario tener en cuenta los ciclos de descarga y el tiempo de almacenamiento de los elementos en las piscinas, impuestos como bases de cálculo en el apartado anterior. En cuanto a las posiciones ocupadas durante el período de operación, pueden estimarse de la siguiente forma: El tiempo medio que pasan los elementos combustibles en la piscina es de 10 años, lo que equivale a 120 meses. Se ha impuesto que los ciclos de descarga, para el caso seleccionado son de 24 meses.

Dicho esto puede decirse que cada 24 meses, 208 elementos pasarán a ocupar 208 celdas dentro de la piscina.

A medida que se llevan a cabo las descargas, el tiempo de los elementos combustibles almacenados incrementa en 24 meses. Para que 208 elementos que han sido almacenados puedan ser reemplazados han de darse 5 ciclos de descarga, que es equivalente a 120 meses. En dicho instante, los elementos recién descargados del núcleo no pasarán a ocupar nuevas celdas, sino que serán introducidos en las posiciones donde se encontraban los elementos que ya han cumplido 120 meses de enfriamiento.

Este proceso puede verse de forma esquemática en la siguiente figura:

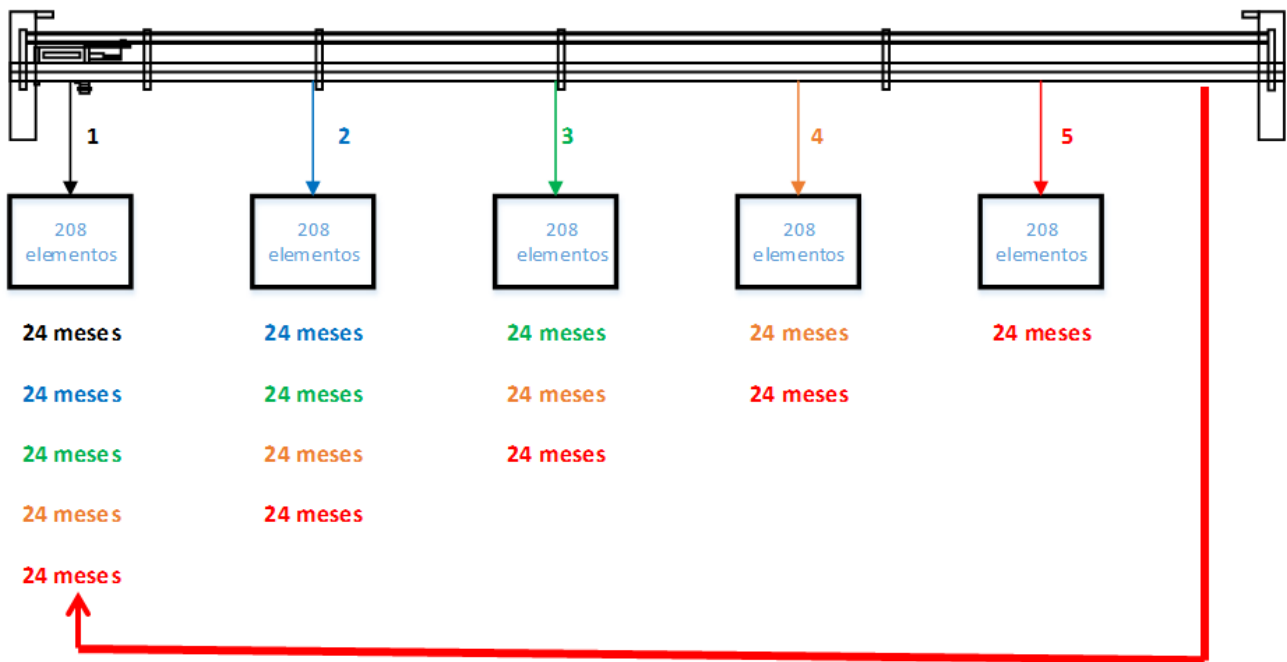


Figura 34: Proceso de sustitución de bastidores con el tiempo.

De este modo, puede calcularse el número de elementos almacenados en la piscina en condiciones normales de operación. Sería válido para el caso en el que todos los elementos combustibles pasasen un período de 10 años en las piscinas. Para el caso en el que el tiempo varíe, habría que rehacer los cálculos siguiendo el mismo procedimiento.

Dicho esto, el número de celdas ocupadas en la piscina es de:

$$\text{Celdas ocupadas} = 208 \cdot 5 = \mathbf{1040 \text{ celdas}}$$

En cualquier caso debe de haber un número de posiciones libres para el caso en el que tenga que descargarse un núcleo completo, independientemente del número de elementos almacenados en la piscina [14]. Para las condiciones seleccionadas, un núcleo completo equivale a 624 posiciones.

Por tanto, en el caso de que todos los elementos se enfríen durante un período de 10 años, el número máximo de celdas ocupadas sería de 1040 celdas. Teniendo en cuenta que en todo instante han de existir posiciones disponibles para la descarga completa de un núcleo, se tiene un total de 624 posiciones reservadas, que no deben de ser ocupadas. Para los cálculos llevados a cabo en el punto anterior, se ha obtenido una piscina con una capacidad para **2560 posiciones**, frente a las 2496 necesarias, teniéndose un sobredimensionamiento de 64 posiciones.

En la figura 35 se representa la ocupación de la piscina para las condiciones descritas. En verde, las posiciones ocupadas para el período de enfriamiento y ciclos de descarga establecidos (1040 posiciones). En rojo, las posiciones reservadas para la descarga completa de un núcleo (624 posiciones). En blanco las posiciones libres, que se resultan de restar a la capacidad total (2560) las posiciones reservadas al núcleo del reactor y las ocupadas (1040), obteniéndose 896 posiciones libres.

Este sobredimensionamiento resulta útil para el caso en el que aumente el tiempo de residencia en la piscina, ya que el número de celdas en verde aumentaría.

En el caso de que las condiciones sean tales que pueda producirse la saturación de la piscina puede llevarse a cabo la sustitución de los bastidores por otros de tipo más compacto. Esta técnica se denomina **reracking** y ha sido descrita en punto 1.4 de la memoria.

A continuación se adjunta la vista de la piscina de forma esquemática, con las posiciones descritas anteriormente y las dimensiones calculadas, así como los espesores del hormigón armado y del revestimiento de acero inoxidable.

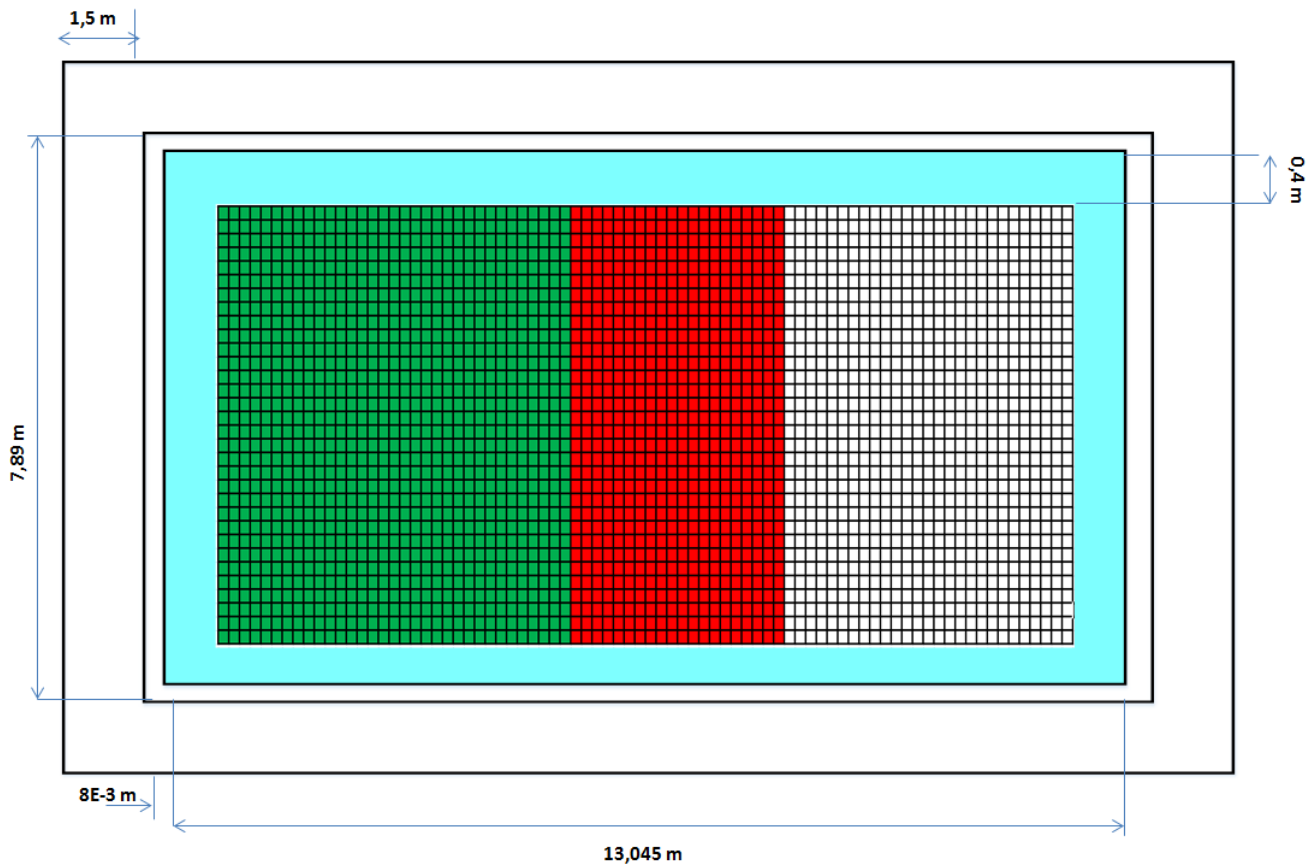


Figura 35: Dimensiones de la piscina y grado de ocupación de la misma.

5.2 Diferentes situaciones de extracción para el sistema de refrigeración.

Una vez se conoce la capacidad que tiene la piscina para almacenar elementos combustibles y los ciclos de descarga de los mismos, se consideran dos situaciones, una situación límite de emergencia y una situación nominal de operación. El diseño del sistema de refrigeración ha de ser tal que mantenga la piscina en condiciones seguras para ambas situaciones.

5.2.1. Situación 1.

En la piscina hay un total de 1040 elementos almacenados (cada uno de los cuales lleva almacenado un tiempo mínimo de dos años, ver punto anterior) y se produce una descarga del núcleo completo por una emergencia en el reactor.

En esta situación, la potencia disipada por los elementos combustibles que llevan almacenados un mínimo de 2 años es de: $1040 \text{ elementos} \times 40 \frac{\text{KW}}{\text{elemento}} = 41.600 \text{ Kw}$.

Para el caso de un núcleo completo (624 elementos), la potencia disipada por todo el núcleo en el momento de la descarga es de: $624 \text{ elementos} \times 120 \frac{\text{KW}}{\text{elemento}} = 74.880 \text{ Kw}$.

Por tanto, se tiene que el sistema de refrigeración ha de disipar una potencia total de:

$$P_{\text{Total}} = 41.600 + 74.880 = \mathbf{116.480 \text{ Kw}}$$

Dicha potencia corresponde con la disipada en un día de operación en las condiciones descritas.

Para esta situación, se tendrían las cuatro líneas descritas en el punto 3.8 de la memoria funcionando (ver figura 25). Por tanto, para esta situación se dispone de un total de 8 intercambiadores de calor y 8 bombas en funcionamiento, que corresponden a una pareja de intercambiadores y bombas por línea.

Cada línea trabaja en las mismas condiciones, de modo que la potencia que disipa cada intercambiador es:

$$P_{\text{intercambiador}} = \frac{116.480}{8} = \mathbf{14.560 \text{ Kw}}$$

Además de lo anterior, se conoce el intervalo de temperatura en el que ha de trabajar la piscina. El intervalo seleccionado es $T[16 - 60]^{\circ}\text{C}$. Las condiciones han de mantenerse tales que en ningún caso se sobrepase la temperatura de 60°C .

Conociendo el intervalo de temperaturas y la potencia a disipar se puede calcular, mediante un balance de energía en el intercambiador, el caudal de agua procedente de la piscina que ha de circular por el interior del equipo. Dicho caudal se corresponde con el caudal impulsado por las bombas. Para ello se hace uso de la siguiente ecuación:

$$Potencia_{\text{térmica}} = F \cdot C_p \cdot \Delta T \quad \text{(Ecuación 59)}$$

Donde,

F: caudal másico $\left(\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right)$

C_p: Capacidad calorífica del fluido, evaluado a la temperatura media de película $\left(\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}\cdot\text{K}}\right)$

ΔT : gradiente de temperaturas del fluido caliente ($^{\circ}\text{C}$)

La temperatura media correspondiente al intervalo seleccionado es: $T_m = \frac{60+16}{2} = 38^{\circ}\text{C}$, a la cual le corresponde un valor de capacidad calorífica de: $C_p = 4,174 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}\cdot\text{K}}$.

Conociendo todo lo anterior y haciendo uso de la ecuación 1, se obtiene un caudal másico de:

$$F = \frac{14.560}{4,18 \cdot (60-16)} = 79,16 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

que puede pasarse a caudal volumétrico $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)$ sabiendo que la densidad del agua a esas condiciones de temperatura es $\rho = 992,4 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ y que a una hora le corresponden 3600 segundos. Haciendo dicha conversión se obtiene:

$$Q_{\text{bomba}} = 287,16 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Dicho caudal se corresponde con el impulsado por cada bomba en paralelo, de modo que el caudal total extraído por una línea es el caudal impulsado por las dos bombas, es decir, se extrae un caudal por cada línea de:

$$Q_{\text{línea}} = 575,18 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

5.2.2. Situación 2.

Esta situación es considerada como la situación nominal de operación. Se trata de una situación normal de operación en la piscina, a diferencia del caso anterior en el que se producía la descarga del núcleo como emergencia en el reactor. En este caso se tiene un total de 1040 elementos combustibles, cada uno de los cuales lleva un mínimo de dos años almacenado en la piscina.

En esta situación, la potencia total a disipar por el sistema de refrigeración es de: $1040 \text{ elementos} \times 40 \frac{\text{KW}}{\text{elemento}} = 41.600 \text{ Kw}$.

Puesto que la potencia total es mucho inferior a la situación anterior, no es necesario que haya cuatro líneas operativas. En este caso bastaría con tener 2 líneas en operación y otras dos líneas en modo de reserva. El esquema propuesto es el siguiente:

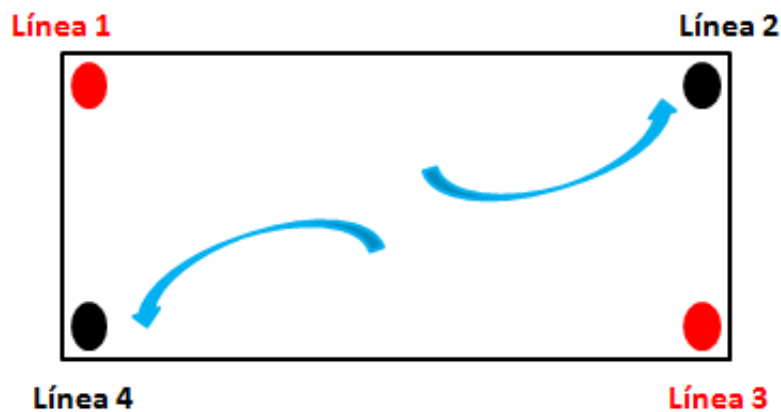


Figura 36: Localización de las extracciones para la situación 2.

Dicha configuración asegura que la extracción del agua de la piscina sea homogénea.

Puesto que en cada línea existen dos intercambiadores, se tiene un total de cuatro intercambiadores operativos. Por tanto, la potencia a disipar por cada intercambiador es de:

$$P_{\text{intercambiador}} = \frac{41.600}{4} = 10.400 \text{ Kw}$$

Llevando a cabo el mismo procedimiento que para la situación anterior, se obtiene un caudal impulsado por cada bomba de:

$$Q_{\text{bomba}} = 205,42 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Puesto que se dispone de dos líneas operativas, en cada una de las cuales hay dos bombas en paralelo, el caudal a extraer por línea es de:

$$Q_{\text{línea}} = 410,84 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

En cuanto a los equipos de intercambio de calor, se seleccionan unos intercambiadores de placas con una potencia máxima de 20.000 KW. Se ha seleccionado este tipo de intercambiadores por ser más compactos que los de carcasas y tubo. La hoja de especificaciones se adjunta como anexo.

5.2.3. Cálculos en la línea hidráulica.

Una vez conocidos los caudales a extraer por cada una de las líneas en las dos situaciones consideradas, se llevan a cabo los cálculos necesarios en la línea hidráulica, que serán útiles para determinar el tipo de bombas a utilizar.

Conocido el caudal a impulsar por cada bomba, calculado en el apartado anterior para las dos situaciones consideradas, se calcula la altura que da cada bomba. Al estar en paralelo, ambas bombas dan la misma altura.

Para obtener dicho cálculo, se aplica la ecuación de Bernouilli entre dos puntos determinados (A y B).

Dicha ecuación tiene la siguiente forma [36]:

$$\frac{P_A}{\rho} + gZ_A + \frac{U_A^2}{2} + \Delta H = \frac{P_B}{\rho} + gZ_B + \frac{U_B^2}{2} + hf_{AB} \quad \text{(Ecuación 60)}$$

Donde,

P_A : presión del punto A (Pa)

P_B : presión del punto B (Pa)

g : constante de aceleración de la gravedad, $9,8 \left(\frac{\text{m}^2}{\text{h}}\right)$

Z_A : cota del punto A (m)

Z_B : cota del punto B (m)

U_A : velocidad del fluido en el punto A $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$

U_B : velocidad del fluido en el punto B $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$

hf_{AB} : término correspondiente a las pérdidas de carga de la línea $\left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}\right)$

ΔH : altura desarrollada por la bomba $\left(\frac{m^2}{s^2}\right)$

Las pérdidas de carga de la línea se determinan a partir de las longitudes equivalentes de los accesorios instalados en la misma, haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$hf_{AB} = 4f \cdot \frac{L_{TR} + \Sigma L_{eq}}{D} \cdot \frac{U^2}{2} \quad \text{(Ecuación 61)}$$

Donde,

4f: termino de fricción

L_{TR} : longitud de tramo recto de tubería (m)

ΣL_{eq} : sumatorio de las longitudes equivalentes de todos los dispositivos (m)

D: diámetro de la tubería (m)

Para aplicar Bernoulli han de situarse los puntos A y B en el diagrama de flujo de la figura 38. Además, para los cálculos de la pérdida de carga, se divide la línea en varios tramos.

Se calcula la pérdida de carga para los tramos que se indican en la figura. Puesto que las bombas están colocadas en paralelo y todos los elementos (válvulas e intercambiadores) colocados en la aspiración e impulsión de las bombas son idénticos, puede aplicarse simetría.

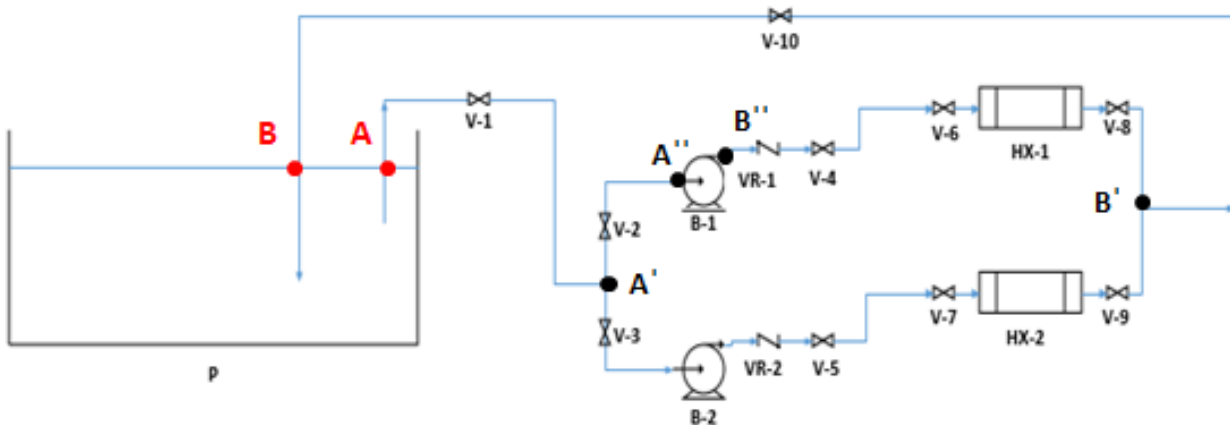


Figura 37:Tramos seleccionados para el cálculo de las pérdidas en la línea.

De acuerdo con la colocación de los puntos A y B, la ecuación de Bernoulli (ecuación 60) puede simplificarse teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- La velocidades de descenso del fluido en los puntos A y B pueden considerarse cero, pues en todo instante el nivel de agua en la piscina es constante.
- Los puntos A y B se encuentran a la misma cota.
- Las presiones A y B son iguales a la atmosférica.

Comentado esto, la ecuación 60 se simplifica, quedando tal que así:

$$\Delta H = hf_{AB} \quad \text{(Ecuación 62)}$$

Antes de comenzar con los cálculos de las pérdidas en las líneas, es necesario determinar un diámetro de tuberías. Se impone una velocidad del fluido y se calcula el diámetro de tubería correspondiente a los valores de caudal para la **situación 1 (situación de emergencia)**. El diámetro obtenido será el diámetro de diseño de las 4 líneas.

Conociendo los datos de caudal volumétrico (apartado anterior) y velocidad del fluido, puede determinarse el diámetro para una tubería circular haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{Bomba}} = U \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{int}}^2 \quad \text{(Ecuación 63)}$$

Para que las velocidades en los tramos y los diámetros sean lo más considerables posible, se va a trabajar con dos diámetros de tubería. Puesto que en los tramos **A-A'** y **B'-B**, los caudales que circulan por las tuberías son el doble que para los tramos con bombas, se impone una velocidad de fluido de $2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ para los tramos sin bombas, es decir, los tramos **A-A'** y **B'-B** y una velocidad de fluido de $1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ para los tramos con bombas. El diámetro obtenido para los tramos **A-A'** y **B'-B** es el siguiente:

$$D_{\text{int}} = 0,32 \text{ m}$$

Para el caso de los tramos con bombas, se obtiene:

$$D_{\text{int}} = 0,26 \text{ m}$$

Si se buscan dichos diámetros en la norma ASTM para tuberías de acero inoxidable, se comprueba que los diámetros disponibles son ligeramente diferentes. En la siguiente tabla se adjuntan los diámetros disponibles que más se aproximan a los obtenidos:

Diámetro nominal (pulgadas)	Diámetro exterior (mm)	Diámetro interior (mm)
10	273,05	260,35
14	355,60	333,40

Tabla 6: diámetros para tuberías de acero inoxidable disponibles en ASTM.

Por tanto, ajustando las velocidades a esos nuevos diámetros, se obtiene una velocidad del fluido para los tramos **A-A'** y **B'-B** de: $U=1,93 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Para los tramos sin bombas, la velocidad correspondiente al diámetro normalizado es de: $U=1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

En la siguiente figura [36] puede comprobarse que las velocidades obtenidas para los diámetros seleccionados se encuentran dentro de los límites.

TABLA 8.1. Velocidades típicas de líquidos en tuberías de acero (m/s)

	$D \leq 2''$	$3'' < D < 10''$	$10'' < D < 20''$
Agua			
Succión bomba.....	0,3-0,6	0,6-1,2	1 -2
Descarga bomba	0,5-1	1 -1,5	1,2-2
Alimentación caldera ...	1,2-3	1,5-3,5	2,5-4,2
Desagües	1 -1,2	1 -1,5	—
Hidrocarburos líquidos (viscosidad normal)			
Succión bomba.....	0,5-0,75	0,6-1,2	1 -2
Desagües	1 -1,2	1 -1,5	—

Figura 38: velocidades típicas de líquidos en tuberías de acero [34].

Más adelante, durante el cálculo de las pérdidas de carga, ha de tenerse en cuenta la pérdida que proporcionan los ensanchamientos y estrechamientos de las tuberías.

Para poder calcular las pérdidas de la línea, haciendo uso de la ecuación 61, queda por determinar el término de fricción, las longitudes equivalentes de los accesorios y los tramos de tubería recta.

El término $4f$, se determina haciendo uso del ábaco de Moody. En dicho ábaco (ver figura 39 [36]) el término de fricción depende directamente del término de rugosidad relativa:

El coeficiente de rugosidad relativa, $\frac{\epsilon}{D}$, depende del material de la tubería y del diámetro

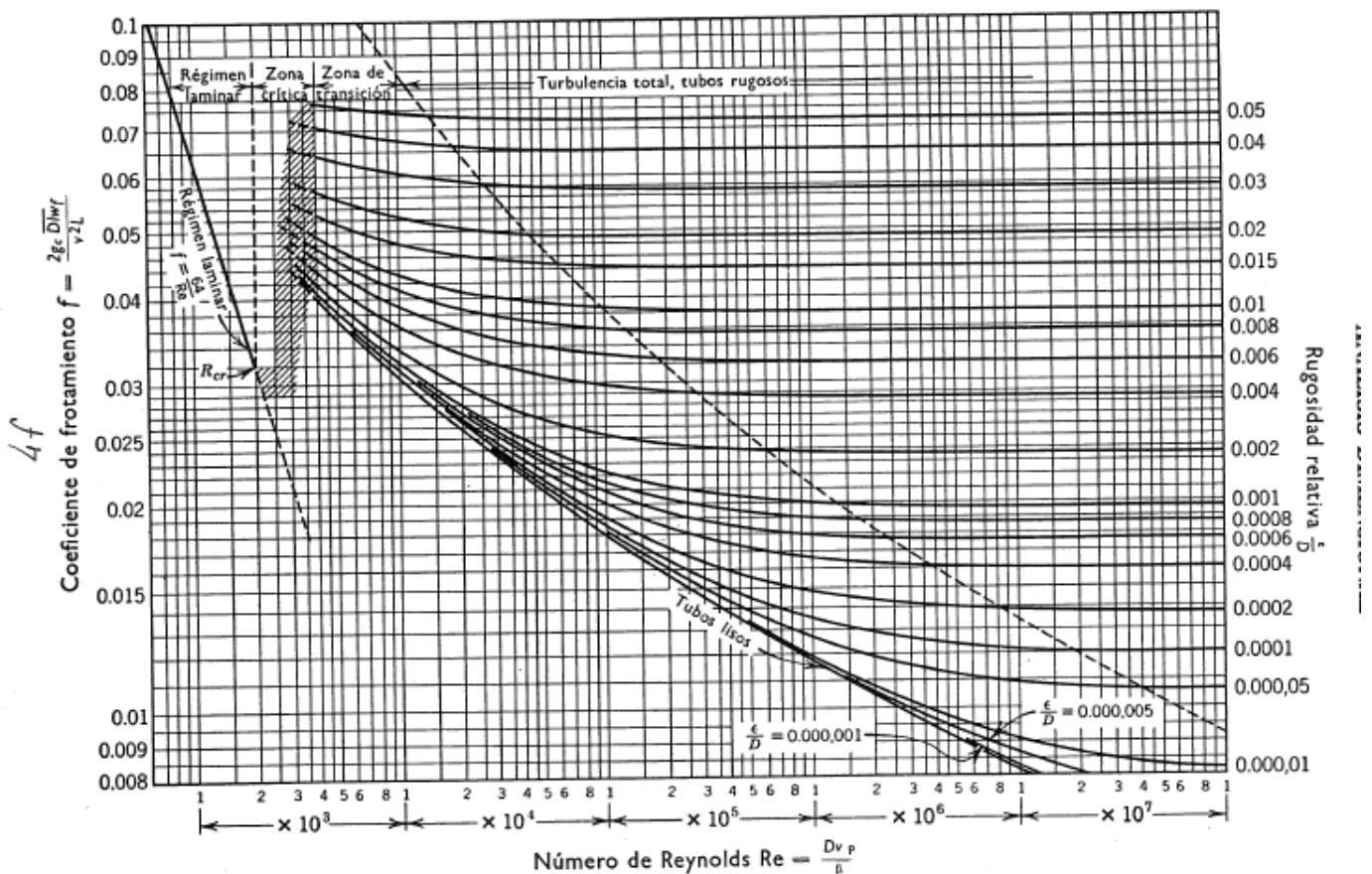


Figura 39: coeficiente $4f$ en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa del tubo [34].

interno de la misma (ver figura 40 [36]). Para cada tramo se tiene un diámetro diferente, de modo que se obtienen diferentes valores de rugosidad relativa y, por tanto, de coeficiente de fricción. El tipo de material seleccionado para entrar en la figura 40 es aceros comerciales.

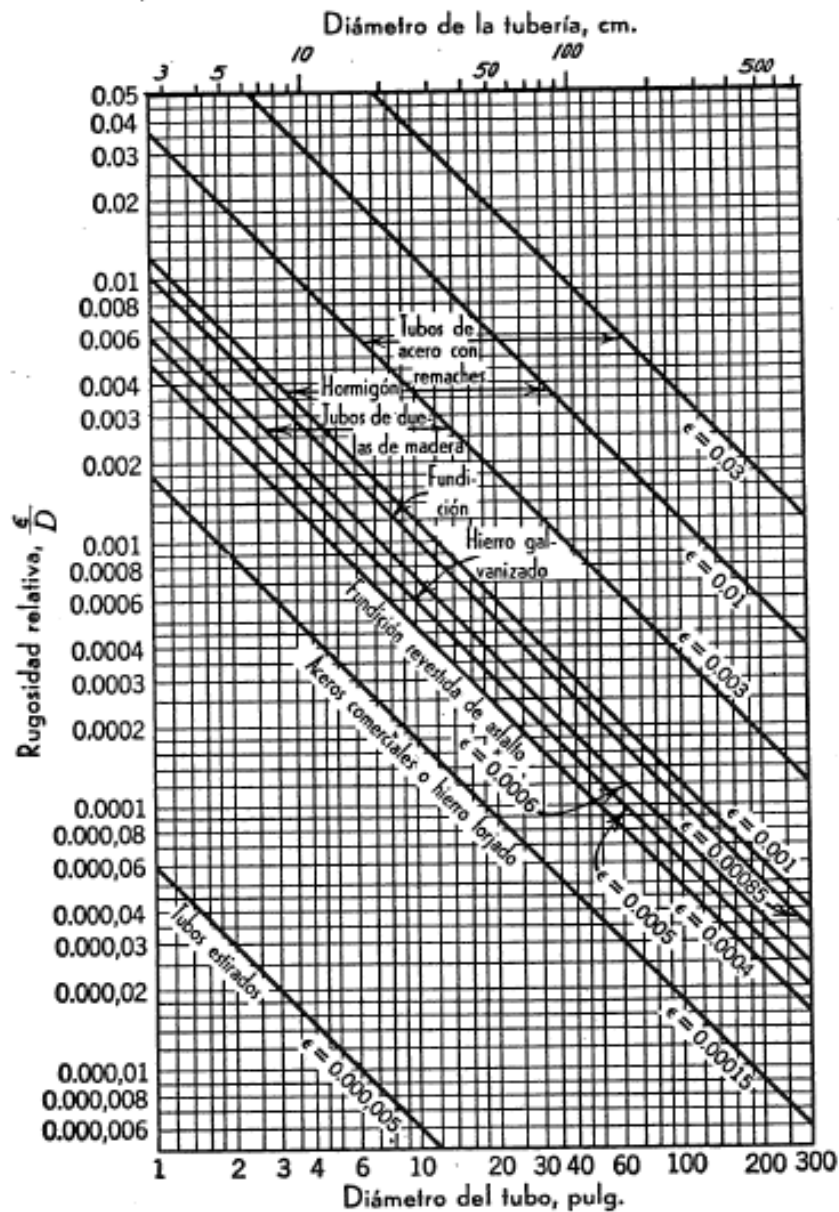


Figura 40: valores del coeficiente de rugosidad relativa para diferentes diámetros y materiales [36].

Para el cálculo de los valores de longitudes equivalentes se hace uso de un nomograma, en el que aparecen diferentes valores de longitud equivalente para distintos accesorios y diámetros de tubería. Los accesorios utilizados son los que aparecen en el diagrama de flujo de las figura 24.

En la figura 41 [36] se adjunta el nomograma utilizado y en la tabla 7 los valores correspondientes de longitudes equivalentes para los distintos accesorios.

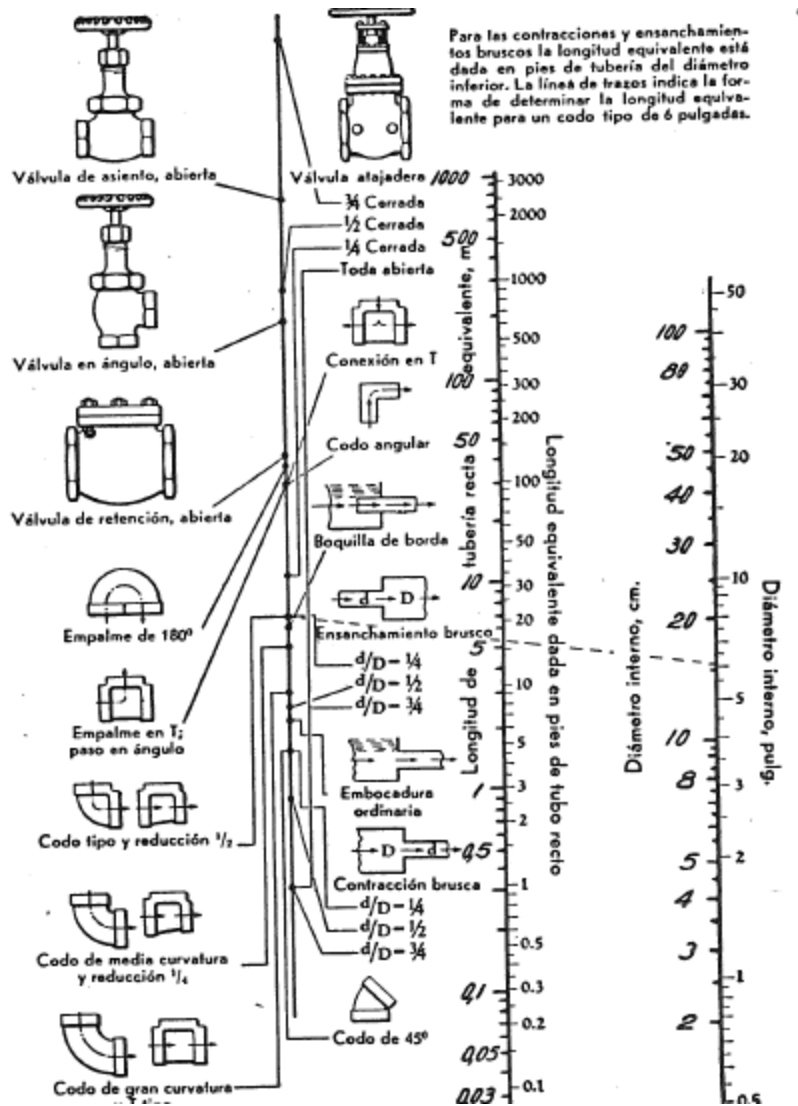


Figura 41: nomograma utilizado para el cálculo de las pérdidas de longitudes equivalentes [34].

	Longitudes equivalentes (m)	
	D=26,04 cm	D=32,5 cm
Codo tipo	9	11
Válvula compuerta	2	2,5
Válvula retención	20	-
Boquilla de borda	-	10
Contracción brusca	2	-
Ensanchamiento brusco	-	2,5

Tabla 7 :valores de longitudes equivalentes para diferentes accesorios y diámetros.

Se asume un valor de pérdida de carga para los intercambiadores de calor de **70 Kpa [37]**. Para pasar dicho valor a las unidades de energía por unidad de masa ($\frac{J}{Kg}$ o $\frac{m^2}{s^2}$), basta con pasar dicho valor a pascales y dividir por la densidad del fluido. De este modo se obtiene una pérdida de carga de **$70 \frac{m^2}{s^2}$** .

En la siguiente tabla se adjuntan los resultados obtenidos. Destacar que los valores de $4f$ y de $\frac{\epsilon}{D}$ son diferentes para los dos diámetros utilizados. Los valores de longitud para tramos rectos se han estimado teniendo en cuenta las dimensiones del edificio de combustible.

Situación 1					
Tramo	Ltramo(m)	Leq (m)	ϵ/D	$4f$	hf (m ² /s ²)
A-A'	12	35,5	0,00015	0,012	3,51
A'-A''	2	13	0,0002	0,014	0,91
B''-B'	4,5	53	0,0002	0,014	73,48
B'-B	24,3	38	0,00015	0,012	4,60

Tabla 8: resultados obtenidos de pérdida de carga para los distintos tramos de la situación 1

Por tanto, la pérdida de carga total corresponde a la suma de los valores obtenidos en la tabla:

$$hf_{AB} = 82,5 \frac{m^2}{s^2}$$

De modo que haciendo uso de la ecuación 61, la altura total desarrollada por la bomba es de:

$$\Delta H = 82,5 \frac{m^2}{s^2}$$

Conociendo el valor del caudal volumétrico de las bombas para la **situación 1** (ver punto anterior) y dividiendo el valor obtenido de ΔH por la aceleración de la gravedad ($9,8 \frac{m}{s^2}$), para obtener la altura en metros, se obtiene que el **punto de funcionamiento** de todas las bombas (ya que todas las líneas son idénticas) **para la situación 1** es:

$$Q_{bomba} = 287,16 \frac{m^3}{h}$$

$$\Delta H = 8,42 \text{ m}$$

Para el caso de la situación 2 (ver figura 36), en el que permanecen en funcionamiento 2 de las 4 líneas, los cálculos para las pérdidas de carga se realizan de forma idéntica a la situación 1.

En este caso, las velocidades de los fluidos por los distintos tramos difieren de la situación anterior, puesto que los caudales de extracción son menores, manteniéndose el diámetro calculado anteriormente.

Para el cálculo de dichas velocidades, se hace uso de la ecuación 63, en la que todo es conocido excepto la velocidad.

Para los tramos **A-A'** y **B-B**, se obtiene lo siguiente:

$$v = \frac{\left(\frac{410,84}{3600}\right)}{\frac{\pi \cdot 0,325^2}{4}} = 1,38 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para los tramos con bombas, el caudal se reduce a la mitad obteniéndose y el diámetro de la tubería es más pequeño:

$$v = \frac{\left(\frac{205,42}{3600}\right)}{\frac{\pi \cdot 0,26^2}{4}} = 1,07 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

A partir de aquí se sigue el mismo procedimiento que para la situación anterior. En las tablas 9 y 10 se adjuntan los resultados obtenidos para esta situación. Señalar que los valores de longitud para tramos rectos y longitudes equivalentes son idénticos al caso anterior, ya que todas las líneas son iguales y tienen el mismo número de elementos. Del mismo modo ocurre con los valores de coeficiente de fricción y rugosidad relativa, ya que los diámetros de tuberías son idénticos en todas las líneas. El único parámetro que varía es la velocidad, que influye directamente en el valor de pérdidas en la línea.

	Situación 2
Pot térmica elemento (KW)	40
Nº elementos	1040
Pot térmica total (KW)	41600
Nº extracciones	2
Pot intercambiador (KW)	10400
Caudal másico bomba (Kg/s)	56,63
Caudal volumétrico bomba (m3/s)	205,42
Caudal volumétrico línea (m3/s)	410,84
Diámetro interior tubería sin bombas (m)	0,325
Diámetro interior tubería con bombas (m)	0,26
Velocidad tramo sin bombas (m/s)	1,38
Velocidad tramo con bombas (m/s)	1,075

Tabla 9: resultados obtenidos para la situación 2.

Situación 2					
Tramo	Ltramo(m)	Leq (m)	ϵ/D	4f	hf (m ² /s ²)
A-A'	12	35,5	0,00015	0,012	1,66
A'-A''	2	13	0,0002	0,014	0,40
B''-B'	4,5	53	0,0002	0,014	71,79
B'-B	24,3	38	0,00015	0,012	2,18

Tabla 10: resultados obtenidos de pérdida de carga para los distintos tramos de la situación 2.

Sumando todos los términos de pérdidas en la línea y pasando el resultado a metros, se obtiene que el **punto de funcionamiento** para las bombas en **la situación 2** es:

$$Q_{\text{bomba}} = 205,42 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\Delta H = 7,76 \text{ m}$$

5.3. Caudal a circular por la línea de purificación.

Conociendo el dato considerado en las bases de diseño, donde se impone que el sistema de purificación ha de realizar la renovación del volumen completo de la piscina en un día de operación, puede estimarse el porcentaje de de agua que circula por la línea de purificación.

El volumen total de la piscina sin elementos combustibles puede calcularse teniendo en cuenta las dimensiones obtenidas en el punto 5.1 de la memoria. Dicho volumen es el siguiente:

$$V_{\text{piscina}} = 7,89 \times 13,045 \times 12,6 = 1296,86 \text{ m}^3$$

Teniendo en cuenta que en la piscina hay un total de 1040 elementos combustibles, cada uno de los cuales tiene un volumen de 0,074 m³ (ver dimensiones en el punto 3.2 de la memoria), el volumen ocupado por los elementos es de

$$V_{\text{elementos}} = 0,074 \times 1040 = 76,96 \text{ m}^3$$

De modo que el volumen de agua en la piscina es la diferencia entre el volumen de la piscina sin bastidores y el volumen de los bastidores:

$$V_{\text{agua}} = 1219,9 \text{ m}^3$$

Si el desmineralizador ha de ser capaz de tratar el volumen completo de la piscina en un día, el caudal a tratar por el desmineralizador es de:

$$Q_{\text{purificación}} = \frac{1219,9 \text{ m}^3}{24 \text{ h}} = 50,83 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Si lo comparamos con los caudales obtenidos para cada línea de las situaciones 1 y 2, se tiene que para la situación 1, el caudal de purificación supone un porcentaje frente al caudal de una línea de: $\frac{50,83}{575,18} \times 100 = 10,16\%$.

Para el caso de la situación 2, dicho porcentaje es de: $\frac{50,83}{410,84} \times 100 = 12,37\%$.

Los valores obtenidos son próximo a el 10%, valor impuesto en las bases de diseño por los manuales de General Electric [33].

5.4. Pérdidas de agua por evaporación.

Con este cálculo se pretende estimar el caudal de agua desmineralizada que es necesario aportar a la piscina debido a las pérdidas en la misma por evaporación.

Para que se produzca evaporación del agua ha de existir una fuerza impulsora que origine el flujo de moléculas de agua desde la superficie de la piscina hacia el aire del edificio de combustible [35].

Considérese la siguiente figura, en la que se tiene una superficie de agua (por ejemplo la superficie de la piscina) y encima de ella se encuentra aire en reposo a unas determinadas condiciones de presión, temperatura y humedad relativa.

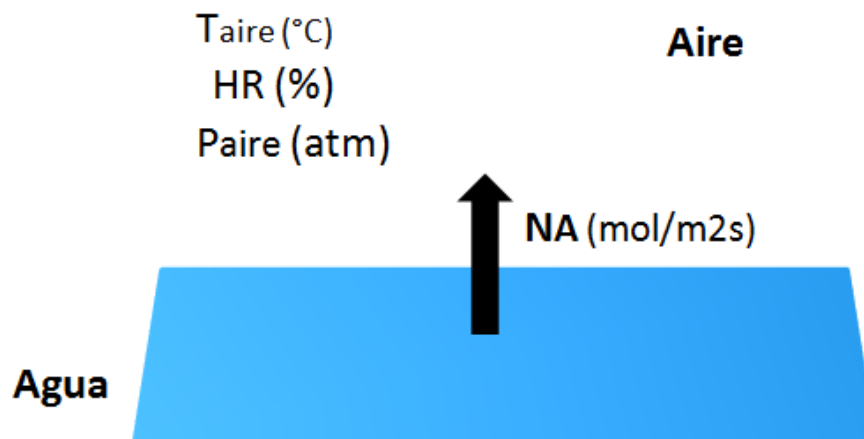


Figura 42: transferencia convectiva de materia entre una superficie y un fluido en reposo.

La fuerza impulsora que origina el flujo de agua desde la superficie de la piscina hacia el aire es una diferencia de humedad relativa entre la primera capa de aire sobre la superficie de agua (interfase) y el aire a una distancia determinada de dicha interfase.

Al tratarse de una difusión gaseosa en la que únicamente se difunde un compuesto (agua) a través de otro compuesto que no se difunde (aire), puede hacerse uso de la siguiente ecuación para el cálculo de la velocidad de transferencia [35] :

$$N_A = K_G \cdot (P_{A0} - P_{A\infty}) \quad \text{(Ecuación 64)}$$

Donde:

N_A : flujo difusivo por unidad de superficie $\left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^2\text{s}}\right)$

D_{AB} : difusividad de un compuesto A en un compuesto B $\left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)$

P: presión del ambiente (atm)

K_G : coeficiente convectivo $\left(\frac{\text{mol}}{\text{atm m}^2\text{s}}\right)$

P_{A0} : presión parcial de A en la interfase (atm)

$P_{A\infty}$: presión de A en el ambiente (atm)

El valor de K_G es un dato conocido [40], presentando este un valor de **0,4** $\frac{\text{mol}}{\text{atm m}^2\text{s}}$

Para dicho valor de K_G se tienen unas condiciones del aire de 70°C y 20% de humedad relativa.

Como se ha comentado anteriormente, en la interfase el aire está saturado de agua, es decir, la humedad relativa es del 100%. Sabiendo que la humedad relativa se define como:

$$HR = \frac{P_i}{P_i^0(T)} \quad \text{(Ecuación 65)}$$

siendo P_i la presión parcial de un compuesto i, y P_i^0 la presión de vapor.

Aplicando la ecuación anterior a la interfase y particularizando para A y B (agua y aire), se obtiene que: $P_{A0} = P_A^0(T)$.

La presión de vapor del agua a 28°C (base de datos de Engineering Equation Solver) es: **$P_{A(T=70^\circ\text{C})}^0 = 0,3118 \text{ atm}$** .

Para el cálculo de la presión parcial del agua en una zona alejada de la interfase, se dispone del dato de humedad relativa (20%). Haciendo uso de este dato y del de presión de vapor, se puede hacer uso de la ecuación 65, obteniendo que: **$P_{A\infty} = 0,0624 \text{ atm}$** .

Una vez realizados los cálculos, se obtiene un valor de flujo difusivo de :

$$N_A = 0,4 \cdot (0,3118 - 0,0624) = \mathbf{0,0998} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2\text{s}}$$

Multiplicando el resultado anterior por la superficie de la piscina, se obtiene la velocidad con la que el agua de la piscina se evapora:

$$N_A \cdot S = (7,89 \times 13,045) \cdot 0,0998 = \mathbf{10,272} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

Multiplicando por el peso molecular del agua y dividiendo por la densidad, se obtiene el caudal volumétrico de agua que se evapora:

$$Q_{\text{Agua}} = \mathbf{0,185} \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

5.5. Caudal de refrigeración a aportar a los intercambiadores.

Dicho caudal puede determinarse conociendo la potencia disipada por el intercambiador en cada una de las situaciones, así como el gradiente de temperaturas del fluido frío. El salto de temperaturas impuesto es de 10 °C. El poder calorífico del agua a esta temperatura es de $4,191 \frac{\text{KJ}}{\text{KgK}}$. Se consideran las situaciones descritas en el punto 5.2.

Situación 1

$$14560 = m_{\text{refr}} \cdot C_p \cdot (20 - 10)$$

Despejando, y pasando a caudal volumétrico, se obtiene:

$$Q_{\text{refr}} = 1253,7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Multiplicando por un total de 8 intercambiadores (cuatro líneas en funcionamiento):

$$Q_{\text{refrtotal}} = 10.031,77 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Situación 2

$$10400 = m_{\text{refr}} \cdot C_p \cdot (20 - 10)$$

$$Q_{\text{refr}} = 895,7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Por un total de 4 intercambiadores (dos líneas en funcionamiento):

$$Q_{\text{refrtotal}} = 3.582,77 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

5.6. Suministro de agua.

5.6.1. Suministro de agua desmineralizada a la piscina.

Como se ha mencionado en puntos anteriores, la piscina necesita un suministro fiable de agua desmineralizada. Dicho suministro debe contrarrestar las pérdidas por evaporación, además de disponer del volumen de agua suficiente para llenar la piscina en caso descenso descontrolado del nivel de la misma por accidente.

En cuanto al suministro de agua a la piscina, se dispone de 5 depósitos de agua desmineralizada de **acero inoxidable 304**. Cada uno de dichos depósitos tiene una capacidad de 610 m^3 , es decir, un total de $1829,85 \text{ m}^3$ de agua desmineralizada disponibles. Ello corresponde a el volumen necesario para llenar la piscina multiplicado por un factor de seguridad del 50%. Dichos depósitos son cilíndricos, con unas dimensiones de 8 metros de diámetro y 7,3 metros de altura.

Con dichos depósitos se dispone un suministro de $38 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ durante 2 días sin suministro de otras partes de la central. El aporte de agua por pérdidas de evaporación se realiza con dichos depósitos.

5.6.2. Suministro de agua a intercambiadores.

Para el suministro de dicha agua, se dispone de dos piscinas de refrigeración con una capacidad de 82.500 m³ de agua. Se dispone además del embalse de embarcaderos, el cual sirve de suministro a la central [41], con una capacidad de 11 hm³. Las piscinas de refrigeración reciben agua del río Júcar y del embalse de embarcaderos.

5.4. Cálculo de los parámetros del modelo para transferencia de calor.

En este apartado se realiza el cálculo de los parámetros que componen el modelo de la ecuación 22 (punto 4.1 de la memoria). Para el cálculo de dichos parámetros (σ y ξ) son necesarios los valores de coeficiente de película, $h\left(\frac{W}{m^2K}\right)$ y conductividad térmica del material, $k\left(\frac{W}{mK}\right)$.

A continuación se desarrolla el cálculo para el coeficiente de película de líquido:

- **Coeficiente de película del fluido** $\left(h, \frac{W}{m^2K}\right)$.

Para el cálculo del coeficiente de película se tienen diferentes opciones, dependiendo del tipo de convección que tenga lugar. Para el caso de las barras en la piscina, el enfriamiento de las mismas tiene lugar mediante la circulación del fluido desde la parte inferior a la superior de las mismas, por convección natural, tal y como se ha justificado en apartados anteriores.

Para el cálculo del coeficiente de película es necesario, en primer lugar, calcular el número de Nusselt [37] (número adimensional), que tiene la siguiente expresión:

$$Nu = \frac{hL_c}{k_f} \quad \text{(Ecuación 66)}$$

donde:

h: coeficiente de película $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$

L_c: Longitud característica (m)

k_f: conductividad térmica del fluido $\left(\frac{W}{mK}\right)$

Si se consultan tablas de correlaciones para transferencia de calor [37], puede verse que para el caso de convección libre el número de Nusselt tiene la siguiente correlación:

$$Nu = C \cdot Ra^n \quad \text{(Ecuación 67)}$$

Donde Ra es el número de Rayleigh y C, n son coeficientes cuyo valor está tabulado para diferentes valores del número de Rayleigh. La expresión para el número de Rayleigh es la siguiente:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty)}{\alpha \cdot \nu} \quad \text{(Ecuación 68)}$$

Donde:

g : aceleración de la gravedad a nivel del mar ($g=9,80665 \frac{m^2}{s}$)

β : coeficiente dependiente de la temperatura (K^{-1})

T_s : temperatura de la superficie de la barra ($^{\circ}C$)

T_{∞} : temperatura del fluido ($^{\circ}C$)

α : difusividad térmica ($\frac{m^2}{s}$)

ν : viscosidad cinemática ($\frac{m^2}{s}$)

Los parámetros α , β , ν aparecen tabulados para el caso del fluido que se va a utilizar [38] (agua líquida a presión atmosférica) y son función exclusivamente de la temperatura del fluido.

A lo largo de la película de líquido la temperatura no será constante, siendo diferente en la superficie ($\xi = 1$) y al final de la película ($\xi = 1 + \frac{\delta}{r_1}$). Como se verá más adelante tendrá lugar un gradiente de temperatura a lo largo de la película.

Puesto que las propiedades mencionadas anteriormente son función de la temperatura, y ésta va a sufrir una variación, se toma la temperatura media entre la superficie de la barra y la del fluido frío. Esta temperatura se denomina temperatura media de película (T_{mp}) [38].

$$T_{mp} = \frac{(T_s - T_{\infty})}{2} \quad \text{(Ecuación 69)}$$

Definido lo anterior, puede hacerse un balance de energía en la superficie de la barra, tal y como queda reflejado en el punto 4.1 de la memoria. Para ello basta con saber que el calor total que llega a la superficie procedente del interior de la barra por conducción, es liberado al fluido por convección. Las ecuaciones, teniendo en cuenta una barra real (**longitud finita**), quedan de la forma:

$$q_{cv} = h2\pi r_1 L(T_s - T_{\infty}) \quad \text{(Ecuación 70)}$$

$$q_{total} = \gamma\pi r_1^2 L \quad \text{(Ecuación 71)}$$

Donde L es la longitud de la barra. Estas ecuaciones han sido descritas en el punto 4.1 de la memoria, pero sin el término de longitud.

Recordando las bases de diseño del punto 3, se tiene:

- $r_1=0,00615$ m.
- $L=4,02$ m
- $q_{total} = 625$ W
- $T_{\infty}[16 - 60]^{\circ}C$.

El resultado de potencia total disipado por una barra, resulta de dividir la potencia total de un elemento combustible (40.000 W) entre el número de barras que componen un elemento combustible (64 barras).

Planteando lo anterior, se puede resolver el problema a mano de forma iterativa, suponiendo una temperatura para la superficie de la barra. En este caso se ha resuelto haciendo uso del software *Engineering Equation Solver (EES)*. El código del programa se adjunta en el **anexo A**. Los resultados obtenidos de coeficientes de película para distintos valores de temperatura del fluido, dentro del rango mencionado anteriormente, son los siguientes:

T_{∞} (°C)	T_s (°C)	Ra	Nus	h ($\frac{W}{m^2K}$)
16	21,92	1,02E+14	4676	650,4
20,89	26,63	1,08E+14	4756	671,1
25,78	31,35	1,13E+14	4831	690,9
30,67	36,09	1,18E+14	4900	709,6
35,56	40,85	1,22E+14	4966	727,5
40,44	45,62	1,27E+14	5027	744,4
45,33	50,4	1,32E+14	5086	760,4
50,22	55,19	1,36E+14	5142	775,6
55,11	59,99	1,40E+14	5196	790
60	64,79	1,45E+14	5248	803,6

Tabla 11: valores de coeficientes de película obtenidos para diferentes temperaturas del fluido.

Las resoluciones numéricas de los modelos para el interior y exterior de la película se llevan a cabo a partir de dichos valores de temperatura del fluido y coeficientes de película, además de tener en cuenta todas las bases de diseño que afecten al modelo.

- **Conductividad térmica del dióxido de uranio** (k , $\frac{W}{mK}$).

Para determinar dicho parámetro se hace uso de la siguiente ecuación, la cual relaciona la conductividad con la temperatura para el caso del dióxido de uranio [38]:

$$k = \frac{1}{(A+B \cdot T)} \quad \text{(Ecuación 72)}$$

Donde A y B son parámetros determinados experimentalmente y T es la temperatura en grados Kelvin. Los valores obtenidos para dichos parámetros son los siguientes [38]:

$$A = 2,997 \times 10^{-2} \frac{mK}{W}$$

$$B = 2,414 \times 10^{-4} \frac{m}{W}$$

Dicho esto, ya se tiene una expresión que relaciona la conductividad térmica del material con la temperatura.

Los resultados de la conductividad del material en función de la temperatura se representan en las tablas del punto 6, donde puede apreciarse que su valor es prácticamente constante con la temperatura.

6. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LOS MODELOS DE TRANSFERENCIA .

6.1. Transferencia de calor.

En este apartado se lleva a cabo la resolución numérica de los modelos obtenidos para transferencia de calor. Dichos modelos son diferentes dependiendo la zona en la que nos encontremos (interior de la barra o película de líquido), tal y como se ha descrito en el punto 4.1. Con los resultados obtenidos en este modelado, se permite conocer la evolución del perfil de temperaturas a lo largo de la barra en cada instante.

Se presentan valores para todos los parámetros de los modelos adimensionales, incluidos los valores de temperaturas máximas y de superficie alcanzados en la barra, así como el perfil de temperaturas a lo largo de la barra y de la película d fluido.

6.1.1. Resultados obtenidos para el interior de la barra.

El modelo obtenido para el interior de la barra, es decir, cuando $\xi \in [0, 1]$ es el siguiente (redactado con detalle en el punto 4.1):

$$\theta = 1 - \sigma \xi^2$$

A continuación se presentan los resultados obtenidos para dicho modelo, en el que se hace uso de las ecuaciones necesarias descritas en el punto 4.1. Se adjuntan las tablas de resultados obtenidas para dos valores de temperatura del fluido que se encuentran dentro de los límites considerados (tablas 12 y 13) en las bases de diseño y para un tercer caso considerado de emergencia, es decir cuando la temperatura es superior a 60°C (tabla 14).

h=650,4 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$								
r (m)	ξ	σ	θ	T(°C)	Tmax (°C)	Ts (°C)	T_{∞} (°C)	K $\left(\frac{W}{mK}\right)$
0	0	0,2165	1	23,12	23,12	21,92	16	9,857
0,0006842	0,1113	0,2165	0,9979	23,11	23,12	21,92	16	9,857
0,001367	0,2223	0,2165	0,9917	23,06	23,12	21,92	16	9,858
0,002051	0,3334	0,2165	0,9813	22,99	23,12	21,92	16	9,86
0,002734	0,4445	0,2164	0,9667	22,88	23,12	21,92	16	9,862
0,003417	0,5556	0,2164	0,948	22,75	23,12	21,92	16	9,865
0,0041	0,6667	0,2163	0,9251	22,59	23,12	21,92	16	9,869
0,004784	0,7778	0,2162	0,8981	22,39	23,12	21,92	16	9,874
0,005467	0,8889	0,2161	0,867	22,17	23,12	21,92	16	9,879
0,00615	1	0,216	0,8317	21,92	23,12	21,92	16	9,885

Tabla 12: resultados obtenidos para h=650,4 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$ y $T_{\infty} = 16$ (°C).

h=759,34 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$								
r (m)	ξ	σ	θ	T(°C)	Tmax (°C)	Ts (°C)	T_{∞} (°C)	K $\left(\frac{W}{mK}\right)$
0	0	0,2018	1	51,35	51,35	50,07	45	9,236
0,0006842	0,1113	0,2018	0,9975	51,34	51,35	50,07	45	9,237
0,001367	0,2223	0,2018	0,99	51,29	51,35	50,07	45	9,238
0,002051	0,3334	0,2017	0,9776	51,21	51,35	50,07	45	9,239
0,002734	0,4445	0,2017	0,9601	51,1	51,35	50,07	45	9,241
0,003417	0,5556	0,2016	0,9377	50,96	51,35	50,07	45	9,244
0,0041	0,6667	0,2016	0,9104	50,78	51,35	50,07	45	9,248
0,004784	0,7778	0,2015	0,8781	50,58	51,35	50,07	45	9,252
0,005467	0,8889	0,2014	0,8408	50,34	51,35	50,07	45	9,257
0,00615	1	0,2013	0,7987	50,07	51,35	50,07	45	9,263

Tabla 13: resultados obtenidos para h=759,34 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$ y $T_{\infty} = 45(^{\circ}C)$.

Los resultados obtenidos para las situaciones de las tablas 12 y 13 se corresponden con valores de temperatura del fluido que se encuentran dentro de los límites fijados en la norma.

Los siguientes resultados se corresponden con una situación de emergencia, en la que debido a un fallo en el sistema de refrigeración la temperatura del agua de la piscina asciende a 90°C.

h=871,7								
r (m)	ξ	σ	θ	T(°C)	Tmax (°C)	Ts (°C)	T_{∞} (°C)	K $\left(\frac{W}{mK}\right)$
0	0	0,2418	1	95,83	95,83	94,42	90	8,403
0,0006842	0,1113	0,2418	0,997	95,81	95,83	94,42	90	8,403
0,001367	0,2223	0,2418	0,988	95,76	95,83	94,42	90	8,404
0,002051	0,3334	0,2418	0,9731	95,67	95,83	94,42	90	8,406
0,002734	0,4445	0,2417	0,9522	95,55	95,83	94,42	90	8,408
0,003417	0,5556	0,2417	0,9254	95,39	95,83	94,42	90	8,41
0,0041	0,6667	0,2416	0,8926	95,2	95,83	94,42	90	8,414
0,004784	0,7778	0,2415	0,8539	94,97	95,83	94,42	90	8,418
0,005467	0,8889	0,2414	0,8092	94,71	95,83	94,42	90	8,422
0,00615	1	0,2413	0,7587	94,42	95,83	94,42	90	8,427

Tabla 14: resultados obtenidos para h=871,7 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$ y $T_{\infty} = 90(^{\circ}C)$.

La representación gráfica obtenida para las situaciones anteriores se adjunta a continuación. A demás se han añadido representaciones para más condiciones de temperatura del fluido dentro de los intervalos de operación normal de la piscina. Las tablas de estos resultados se adjuntan como anexos.

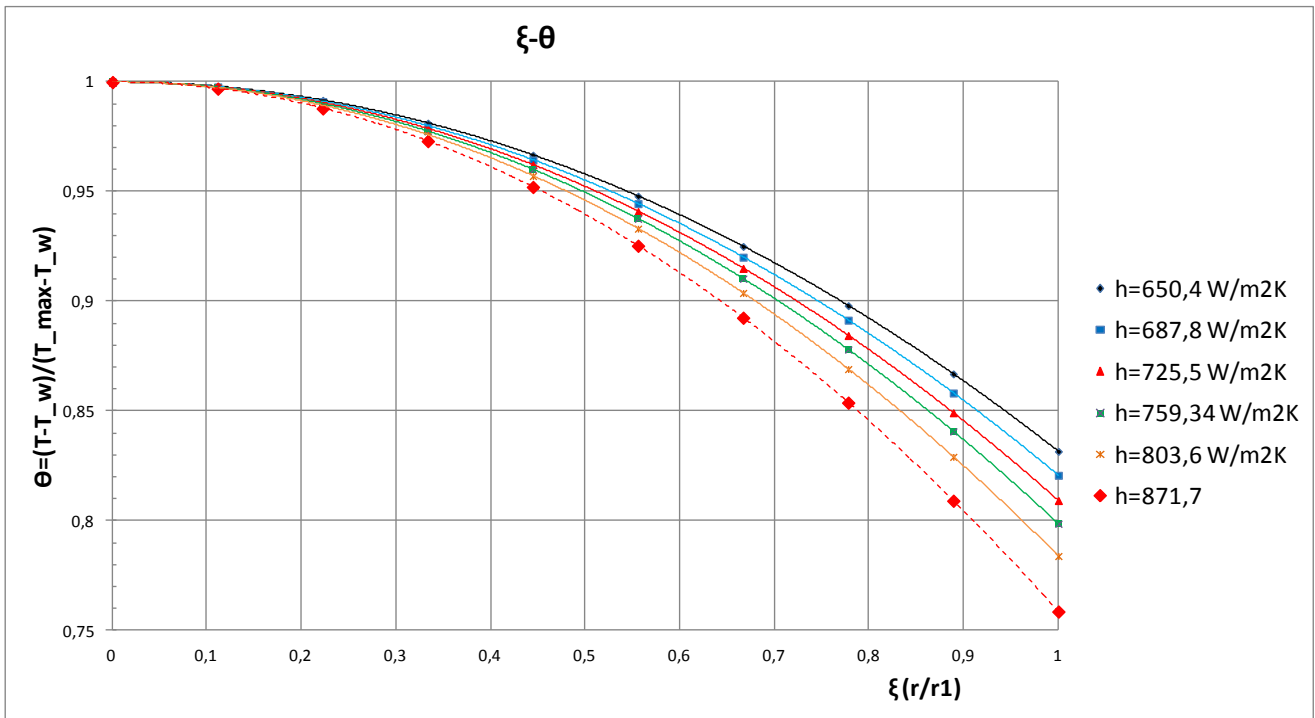


Figura 43: resultados de la simulación obtenida para transferencia de calor en el interior de la barra.

6.1.2. Resultados obtenidos para el exterior de la barra (película de líquido).

El modelo obtenido para el exterior de la barra, es decir, cuando $\xi > 1$ es el siguiente (redactado con detalle en el punto 4.1):

$$\theta = -\alpha\xi + \beta$$

Al igual que para el caso anterior, se presentan los resultados para dos situaciones de temperatura del fluido dentro de los límites de operación (tablas 15 y 16) y para una situación de emergencia fuera de los límites de operación (tabla 17). Señalar que para el caso de la película de líquido, se utilizan los valores de conductividad del fluido, evaluados a la temperatura media de película. No confundir con la conductividad del dióxido de uranio.

h=650,4 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$							
r (m)	δ_T (m)	ξ	θ	θ_s	T (°C)	T_∞ (°C)	Kf $\left(\frac{W}{mK}\right)$
0,00615	0,0008973	1	0,8317	0,8317	21,92	16	0,5836
0,00625	0,0008973	1,016	0,7393	0,8317	21,26	16	0,5836
0,006349	0,0008973	1,032	0,6469	0,8317	20,61	16	0,5836
0,006449	0,0008973	1,049	0,5546	0,8317	19,95	16	0,5836
0,006549	0,0008973	1,065	0,4622	0,8317	19,29	16	0,5836
0,006648	0,0008973	1,081	0,3698	0,8317	18,63	16	0,5836
0,006748	0,0008973	1,097	0,2774	0,8317	17,98	16	0,5836
0,006848	0,0008973	1,113	0,185	0,8317	17,32	16	0,5836
0,006947	0,0008973	1,13	0,09265	0,8317	16,66	16	0,5836
0,007047	0,0008973	1,146	0	0,8317	16	16	0,5836

Tabla 15: resultados obtenidos para h=650,4 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$ y $T_\infty = 16$ (°C).

h=759,34 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$							
r (m)	δ_T (m)	ξ	θ	θ_s	T (°C)	T_∞ (°C)	Kf $\left(\frac{W}{mK}\right)$
0,00615	0,0008265	1	0,7987	0,7987	50,07	45	0,6276
0,006242	0,0008265	1,015	0,71	0,7987	49,51	45	0,6276
0,006334	0,0008265	1,03	0,6212	0,7987	48,94	45	0,6276
0,006426	0,0008265	1,045	0,5325	0,7987	48,38	45	0,6276
0,006517	0,0008265	1,06	0,4437	0,7987	47,82	45	0,6276
0,006609	0,0008265	1,075	0,355	0,7987	47,25	45	0,6276
0,006701	0,0008265	1,09	0,2662	0,7987	46,69	45	0,6276
0,006793	0,0008265	1,105	0,1775	0,7987	46,13	45	0,6276
0,006885	0,0008265	1,119	0,08875	0,7987	45,56	45	0,6276
0,006977	0,0008265	1,134	0	0,7987	45	45	0,6276

Tabla 16: resultados obtenidos para h=759,34 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$ y $T_\infty = 45$ (°C).

h=871,7 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$							
r (m)	δ_T (m)	ξ	θ	θ_s	T (°C)	T_∞ (°C)	Kf $\left(\frac{W}{mK}\right)$
0,00615	0,0007598	1	0,7587	0,7587	94,92	90	0,6623
0,006234	0,0007598	1,014	0,6744	0,7587	93,93	90	0,6623
0,006319	0,0007598	1,027	0,5901	0,7587	93,44	90	0,6623
0,006403	0,0007598	1,041	0,5027	0,7587	92,95	90	0,6623
0,006488	0,0007598	1,055	0,4214	0,7587	92,46	90	0,6623
0,006572	0,0007598	1,069	0,3371	0,7587	91,97	90	0,6623
0,006657	0,0007598	1,082	0,2528	0,7587	91,47	90	0,6623
0,006741	0,0007598	1,096	0,1684	0,7587	90,98	90	0,6623
0,006826	0,0007598	1,11	0,0841	0,7587	90,49	90	0,6623
0,00691	0,0007598	1,124	0	0,7587	90	90	0,6623

Tabla 17: resultados obtenidos h=871,7 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$ y $T_\infty = 90$ (°C).

La representación gráfica obtenida se adjunta a continuación. Al igual que antes, las simulaciones realizadas para los demás valores de temperatura de fluido y coeficiente de película realizados se adjuntan como anexos.

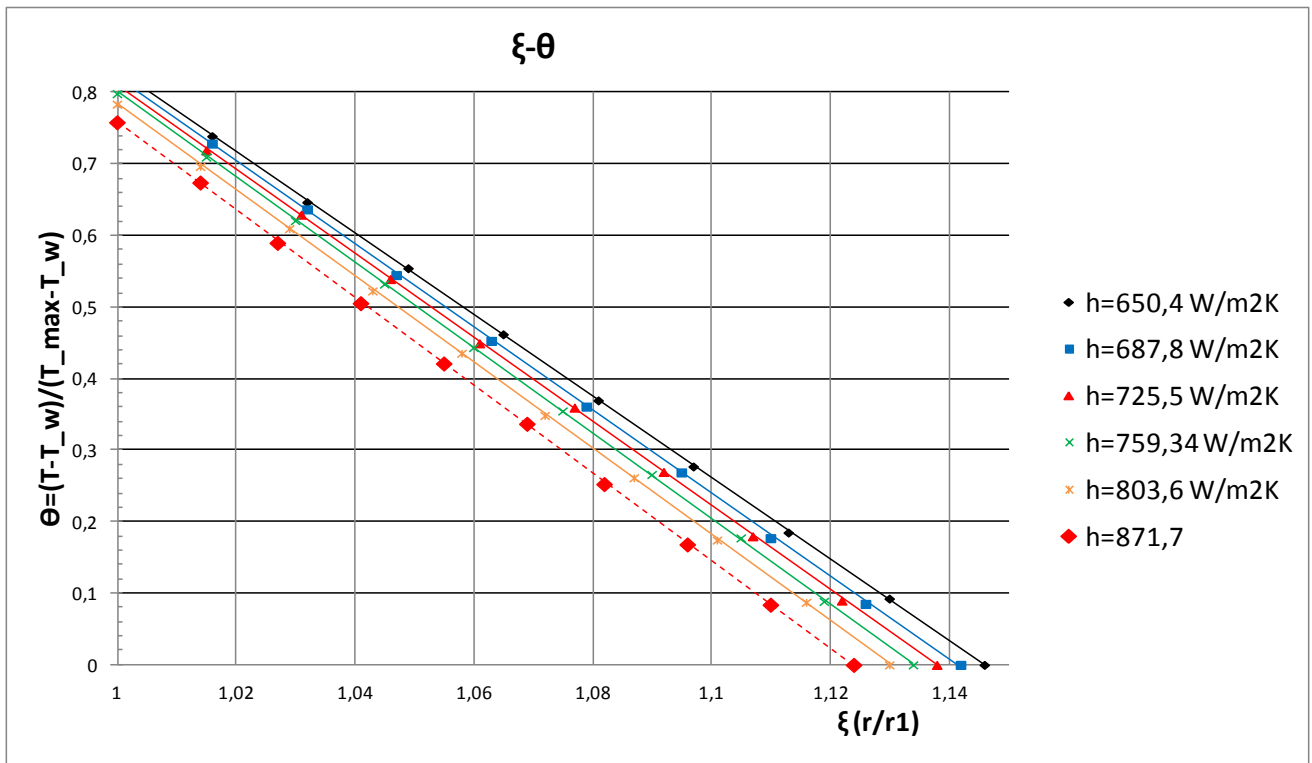


Figura 44: resultados de la simulación obtenida para transferencia de calor en el exterior de la barra.

6.1.3. Representación gráfica del modelo completo.

A continuación se representa gráficamente la simulación del modelo completo (interior de la barra y película de líquido) para transferencia de calor. Se han considerado los dos casos opuestos representados anteriormente.

En negro la simulación realizada para un valor de temperatura del fluido igual a 16 °C.

En rojo para una temperatura del fluido igual a 90 °C.

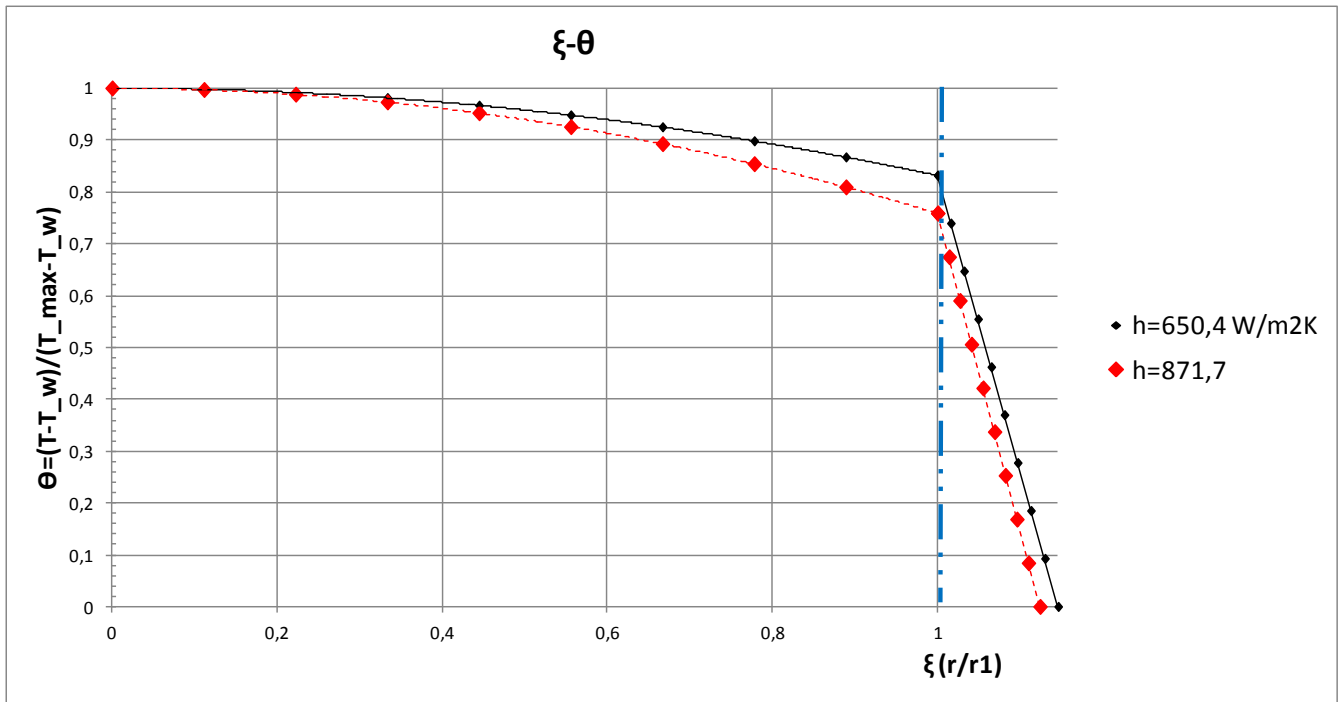


Figura 45: representación del modelo completo de transferencia de calor para dos situaciones diferentes.

Puede observarse como a medida que aumenta el valor de coeficiente convectivo, el gradiente en el interior de la barra es mayor, disminuyendo la pendiente para la zona de la película. Esto puede entenderse mejor analizando la ecuación 21 del punto 4.1:

$$\sigma = \frac{1}{\left[\frac{2k}{r_1 h} + 1 \right]}$$

Dicho número adimensional relaciona la conductividad térmica del dióxido de uranio con el coeficiente convectivo de película del agua. A medida que aumenta el coeficiente convectivo, significa que la transferencia de calor por conducción es mayor que por convección. De este modo se tiene que el fenómeno de conducción domina frente al de convección, es decir, que es más lento. El interior de la barra proporciona una resistencia a la transferencia de calor mayor que el exterior de la misma, de modo que el gradiente en el interior es mayor.

6.2. Transferencia de materia.

En este punto se justifica si es posible despreciar el término temporal de la ecuación 32:

$$\frac{d\Omega}{d\xi} + \xi \frac{d^2\Omega}{d\xi^2} + \xi \frac{r_1^2 \lambda}{D_{AB} C_{A0}} = \xi \frac{r_1^2}{D_{AB}} \frac{d\Omega}{dt}$$

definiéndose el término:

$$\mu = \frac{r_1^2}{D_{AB}}$$

El modelo construido para transferencia de materia (ver ecuación 42), análogo al de transferencia de calor, se ha desarrollado para una de las dos situaciones consideradas, donde se presentaba la siguiente situación: $\mu = 0$. De este modo el término temporal se anula y se está en una situación análoga a la planteada en transferencia de calor. Sin embargo, ¿es posible despreciar el término temporal?

Para ello es necesario el dato de la difusividad de los elementos transuránicos en la pastilla de dióxido de uranio. Se ha escogido el plutonio como elemento difusor. El valor de la difusividad del plutonio en dióxido de uranio [40] para una temperatura de 727°C :

$$D_{P-UO_2} = 10^{-19} \frac{m^2}{s}$$

Conocido esto y el radio de la barra, se obtiene que:

$$\mu = \frac{0,00615^2}{10^{-19}} = 3,78 \times 10^{14}$$

Los valores de temperatura a considerar en la barra (ver apartado anterior) son inferiores a 727 °C.

Por tanto, no es posible despreciar el término temporal.

Si se analiza el número de Biot másico [35], cuya ecuación es:

$$Bi_m = \frac{K_L \cdot L_c}{D_{AB}} \quad \text{(Ecuación 71)}$$

donde:

K_L : coeficiente convectivo de materia $\left(\frac{m}{s}\right)$

L_c : longitud característica (m). En el caso de la barra es el diámetro.

Para que sea posible calcular el número de Biot másico, es necesario conocer el valor del coeficiente convectivo. Este se calcula a partir del número de Sherwood, que tiene la siguiente expresión:

$$Sh = \frac{K_L \cdot d}{D_A} \quad \text{(Ecuación 72)}$$

Donde:

d: diámetro de la barra (m).

D_A : difusividad de los elementos transuránicos (plutonio) en el agua ($\frac{m^2}{s}$).

Se imponen unos valores para el número de Sherwood y difusividad en agua de [37] :

$$Sh = 2$$

$$D_A = 10^{-9} \frac{m^2}{s}$$

De esta forma, se despeja el valor del coeficiente convectivo de la ecuación 72, obteniéndose que: $K_L = 1,62 \times 10^{-7} \frac{m}{s}$. Por tanto, el número de Biot másico queda:

$$Bi_m = 2,04 \times 10^{10}$$

Se obtiene que $Bi_m \gg 1$

Este valor indica que el fenómeno de transferencia interna de materia por difusión domina frente a la convección externa, es decir, que la transferencia interna de materia es mucho más lenta que la convección externa. Por tanto, todo el gradiente de concentración tiene lugar en el interior de la barra. Dicho esto puede asumirse que la concentración de elementos transuránicos en la superficie de la barra es nula, pues en cuanto dichos elementos llegan a la superficie se difunden rápidamente en el agua de la piscina.

El perfil de concentración sería tal que así:

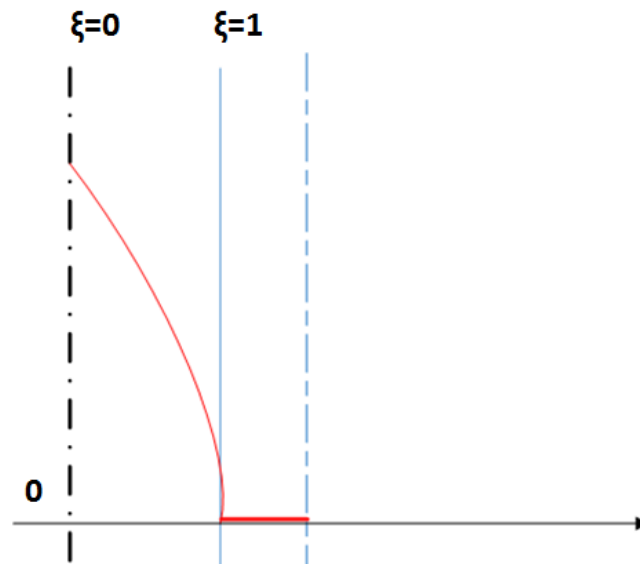


Figura 46: perfil de concentración en la barra y en el líquido para los resultados obtenidos.

7. CONCLUSIONES.

En cuanto a los resultados obtenidos en el cálculo de las dimensiones de la piscina (punto 5.1 de la memoria), puede comprobarse que se han obtenido unas dimensiones parecidas a los valores típicos para piscinas de diseño norteamericano [18], [19]. establecidos en el punto 2.5 de la memoria.

En el proceso de retirada e introducción de los elementos combustibles en las piscinas, se obtiene que, para el diseño llevado a cabo, nunca se produciría la saturación de la misma, quedando en todo momento un total de 896 posiciones libres, teniendo en cuenta el espacio reservado (624 posiciones) para la descarga de un núcleo completo. Esto se ha hecho considerando que todos los elementos estén almacenados en la piscina 10 años. Sin embargo, no todos los elementos pasan el mismo tiempo en la piscina, ya que el tiempo necesario para su enfriamiento y decaimiento radiactivo depende del grado de quemado que hayan tenido los elementos en el reactor. Dicho grado de quemado no es el mismo para todos los elementos, de modo que es posible que haya elementos que necesiten un tiempo de enfriamiento mucho superior a 10 años. Con el diseño realizado se tiene capacidad suficiente para hacer frente a dicha situación. En el caso de que la situación de saturación se alcanzase, se procedería a sustituir los bastidores por otros de tipo más compacto o a la construcción de un almacén temporal individualizado (ATI).

Para el sistema de refrigeración, se han impuesto unas longitudes de tubería coherentes con las dimensiones de la piscina. Los resultados obtenidos de velocidades de circulación de los fluidos por la línea se encuentran dentro de los valores normales (ver figura 39). Para valores de velocidad de circulación muy elevados se produce un incremento de las pérdidas de carga, que lleva consigo el deterioro de la línea y el funcionamiento de los equipos de impulsión e intercambio de su punto de operación.

El valor obtenido que corresponde con las pérdidas de agua por evaporación es superior al que se produciría en condiciones normales. Esto se debe a que el valor de coeficiente convectivo (K_G) utilizado corresponde a unas condiciones de humedad y temperatura alejadas de la situación normal de operación, ya que en el edificio existen unos valores de temperatura y humedad controlados que están por debajo de los que se corresponden con dicho valor de coeficiente convectivo.

El caudal de agua a aportar por dichas pérdidas es suministrado por uno de los 5 depósitos de agua desmineralizada.

Para el caso de suministro de agua a los refrigeradores, se dispone de una fuente fiable de suministro como es el embalse de embarcaderos y el río Júcar.

En cuanto al modelo para transferencia de calor, se han obtenido los perfiles esperados. Para el modelo en el interior de la película se obtiene que el perfil decrece de forma cuadrática, lo cual es lógico pues se está produciendo generación de energía térmica. En el caso de la película de líquido los perfiles son lineales, pues no existe generación. La forma decreciente del perfil se debe a que el valor de la derivada primera de la temperatura respecto al radio es menor que cero.

Dicho modelo cumple con los objetivos planteados, pues permite en todo instante controlar la temperatura de la barra en todos los puntos de la misma para diferentes temperaturas del fluido. Para el caso más crítico planteado de temperatura del fluido ($T_{\infty} = 90^{\circ}\text{C}$), obtiene que la temperatura máxima en la barra es de $95,3^{\circ}\text{C}$. Ello indica que, en lo que a la barra de combustible se refiere, no se está en una situación de peligro, pues se está muy alejado de la temperatura a la cual el revestimiento de zirconio reacciona con el dióxido de uranio ($T \approx 1800^{\circ}\text{C}$) [12]. Sin embargo, la piscina se encuentra en una situación de emergencia, pues el agua está próxima a la ebullición.

Además, puede comprobarse en los valores obtenidos en las tablas de resultados que las condiciones de contorno explicadas en el punto 4.1 se cumplen.

En cuanto al modelo para transferencia de materia, se concluye que no es posible despreciar el término temporal, debido a los resultados obtenidos para el número de Biot y μ .

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] **Norma UNE 73-501-92.** *Requisitos de criticidad para el diseño de bastidores de almacenamiento en piscinas de combustible.* Noviembre 1992.
- [2] **CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR.** *Instrucción IS-29 sobre instalaciones de almacenamiento temporal de combustible gastado y residuos radiactivos de alta actividad.* 2010.
- [3] **Robert Alvarez, Jan Beyea, Klaus Janberg, Jungmin Kang, Ed Lyman, Allison Macfarlane, Gordon Thompson, Frank N. von Hippel.** *Reducing the hazards from stored spent power-reactor fuel in the United States.* s.l. : Taylor & Francis Group, 2003.
- [4] **CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR.** *Nuclear power plants in Spain.*
- [5] **INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.** *Nuclear fuel cycle information system.* Viena: s.n., 2009.
- [6] **INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.** *Country nuclear fuel cycle profiles.* Viena : s.n., 2001.
- [7] **ILUSTRE COLEGIO OFICIAL DE FÍSICOS.** *Origen y gestión de residuos radiactivos.* 2000.
- [8] **INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.** *The nuclear fuel cycle.*
- [9] **EMPRESA NACIONAL DE RESIDUOS RADIATIVOS, S.A.** *Separación de elementos transuránicos y algunos productos de fisión presentes en los combustibles nucleares irradiados.* Madrid : s.n., 2006.
- [10] **Ministerio de Industria Turismo y Comercio.** *Sexto Plan General de Residuos Radiactivos (6ºPGRR).* Gobierno de España. Junio 2006.
- [11] **FORO NUCLEAR.** *Resultados nucleares de 2015 y perspectivas para 2016.*
- [12] **The National Research Council.** *Safety and Security of Commercial Spent Nuclear Fuel Storage.* Washington, D.C. : s.n., 2006.
- [13] **INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.** *Design of spent fuel storage facilities.* Viena : s.n., 1994.
- [14] **AMERICAN NUCLEAR SOCIETY.** *Design criteria for an independent spent fuel storage installation (water pool type).* 555 North Kensington Avenue. La Grange Park, Illinois 60525 USA. 1997.
- [15] **INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.** *Design of fuel handling and storage systems for nuclear power plants.* Viena : s.n., 2003.
- [16] **INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.** *Operation of spent fuel storage facilities.* Viena : s.n., 1994.
- [17] **EMPRESA NACIONAL DEL URANIO, S.A.** www.enusa.es.

[18] **WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION.** *The Westinghouse pressurized water reactor power plant. 1984.*

[19] **GENERAL ELECTRIC NUCLEAR ENERGY.** *General description of a boiling water reactor.*

[20] **U. S. Nuclear Regulatory Commission.** *Spent fuel heatup following loss of water during storage. March 1979.*

[21] **Consejo de Seguridad Nuclear.** *Pruebas de resistencia realizadas a las centrales nucleares españolas. Informe final.*

[22] **WESTINGHOUSE TECHNOLOGY SYSTEMS MANUAL.** *Fuel handling and storage.*

[23] **FRANK P. INCROPERA.** *Fundamentals of heat and mass transfer. 2002.*

[24] **NUCLEAR REGULATORY AGENCY.** *Safety criteria for wet and dry spent fuel storage.*

[25] **Información confidencial.**

[26] **LABORATORY FOR ADVANCED NUCLEAR ENERGY, TOKYO INSTITUTE OF TECHNOLOGY.** *Heat removal by coolant flow.*

[27] **U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION.** *Analysis of spent fuel heatup following loss of water in a spent fuel pool.*

[28] **L. A. A. Terremoto, R. S. Seerban, C. A. Zeituni, J. E. R. da Silva, A. T. e Silva, M. Castanheira, G. Lucki, M. de A. Damy and C. A. Teodoro.** *A model for release of fission products from a breached fuel plate under wet storage.* Brasil : International Nuclear Atlantic Conference, 2007.

[29] **Harvey E. White.** *Introducción a la física atómica y nuclear. 1970.*

[31] **Consejo de Seguridad Nuclear.** *Pruebas de resistencia realizadas a las centrales nucleares españolas. Informe final.*

[32] **Foro Nuclear.** *Industria nuclear española.*

[33] **General Electric System Technology Manual.** *Fuel pool cooling and cleanup system.*

[34] **Frank P. Incropera, David P. De Witt.** *Fundamentals of heat and mass transfer, 4th ed.*

[35] **Pedro Ollero de Castro.** *Fenómenos de transporte. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. 2001.*

[36] **Luis Cañadas Serrano.** *Apuntes de la asignatura Operaciones básicas con sólidos y fluidos. Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Año 2005.*

[37] **Dato proporcionado por el tutor, Pedro García Haro.** *Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.*

[38] Juan Francisco Coronel Toro. *Colecciones de tablas, gráficas y ecuaciones de transmisión de calor. Dpto de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos. Universidad de Sevilla. Enero2005.*

[39] CGS. Pillai and A.M. George. *Thermal conductivity of uranium dioxide Journal of Nuclear Materials 200(1993).*

[40] G.R. Chilton and J. Edwards. *The Solid-State diffusion of Plutonium in Uranium Dioxide. 16 February 1978.*

ANEXOS

Anexo A: Determinación de los coeficientes de película para diferentes temperaturas de agua

{datos}

{T_w=60} "variable para tabla paramétrica"
r1=0,00615 [m]

{balance superficie}

$q_{cv}=h \cdot 2 \cdot \pi \cdot r1 \cdot L \cdot (T_s - T_w)$
 $q_{total}=\gamma \cdot \pi \cdot r1^2 \cdot L$ "potencia total que llega a la superficie desde el interior de la barra por conducción"
 $q_{cv}=q_{total}$
 $q_{total}=625$ [W]
 $L=4,2$ [m]

{correlaciones}

$Ra=g \cdot \beta \cdot (T_s - T_w) \cdot L^3 / (\alpha \cdot \nu)$
 $g=9,8$
 $\beta=1/(T_m+273)$
 $T_m=(T_s+T_w)/2$

$\alpha=\text{thermaldiffusivity}(\text{Water}; T=T_m; P=1)$
 $\nu=\text{kinematicviscosity}(\text{Water}; T=T_m; P=1)$
 $k=\text{conductivity}(\text{Water}; T=T_m; P=1)$
 $Nus=C \cdot Ra^n$
 $C=0,1$
 $n=1/3$
 $Nus=(h \cdot L)/k$

Anexo B: Modelo para el interior de la barra.

"generación volumétrica en todos los puntos de la barra. barra de longitud finita"
{datos}

$r_1=0,00615$ [m]
 $T_w=90$
 $h=871,7$ [w/m²k]

$k=1/(A+B*(T+273))$ [w/mk]
 $A=2,997E-2$
 $B=2,414E-4$
 $L=4,2$ [m]

{balance superficie barra}

$q_{cv}=h*2*pi*r_1*L*(T_s-T_w)$

$q_{total}=\gamma*pi*r_1^2*L$
 $q_{total}=625$

$q_{cv}=q_{total}$

"adimensionalizando"

$\theta=1-\sigma*\xi^2$ "modelo adimensional"

$\theta=(T-T_w)/(T_{max}-T_w)$
 $T-T_w=\gamma/(4*k*h)*(2*k*r_1-r^2*h+r_1^2*h)$
 $\theta=(2*k*r_1+r_1^2*h-r^2*h)/(2*k*r_1+r_1^2*h)$
 $\sigma=1/((2*k)/(r_1*h)+1)$
{ $\xi=(r/r_1)$ } "variable para tabla paramétrica"

Anexo C: Modelo para la película de líquido real.

modelo adimensional para película de líquido.No existe generación volumétrica de energía térmica"

{datos}

$r_1=0,00615$ [m]

$T_w=60$ [°C]

$k=0,6432$ [w/mk] "evaluado a la temperatura media de película"

$h=803,6$ [w/m²k]

"adimensionalizando"

$\theta=-\alpha \cdot \xi + \beta$ "modelo adimensional"

$\theta=(T-T_w)/(T_{max}-T_w)$

$T_{max}=66,12$ "dato simulación interior barra"

$\alpha=\theta_s/\delta \cdot r_1$

$\beta=\theta_s/\delta \cdot r_1 \cdot (1+\delta/r_1)$

$h=k/\delta$

$\theta_s=0,784$ "dato simulación interior barra"

$\xi=(r/r_1)$

Anexo D: Resultados de la simulación para transferencia de calor.

Anexo D.1: Interior de la barra.

h=687,8 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$								
r (m)	ξ	σ	θ	T(°C)	Tmax (°C)	Ts (°C)	T_{∞} (°C)	K $\left(\frac{W}{mK}\right)$
0	0	0,1797	1	31,83	31,83	30,6	25	9,657
0,0006842	0,1113	0,1797	0,9978	31,81	31,83	30,6	25	9,657
0,001367	0,2223	0,1796	0,9911	31,76	31,83	30,6	25	9,658
0,002051	0,3334	0,1796	0,98	31,69	31,83	30,6	25	9,66
0,002734	0,4445	0,1796	0,9645	31,58	31,83	30,6	25	9,662
0,003417	0,5556	0,1795	0,9446	31,45	31,83	30,6	25	9,665
0,0041	0,6667	0,1795	0,9202	31,28	31,83	30,6	25	9,669
0,004784	0,7778	0,1794	0,8915	31,08	31,83	30,6	25	9,673
0,005467	0,8889	0,1793	0,8583	30,86	31,83	30,6	25	9,679
0,00615	1	0,1792	0,8208	30,6	31,83	30,6	25	9,684

Tabla 18: resultados obtenidos para h=687,8 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$ y $T_{\infty} = 25$ (°C).

h=725,5 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$								
r (m)	ξ	σ	θ	T(°C)	Tmax (°C)	Ts (°C)	T_{∞} (°C)	K $\left(\frac{W}{mK}\right)$
0	0	0,1911	1	41,56	41,56	40,31	35	9,442
0,0006842	0,1113	0,1911	0,9976	41,55	41,56	40,31	35	9,443
0,001367	0,2223	0,1911	0,9906	41,5	41,56	40,31	35	9,444
0,002051	0,3334	0,1911	0,9788	41,42	41,56	40,31	35	9,445
0,002734	0,4445	0,11	0,9623	41,31	41,56	40,31	35	9,448
0,003417	0,5556	0,191	0,941	41,17	41,56	40,31	35	9,451
0,0041	0,6667	0,1909	0,9151	41	41,56	40,31	35	9,454
0,004784	0,7778	0,1908	0,8845	40,8	41,56	40,31	35	9,459
0,005467	0,8889	0,1908	0,8493	40,57	41,56	40,31	35	9,464
0,00615	1	0,1907	0,8093	40,31	41,56	40,31	35	9,469

Tabla 19: resultados obtenidos para h=725,5 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$ y $T_{\infty} = 35$ (°C).

h=803,6 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$								
r (m)	ξ	σ	θ	T(°C)	Tmax (°C)	Ts (°C)	T^∞ (°C)	K $\left(\frac{W}{mK}\right)$
0	0	0,2165	1	66,12	66,12	64,79	60	8,942
0,0006842	0,1113	0,2165	0,9973	66,1	66,12	64,79	60	8,942
0,001367	0,2223	0,2165	0,9893	66,05	66,12	64,79	60	8,943
0,002051	0,3334	0,2165	0,9759	65,97	66,12	64,79	60	8,945
0,002734	0,4445	0,2164	0,9572	65,85	66,12	64,79	60	8,947
0,003417	0,5556	0,2164	0,9332	65,71	66,12	64,79	60	8,95
0,0041	0,6667	0,2163	0,9039	65,53	66,12	64,79	60	8,953
0,004784	0,7778	0,2162	0,8692	65,31	66,12	64,79	60	8,957
0,005467	0,8889	0,2161	0,8292	65,07	66,12	64,79	60	8,962
0,00615	1	0,216	0,784	64,79	66,12	64,79	60	8,968

Tabla 20: resultados obtenidos para h=803,6 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$ y $T^\infty = 60$ (°C).

Anexo D.2: Exterior de la barra.

h=687,8 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$							
r (m)	δ_T (m)	ξ	θ	θ_s	T (°C)	T^∞ (°C)	Kf $\left(\frac{W}{mK}\right)$
0,00615	0,0008649	1	0,8208	0,8208	30,61	25	0,5994
0,006247	0,0008649	1,016	0,7289	0,8208	29,98	25	0,5994
0,006344	0,0008649	1,032	0,6369	0,8208	29,35	25	0,5994
0,006441	0,0008649	1,047	0,545	0,8208	28,72	25	0,5994
0,006538	0,0008649	1,063	0,453	0,8208	28,09	25	0,5994
0,006634	0,0008649	1,079	0,3611	0,8208	27,47	25	0,5994
0,006731	0,0008649	1,095	0,2691	0,8208	26,84	25	0,5994
0,006828	0,0008649	1,11	0,1772	0,8208	26,21	25	0,5994
0,006925	0,0008649	1,126	0,08524	0,8208	25,58	25	0,5994
0,007022	0,0008649	1,142	0	0,8208	25	25	0,5994

Tabla 21: resultados obtenidos para h=687,8 $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$ y $T^\infty = 25$ (°C).


$h=725,5 \left(\frac{W}{m^2K}\right)$							
r (m)	δ_T (m)	ξ	θ	θ_s	T (°C)	T_∞ (°C)	Kf $\left(\frac{W}{mK}\right)$
0,00615	0,000847	1	0,8093	0,8093	40,31	35	0,6145
0,006244	0,000847	1,015	0,7194	0,8093	39,72	35	0,6145
0,006338	0,000847	1,031	0,6295	0,8093	39,13	35	0,6145
0,006432	0,000847	1,046	0,5395	0,8093	38,54	35	0,6145
0,006526	0,000847	1,061	0,4496	0,8093	37,95	35	0,6145
0,006621	0,000847	1,077	0,3597	0,8093	37,36	35	0,6145
0,006715	0,000847	1,092	0,2698	0,8093	36,77	35	0,6145
0,006809	0,000847	1,107	0,1798	0,8093	36,18	35	0,6145
0,006903	0,000847	1,122	0,08992	0,8093	35,59	35	0,6145
0,006997	0,000847	1,138	0	0,8093	35	35	0,6145

Tabla 22: resultados obtenidos para $h=725,5 \left(\frac{W}{m^2K}\right)$ y $T_\infty = 35(^\circ C)$.

$h=803,6 \left(\frac{W}{m^2K}\right)$							
r (m)	δ_T (m)	ξ	θ	θ_s	T (°C)	T_∞ (°C)	Kf $\left(\frac{W}{mK}\right)$
0,00615	0,00008004	1	0,784	0,784	64,8	60	0,6432
0,006239	0,00008004	1,014	0,6969	0,784	64,27	60	0,6432
0,006328	0,00008004	1,029	0,6099	0,784	63,73	60	0,6432
0,006417	0,00008004	1,043	0,5228	0,784	63,2	60	0,6432
0,006506	0,00008004	1,058	0,4357	0,784	62,67	60	0,6432
0,006594	0,00008004	1,072	0,3487	0,784	62,13	60	0,6432
0,006683	0,00008004	1,087	0,2616	0,784	61,6	60	0,6432
0,006772	0,00008004	1,101	0,1745	0,784	61,07	60	0,6432
0,006861	0,00008004	1,116	0,08746	0,784	60,54	60	0,6432
0,00695	0,00008004	1,13	0	0,784	60	60	0,6432

Tabla 23: resultados obtenidos para $h=803,6 \left(\frac{W}{m^2K}\right)$ y $T_\infty = 60(^\circ C)$.

Anexo E: Hoja de especificaciones intercambiadores de calor.

		EKİN ENDÜSTRİYEL İST. SOĞ. SAN. TIC. LTD. ŞTİ. DEŞ Sanayi Sitesi 107. Sokak B14 Blok No:2 Ümraniye İstanbul Tel.: +90 (216) 880 13 05 - Fax: +90 (216) 880 13 08 http://www.ekinendustriyel.com info@ekinendustriyel.com	
Customer	Date	10.7.2017	
Attention	Project nbr.		
Description			
Exchanger properties			
Capacity	20000,00	kW	
Plate Type	MIT 8180		
Nbr. of plates	159		
Plate Arrangement	150L		
Heat Transfer Area	262,60	m ²	
Margin	23,85	%	
Overall K-value duty / clean	4304 / 5330	W/(m ² K)	
LMTD	18,44	°C	
Primary circuit		Secondary circuit	
Fluid type	WATER		WATER
Nbr. Of circuits	1		1
Flow rate	394,3	m ³ /h	1148,2
Inlet temperature	60,00	°C	10,00
Outlet temperature	18,00	°C	25,00
Total Pressure drops	13,09	kPa	99,28
Pressure drops in plates	11,54	kPa	88,07
Pressure drops in connections	1,55	kPa	13,22
Channel velocity	0,42	m/s	1,23
Connection velocity	1,5498	m/s	4,512
Fouling factor	0,0000224	(m ² K)/W	0,0000224
Thermophysical properties		Secondary circuit	
Fluid density	992,97	kg/m ³	998,99
Fluid specific heat	4179	J/(kg K)	4188
Fluid thermal conductivity	0,628	W/(m K)	0,594
Viscosity	0,6783	cP	1,0681
Project data			
Plate Material	0,5 mm - AISI 316L		
Gasket material	EPDM		
Frame material	Carbon Steel		
Connections			
Primary side	M1 ⇒ M2 NW300 FLANGE (STUDED) C8		
Secondary side	M3 ⇒ M4 NW300 FLANGE (STUDED) C8		
Weight Dry / Wet	4804,53/5505,78	kg	
Inside Volume Primer / Seconder	497,7 / 497,7	l	
Design / Test Pressure	10 / 15	bar	
Min / Max Working Temperature	-25 / 150	°C	

11/01/16 09:05:23 470914

Anexo F: Hoja de especificaciones bombas centrífugas.



Design LS Technical Data

Performance Range:

- Capacity up to 4600m³/h (20.250 USgpm)
- Head up to 170m (560 feet)
- Speed up to 1750 rpm

Sizes:

- DN 125 up to DN 600 (5" up to 24") discharge.
- Size DN 32 up to DN 150 (1 1/4" up to 6"), refer to design LSN

Temperature:

- max. 180°C (350°F)

Casing pressure:

- up to 16bar (174/230 psig)
For higher casing pressures refer to design LC/LCP

Handled liquids:

- Clean or slightly contaminated liquids (without bigger solids)
- Cold and hot water
- Condensate and deionized water
- Oil brine and acid
- Paper stock suspensions up to 1,2%

Applications:

- General industry
- Chemical industry
- Steel mills and mining
- Sugar industry
- Pulp and paper mills

Materials:

Code	Impeller	Casing, Casing cover	Wear rings	Bearing frame	Shaft	Shaft sleeve
NL	Cast iron 0.6025	Ductile iron 0.7040	Cast iron 0.6025	Cast iron 0.6025	Stainless steel 1.4021	Stainless steel 1.4021
SL	Bronze CC480 K					
VL	Stainless steel 1.4408					
NF	Cast iron 0.6025	Carbon steel 1.0619	Cast iron 0.6025	Cast iron 0.6025	Stainless steel 1.4021	Stainless steel 1.4021
SF	Bronze CC480 K					
VF	Stainless steel 1.4408					
VV	Stainless steel 1.4408	Stainless steel 1.4408	Duplex 1.4462/1.4517	Cast iron 0.6025	Stainless steel 1.4021	Duplex 1.4462
WW	Duplex 1.4517	Duplex 1.4517				

Other materials cover request

Performance Range 1450rpm, 950rpm, 750rpm

