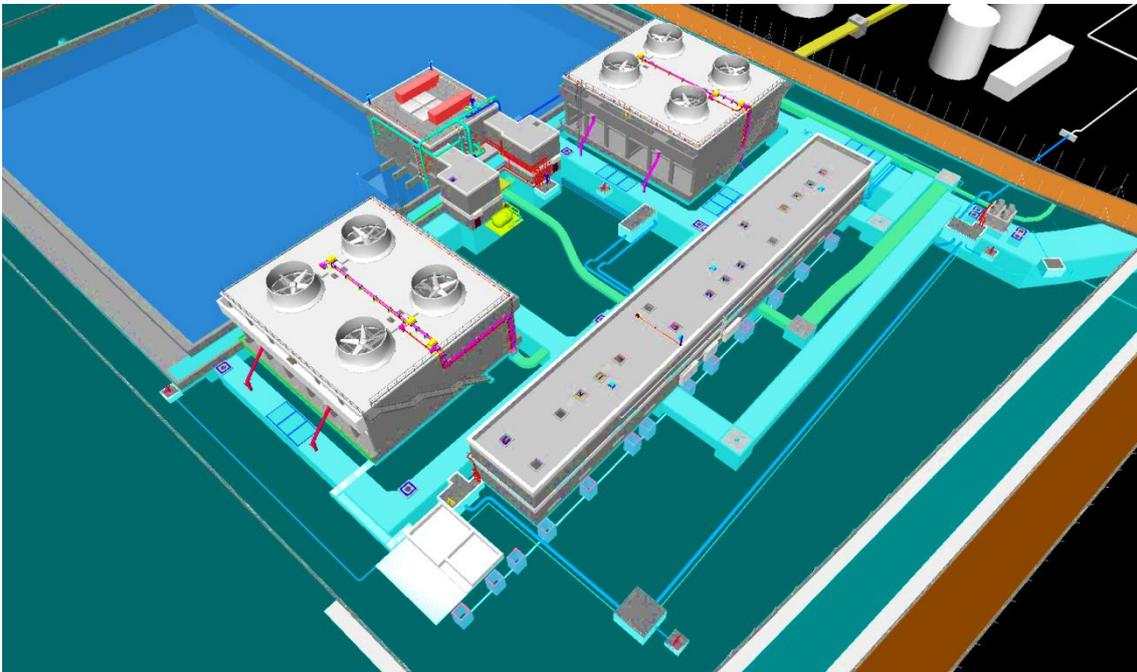

Escuela de Ingeniería de Bilbao
Máster Universitario en Ingeniería Industrial
TRABAJO FIN DE MÁSTER

MEJORA DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE
UNA CENTRAL NUCLEAR



Autora: Mariya Pankiv

Tutor: Ivan Flores Abascal

Año académico: 2016/2017

RESUMEN TRILINGÜE

Este trabajo se ha desarrollado durante las prácticas de cooperación educativa realizadas en la empresa IDOM Consultoría, Ingeniería y Arquitectura, SAU., en el departamento de Servicios Nucleares.

Se trata de un proyecto de modificación de un sistema de refrigeración que actualmente se encuentra en funcionamiento. Dicho sistema realiza la refrigeración de los componentes importantes para el funcionamiento seguro de una central nuclear de tipo agua a presión.

Con este proyecto se proporciona a la planta mayor versatilidad del sistema de refrigeración además de un funcionamiento más seguro. Se añade un sistema adicional de refrigeración que se activa en casos de producirse un accidente en la planta y además puede ser utilizado en la operación normal como un sistema de refrigeración de apoyo.

A pesar de que este trabajo tiene su aplicación directa para los equipos de una central nuclear, no se requieren conocimientos específicos de la especialidad de ingeniería nuclear para su elaboración ni para su posterior entendimiento. En sí, se trata de un proyecto de instalación de equipos de intercambio de calor, acumulación de agua y redes de distribución, que podrían ser instalados en cualquier planta convencional.

En este trabajo se realiza el diseño básico de la instalación requerida. Es decir, para esta etapa del proyecto se realizan los cálculos para el dimensionamiento de los equipos principales, así como se definen los trabajos necesarios para la ejecución del proyecto. Estos trabajos se detallan en el apartado de la planificación del proyecto. También se calcula el coste aproximado de la ejecución de la modificación propuesta. La instalación de estos equipos sería el objetivo de un proyecto posterior en el que se llevaría a cabo el diseño detallado de la instalación.

Además, en los anexos de este documento se presentan las hojas de cálculo, el presupuesto desglosado, la planificación, manuales de mantenimiento y planos de ejecución para completar la información presentada a lo largo de este trabajo.

La información utilizada para realizar este trabajo proviene de IDOM Consultoría, Ingeniería y Arquitectura, SAU, con el previo consentimiento de la empresa.

This work was developed during the internship carried out at the company IDOM Consulting, Engineering and Architecture, SAU, in the department of Nuclear Services.

The aim of this project is to modify a refrigeration system that is currently operating. This system performs the cooling of the components important for the safe operation of a Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plant.

This project provides the plant with greater versatility of the refrigeration system in addition to safer operation. An additional cooling system is added that will come into operation in case of an accident at the plant and can also be used in normal operation as a backup cooling system.

Although this work has its direct application for the equipment of a nuclear power plant, it does not require specific knowledge of the nuclear engineering for its elaboration and subsequent understanding. In itself, it is a project for the equipment installation such as heat exchangers, water storage and networks of distribution that could be utilized in any conventional plant.

In this project is carried out the basic design of the required installation. In other words, for this stage of the project, the calculations for the design of the main equipment are made, as well as the description of the works for the execution of the project. These works are detailed in the section of the project planning. The approximate cost of the execution of the proposed modification is also calculated. The execution of this installation would be the objective of a later project that would realize the detailed design of the installation.

In addition, in the annexes attached in this document are added the spreadsheets, the breakdown of the budget, the planning, maintenance manuals and execution plans to complete the information presented in the following pages.

The information used for the development of this work comes from IDOM Consulting, Engineering and Architecture, SAU, with the prior consent of the company.

Lan hau, IDOM Consultoría, Ingeniería y Arquitectura, SAU enpresan burututako hezkuntza-lankidetzako praktketan garatu da, Zerbitzu Nuklearreko sailean.

Gaur egun funtzionatzen ari den hozte-sistema bat aldatzeko proiektua da. Sistema honek presiozko ur motako zentral nuklearraren funtzionamendu segurua egiteko osagai garrantzitsuak hozten ditu.

Proiektu honek, instalazioaren hozte-sistemaren moldakortasuna eta segurtasuna hobetzen ditu. Beste hozte-sistema bat gehitzen da instalazioan istripu bat gertatzean funtziona dezan. Gainera, funtzionamendu normalean erabil daiteke hozte-sistema lagungarri modura.

Lan hau zentral nuklearraren ekipamenduei zuzenean aplikatu arren, ez du ingeniari-tza nuklearraren espezialitatearen ezagutza espezifikorik eskatzen bere elaboraziorako ezta bere ulermenerako. Berez, bero trukaketa ekipo, uraren metaketa sistema eta banaketa sareak instalatzeko proiektu bat da, edozein instalazio konbentzionaletan instalatu ahal direnak.

Ondoren, beharrezko instalazioaren oinarritzko diseinua egin da. Hau da, proiektuaren fase honetarako, ekipamendu nagusien kalkuluak egin dira, eta proiektua gauzatzeko beharrezko lanak zehaztu dira. Lan hauek proiektuaren plangintzaren atalean zehazten dira. Proposatutako aldaketa gauzatzeko gutxi-gorabeherako kostua ere gehitzen da. Instalazio honen exekuzioa, geroagoko proiektu baten helburua izango litzateke, zeinean instalazioaren diseinu zehatza garatuko litzateke.

Horrez gain, dokumentu honetako eranskinetan kalkulu-orriak, aurrekontuaren xehaketa, plangintza, mantentze eskuliburuak eta exekuzio planoak gehitzen dira proiektu osoan zehar aurkezteko den informazioa osatzeko.

Lan hau burutzeko informazioa IDOM Consultoría, Ingeniería y Arquitectura, SAU-tik dator, konpainiaren alde aurreko baimenarekin.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	CONTEXTO (ANTECEDENTES)	1
1.2	ESTADO DEL ARTE	1
1.3	OBJETIVOS Y ALCANCE	2
1.4	BENEFICIOS	2
2	ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS	4
3	METODOLOGÍA	17
4	MEMORIA	21
4.1	DESCRIPCIÓN CENTRAL NUCLEAR PWR	21
4.2	SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE UNA CENTRAL NUCLEAR	24
4.3	SEGURIDAD EN LAS CENTRALES NUCLEARES	30
4.4	DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS AFECTADOS	32
4.4.1	Sistema de Agua de Refrigeración de Componentes	32
4.4.2	Sistema de Agua de Servicios Esenciales	39
4.5	NUEVO SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	42
4.5.1	Descripción general	42
4.5.2	Modos de operación de la central	45
4.5.3	Funcionamiento del Sistema Nuevo	46
4.5.4	Intervenciones	50
4.5.4.1	Bases de diseño	50
4.5.4.2	Descripción equipos	52
4.5.4.2.1	Torres de refrigeración (EJ-E01/2/3/4-A/B)	52
4.5.4.2.2	Bombas centrífugas	54
4.5.4.2.3	Intercambiadores de calor	56
4.5.4.2.4	Sumidero final de calor	58
4.5.4.2.5	Tubería y valvulería	59
4.5.5	Electricidad	61
4.5.6	Instrumentación y control	61
4.5.7	Química del sistema	62
4.5.8	Obra civil y edificios	63
4.6	CÁLCULOS	65
4.6.1	Pérdida de carga en las tuberías	65
4.6.2	Caudal requerido en intercambiadores nuevos	69
4.6.3	Balances térmicos	76
4.6.3.1	Sistema EF - EG-E01-A/B	76
4.6.3.2	Sistema EJ - EG-E02-A/B	81
4.6.4	Caudal de evaporación en las torres de refrigeración	86
4.6.5	Dimensionamiento de la balsa	88
5	PROGRAMACIÓN	90
5.1	PLANIFICACIÓN DE LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO	90
6	ASPECTOS ECONÓMICOS	92
6.1	PRESUPUESTO	92
7	CONCLUSIONES	94
8	BIBLIOGRAFÍA	96
9	ANEXOS	98

ÍNDICE IMÁGENES

Imagen 2.1 – Opción 1A con balsa	5
Imagen 2.2 – Opción 1A con depósito.....	6
Imagen 2.3 – Opción 1B con balsa	7
Imagen 2.4 – Opción 1B con depósito.....	8
Imagen 2.5 – Opción 2 con balsa.....	9
Imagen 2.6 – Configuración original.....	10
Imagen 2.7 – Configuración serie. Operación normal y parada	11
Imagen 2.8 – Configuración serie. LOCA	12
Imagen 2.9 – Configuración paralelo. Operación normal y parada	13
Imagen 2.10 – Configuración paralelo. LOCA	14
Imagen 4.1 – Central nuclear tipo PWR.....	21
Imagen 4.2 – Esquema de una central PWR.....	22
Imagen 4.3 – Esquema circuito primario de una central PWR	24
Imagen 4.4 – Esquema vasija del reactor	25
Imagen 4.5 – Esquema Generador de vapor	26
Imagen 4.6 – Esquema Presionador	27
Imagen 4.7 – Esquema circuito secundario de una central PWR	27
Imagen 4.8 – Operación Sistema EF	47
Imagen 4.9 – Operación Sistema EJ.....	48
Imagen 4.10 – Disposición de los tres Sistemas	49
Imagen 4.11 – Esquema disposición equipos principales del Sistema EJ	50
Imagen 4.12 – Croquis Torre de Refrigeración	53
Imagen 4.13 – Esquema funcionamiento Torre de Refrigeración	53
Imagen 4.14 – Croquis Bomba Centrífuga	54
Imagen 4.15 – Croquis Intercambiador de Calor	58
Imagen 4.16 – Croquis de la Balsa.....	59
Imagen 4.17 – Croquis distribución de las tuberías.....	65
Imagen 4.18 – Croquis simplificado distribución de las tuberías.....	66
Imagen 4.19 – Curva característica de la bomba EJ-P01 A/B/C/D	69
Imagen 4.20 – Curva teórica de la bomba EJ-P01 A/B/C/D	70
Imagen 4.21 – Velocidades recomendadas.....	71
Imagen 4.22 – Pérdida de carga trenes A y B	73
Imagen 4.23 – Curvas características tren A.....	74
Imagen 4.24 – Curvas características tren B.....	75
Imagen 4.25 – Intercambiador de calor EG-E01A/B.....	80
Imagen 4.26 – Intercambiador de calor EG-E02A/B.....	86

ÍNDICE TABLAS

Tabla 2-1 - Comparación configuración serie/paralelo.....	15
Tabla 3-1 – Cargas térmicas	17
Tabla 3-2 – Temperaturas máximas de EG-E01A/B.....	18
Tabla 3-3 – Temperaturas máximas de EG-E02A/B.....	18
Tabla 4-1 – Datos consumo Sistema EG en operación normal	34
Tabla 4-2 – Datos consumo Sistema EG en parada	35
Tabla 4-3 – Datos consumo Sistema EG en LOCA.....	36
Tabla 4-4 – Temperaturas máximas de EG-E01A/B.....	38
Tabla 4-5 – Temperaturas máximas de EG-E02A/B.....	38
Tabla 4-6 – Características cambiadores EG-E01A/B.....	39
Tabla 4-7 – Datos consumo Sistema EF anterior a la modificación	41
Tabla 4-8 – Datos consumo Sistema EF tras la modificación	41
Tabla 4-9 – Parámetros principales Sistema EJ.....	42
Tabla 4-10 – Nomenclatura equipos principales Sistema EJ.....	52
Tabla 4-11 – Características cambiadores EG-E02A/B.....	57
Tabla 4-12 – Características del agua del sistema de desmineralización.....	62
Tabla 4-13 - Valores coeficiente individual de pérdida de carga	67
Tabla 4-14 – Valores de pérdida de carga en los trenes A y B	68
Tabla 4-15 – Valores de pérdida de carga de la bomba EJ-P01 A/B/C/D	70
Tabla 4-16 – Valores velocidad límite en tuberías.....	72
Tabla 4-17 – Valores de pérdida de carga en la línea con ajuste	72
Tabla 4-18 – Valores de pérdida de carga con la balsa llena/vacía y en la bomba	76
Tabla 4-19 – Caudales obtenidos para trenes A y B	76
Tabla 4-20 – Caudales obtenidos según el modo de funcionamiento	76
Tabla 4-21 – Características principales cambiadores EG-E01A/B.....	77
Tabla 4-22 – Características principales cambiadores EG-E02A/B.....	81
Tabla 4-23 – Capacidad de almacenamiento de la balsa	89
Tabla 6-1 – Resumen Presupuesto	93

ÍNDICE ANEXOS

Anexo I – Normativa Aplicable

Anexo II – Hojas de Cálculo

Anexo III – Planos

Anexo IV – Hojas de Datos Equipos Principales

Anexo V – Planificación

Anexo VI – Presupuesto

Anexo VII – Manuales de Mantenimiento

ÍNDICE ACRÓNIMOS

CCM	Centro de Control de Motores
DBA	Design Basic Accident_ - Accidente Base de Diseño
HELB	High Energy Line Break – Rotura de Línea de Alta Energía
IBA	Intermediate Basic Accident – Accidente Base Intermedio
LOCA	Loss-Of-Coolant Accident - Pérdida Accidental de Refrigerante
MFWB	Main Feed Water Break - Línea de Agua de Alimentación Principal
MSLB	Main Steam Line Break - Ruptura de la Línea de Vapor Principal
NSSS	Nuclear Steam Supply System – Sistema Nuclear de Suministro de Vapor
OBE	Operating Basic Earthquake - Terremoto Básico Operativo
PdC	Pérdida de Carga
PSE	Pérdida de Suministro Exterior
PWR	Pressurized Water Reactor – Reactor de Agua a Presión
RHR	Sistema de Calor Residual
SFC	Sumidero Final de Calor
SIS	Señal de Inyección de Seguridad
SMA	Small Basic Accident – Accidente Base Menor
SSE	Safe Shutdown Earthquake - Terremoto de Cierre Seguro
TDH	Altura Dinámica Total

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO (ANTECEDENTES)

Los datos de partida se han extraído de una central real pero la solución planteada se podría aplicar para cualquier central del mismo tipo y potencia de operación similar.

La modificación del sistema de refrigeración de la central nuclear se ha propuesto como una medida de mejora en la seguridad de la planta con el fin de aumentar la fiabilidad de su funcionamiento durante su vida útil.

Dicho sistema se denomina Sistema de Refrigeración de Componentes (sistema EG) cuya función principal es refrigerar determinados componentes de la central. A su vez el calor acumulado en el Sistema EG se evacua mediante otro sistema, denominado Sistema de Agua de Servicios Esenciales (sistema EF). Se añadirá, tras la modificación planteada mediante este trabajo, otro sistema – Sistema de Agua de Salvaguardias Tecnológicas (sistema EJ) para realizar las mismas funciones que el Sistema EF pero en condiciones adversas, tales como los accidentes base de diseño.

La modificación fundamental en el sistema consistirá en sustituir el agua de mar como foco frío (refrigeración mediante el Sistema EF), por un nuevo sistema de refrigeración que empleará la atmósfera como sumidero final de calor (refrigeración mediante el Sistema EJ).

En condiciones de operación normal y parada de la central, se continuará haciendo uso de la refrigeración mediante agua de mar. El nuevo sistema para la refrigeración entrará en funcionamiento tras producirse un accidente base de diseño pero también tendrá suficiente capacidad para hacer frente a las cargas térmicas en operación normal y parada.

1.2 ESTADO DEL ARTE

El sistema estudiado en este trabajo pertenece a las salvaguardias tecnológicas de una central nuclear. Desarrolla una función específica que es la protección frente a los accidentes LOCA.

De forma general los sistemas de salvaguardias tecnológicas están diseñados para proteger las barreras físicas y evitar la aparición de accidentes. Además, en el caso de que tuviera lugar un accidente, reducen las consecuencias a límites controlables. Se pueden clasificar de la siguiente manera:

- El sistema de refrigeración de emergencia del núcleo - se ocupa de refrigerar el núcleo, limitando fugas de productos radiactivos, siendo capaz de extraer por completo el calor residual tras un accidente con pérdida de refrigerante causado por la rotura o fuga de la barrera de presión (circuito primario), evitando así la fusión del núcleo
- El sistema de protección del reactor - es un sistema independiente del sistema de control, de forma que se inicie automáticamente hasta detener el reactor (disparo del reactor) y llevarlo a parada segura, mediante la inserción de las barras de control y mantenga los límites de diseño ante incidentes de operación previstos y mitigue las consecuencias de accidentes imprevistos.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

- El sistema de evacuación del calor residual - cuando el reactor está en parada, hay que disipar el calor residual liberado por la desintegración de los productos radiactivos acumulados en el combustible.
- El sistema de inyección de seguridad - que suministra agua borada al sistema de refrigeración del reactor controlando así el flujo neutrónico.

Las salvaguardias tecnológicas están diseñados para garantizar la protección del reactor (detención inmediata de la reacción nuclear y mantenimiento en este estado) así como el confinamiento de los productos radiactivos de forma que se eviten los accidentes y se reduzcan sus consecuencias exteriores a límites mínimos. Para este fin, se disponen sistemas alternativos o redundantes que cumplen desde el punto de vista de la seguridad la función de refrigeración del núcleo y la de control de la reacción nuclear.

Existen diferentes sistemas que realizan las funciones descritas de salvaguardias tecnológicas. El Sistema EG refrigera algunos de los equipos que pertenecen al sistema de salvaguardias. Lo solución que propone con este trabajo (utilización de intercambiadores de calor) puede variar según el criterio del proyectista de la central.

1.3 OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un nuevo sistema de refrigeración auxiliar para enfriar determinados equipos de una central nuclear tipo PWR. Con esta mejora se busca un funcionamiento más seguro de la central.

Para ello se van a estudiar diferentes alternativas de disposición de equipos que cumplan con los requisitos exigidos de seguridad y carga térmica de funcionamiento. Las cargas térmicas a las que debe hacer frente son todas aquellas provenientes de los equipos que se requieren como salvaguardias tecnológicas. El nuevo sistema constituye el sistema soporte último para la refrigeración de esos equipos.

Una vez analizadas estas alternativas se elegirá la opción más adecuada para a continuación realizar un diseño básico del nuevo sistema de refrigeración que se denominará Sistema de Agua de Salvaguardias Tecnológicas (sistema EJ).

Este proyecto se centra en los trabajos correspondientes a la parte de diseño e implementación de los equipos necesarios para asegurar un correcto intercambio de calor entre los sistemas existentes y el nuevo sistema que se pretende instalar.

Los trabajos que serán necesarios realizar para la obra civil, electricidad e instrumentación y control se describen de forma general pero no son el objeto de este trabajo.

1.4 BENEFICIOS

La solución planteada no se realiza como una medida de mejora energética, como tal, para la planta. Al contrario, los nuevos equipos añaden más consumo energético a la planta, pero al tratarse de una central nuclear el aspecto más importante es la seguridad, y no tanto la eficiencia, en el funcionamiento de la central.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Por tanto, el beneficio principal de las modificaciones que se van a realizar es asegurar que en caso de producirse un accidente base de diseño el sistema de refrigeración se aíse del exterior al realizarse la refrigeración con el agua acumulada en una balsa. De esta manera se minimiza el riesgo de contaminación del foco frío actual, el mar, y se hará uso del nuevo foco frío, una balsa de agua.

También se añade mayor versatilidad al Sistema EG, en caso de necesidad se hará uso del nuevo sistema en operación normal y parada de la planta, y no solo en casos de producirse un accidente.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

2 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Para la instalación de este nuevo sistema de apoyo a la refrigeración del sistema EG se han planteado varias alternativas. El objetivo buscado es:

- Refrigerar el Sistema EG en caso del accidente LOCA (que se explicará más adelante), o si es requerido en funcionamiento normal o parada programada
- Asegurar un funcionamiento seguro del nuevo sistema al igual que el sistema actual EF
- Proporcionar un funcionamiento sencillo para la activación y mantenimiento posterior

Finalmente para este estudio se han considerado 3 casos: 1A, 1B, y 2.

El número de la opción (1 o 2) indica el número de torres de refrigeración, mientras que la letra identifica diferencias en proceso y equipos. Como guía general:

- Las opciones con 1 torre implican añadir un nuevo tren al sistema EF (tren EJ), que tenga como foco frío la atmósfera. El nuevo tren EJ es tren clase de seguridad. Esta opción implica que los trenes actuales EF-A y EF-B se tienen que modificar. En esta opción se tiene doble tramo de galería, nuevo circuito de torre y nuevos circuitos de tuberías de los trenes EF-A y EF-B.

Otra variable a contemplar cuando hay una única torre es la inclusión de un depósito de reserva para 7 días o una balsa para 30.

- La opción con 2 torres implica añadir un nuevo sistema EJ, con dos trenes clase de seguridad y desclasificar el sistema EF actual que pasaría a ser un tren no clase de seguridad para operación normal de la central.

En este caso la base de proyecto inicial ha sido siempre una balsa de 30 días.

Opción 1.A: En este caso se conecta el nuevo tren EJ a los cambiadores actuales del sistema EG, realizándose el alineamiento de la torre con cada tren (A ó B) mediante el correspondiente juego de válvulas motorizadas. Es decir se realizaría la desconexión del sistema EF, en caso de un accidente LOCA, y se conectaría el nuevo sistema EJ con una torre de refrigeración y una balsa o un depósito como foco frío.

Esto implicaría que se puede dar una mezcla de agua de mar con agua de la balsa o el depósito, efecto que puede reducirse realizando una purga previa del sistema.

En el proyecto de esta opción se define los siguientes edificios y componentes:

- balsa o depósito
- torre de refrigeración
- edificio eléctrico

Estas modificaciones no afectan al sistema EG, la conexión del nuevo sistema se realizaría en el lado EF.

A continuación se presentan las diferentes alternativas para la opción 1A:

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

- En este caso el agua se acumula en una balsa con capacidad para aportar agua durante 30 días para la refrigeración del sistema EG

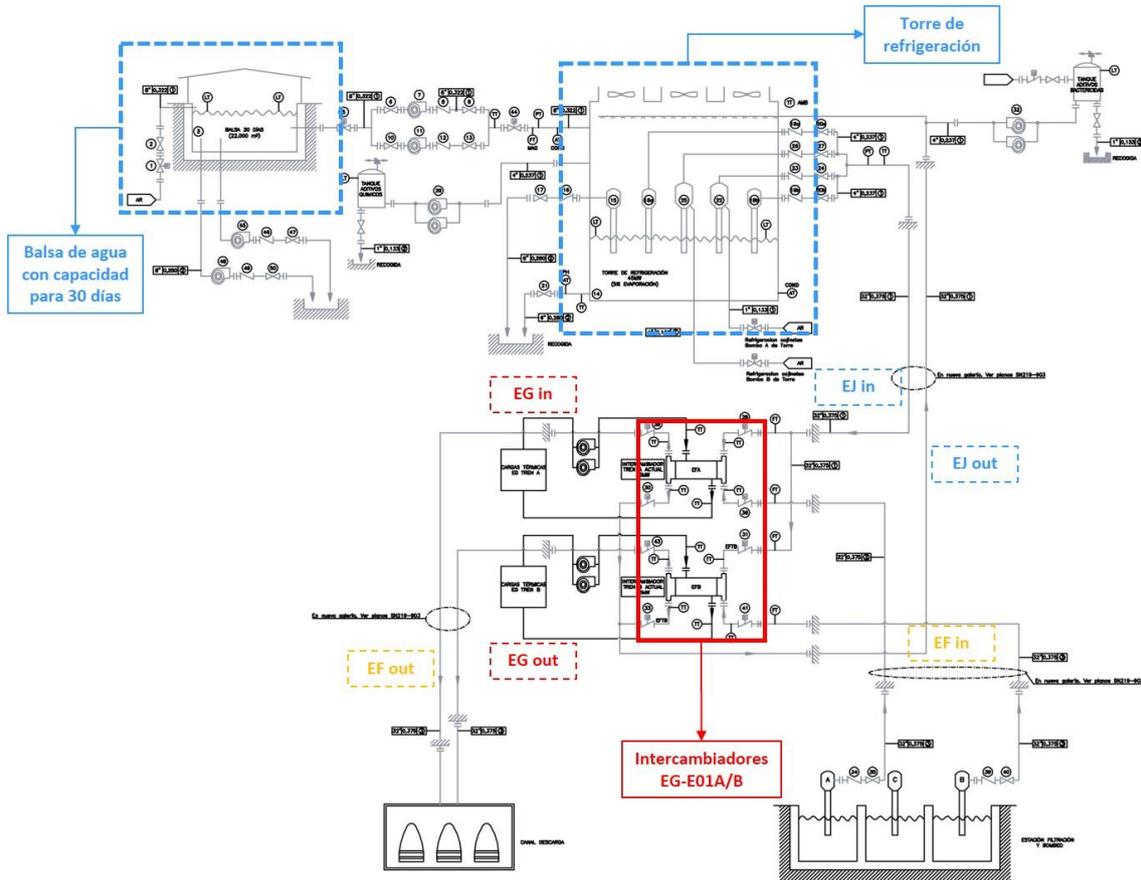


Imagen 2.1 – Opción 1A con balsa

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

- En este caso el agua se acumula en un depósito con capacidad para aportar agua durante 7 días para la refrigeración del sistema EG

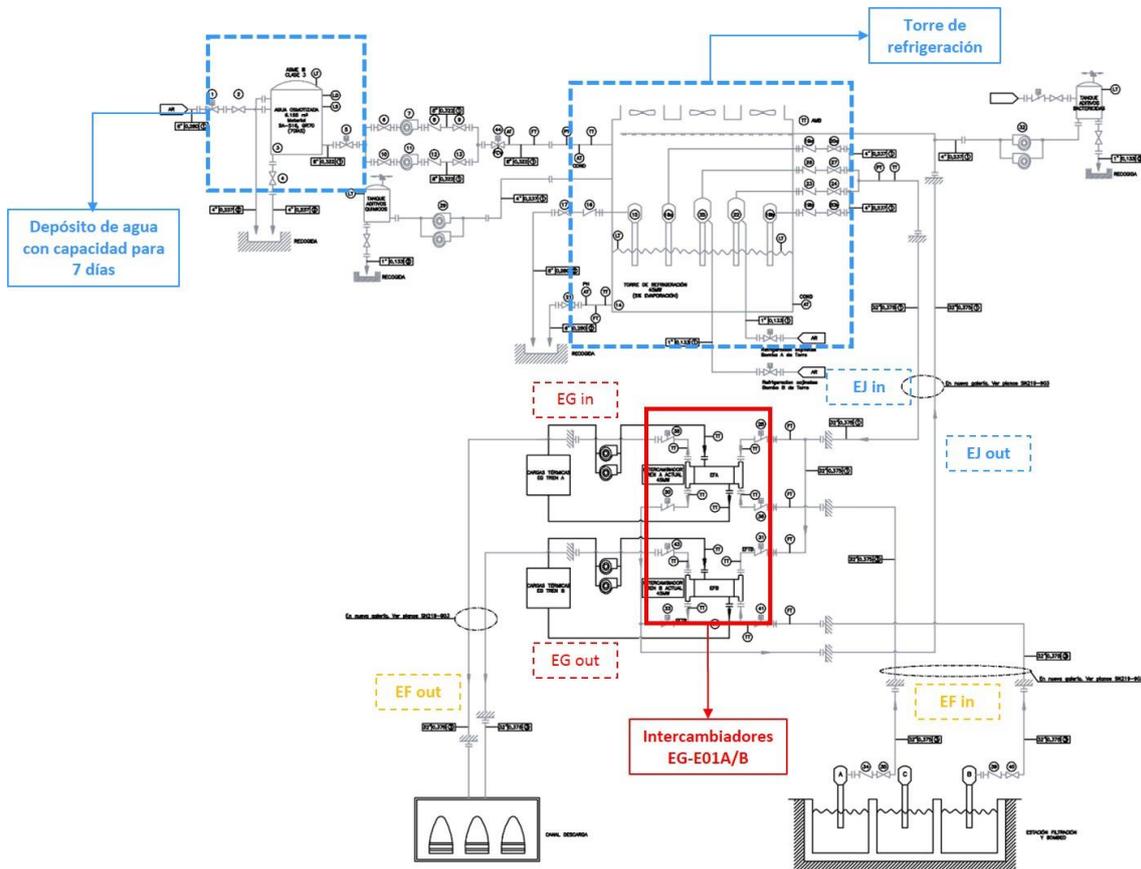


Imagen 2.2 – Opción 1A con depósito

Opción 1.B: En este caso se añade un nuevo intercambiador en serie en el lado EG de cada tren (EG-A y EG-B). En el lado EJ estos intercambiadores están en paralelo con la nueva torre de refrigeración. Es decir, que el tren de torre EJ se alinea alternativamente al tren EF-A ó EF-B mediante el respectivo intercambiador.

En el proyecto de esta opción se definen los siguientes edificios y componentes:

- balsa o depósito
- torre de refrigeración
- dos nuevos intercambiadores EG
- edificio eléctrico
- ampliación edificio Refrigeración de Componentes

Esta opción requiere actuar sobre el sistema EG, para la conexión en serie de los nuevos intercambiadores, así como verificar que las bombas de EG (EG-P01-A/B/C) disponen de presión suficiente para compensar las pérdidas extra añadidas al circuito. Presenta la ventaja de no tener ninguna mezcla de agua, ya que los circuitos de agua son independientes en el lado carcasa y lado tubos del intercambiador.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

- En este caso el agua se acumula en una balsa con capacidad para aportar agua durante 30 días para la refrigeración del sistema EG

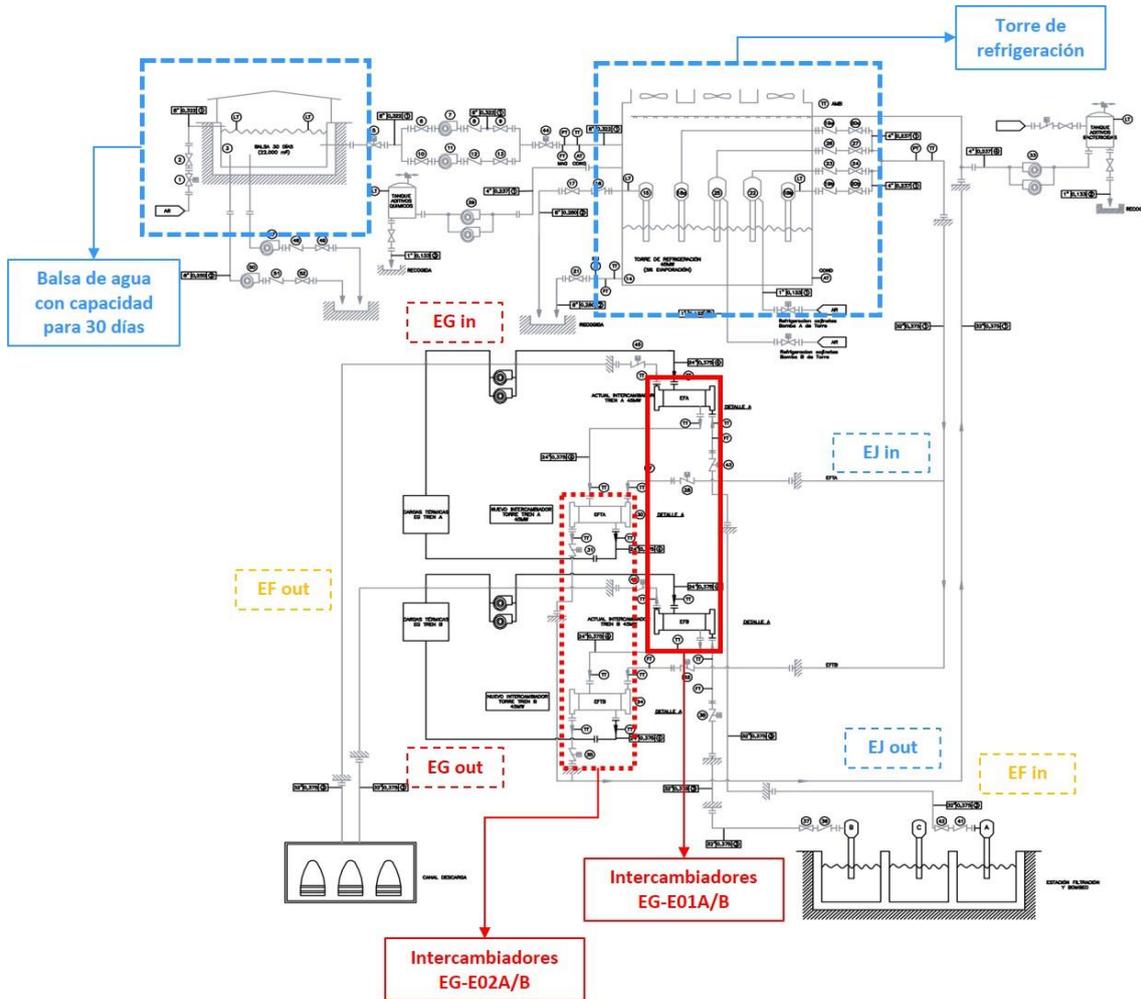


Imagen 2.3 – Opción 1B con balsa

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

- En este caso el agua se acumula en un depósito con capacidad para aportar agua durante 7 días para la refrigeración del sistema EG

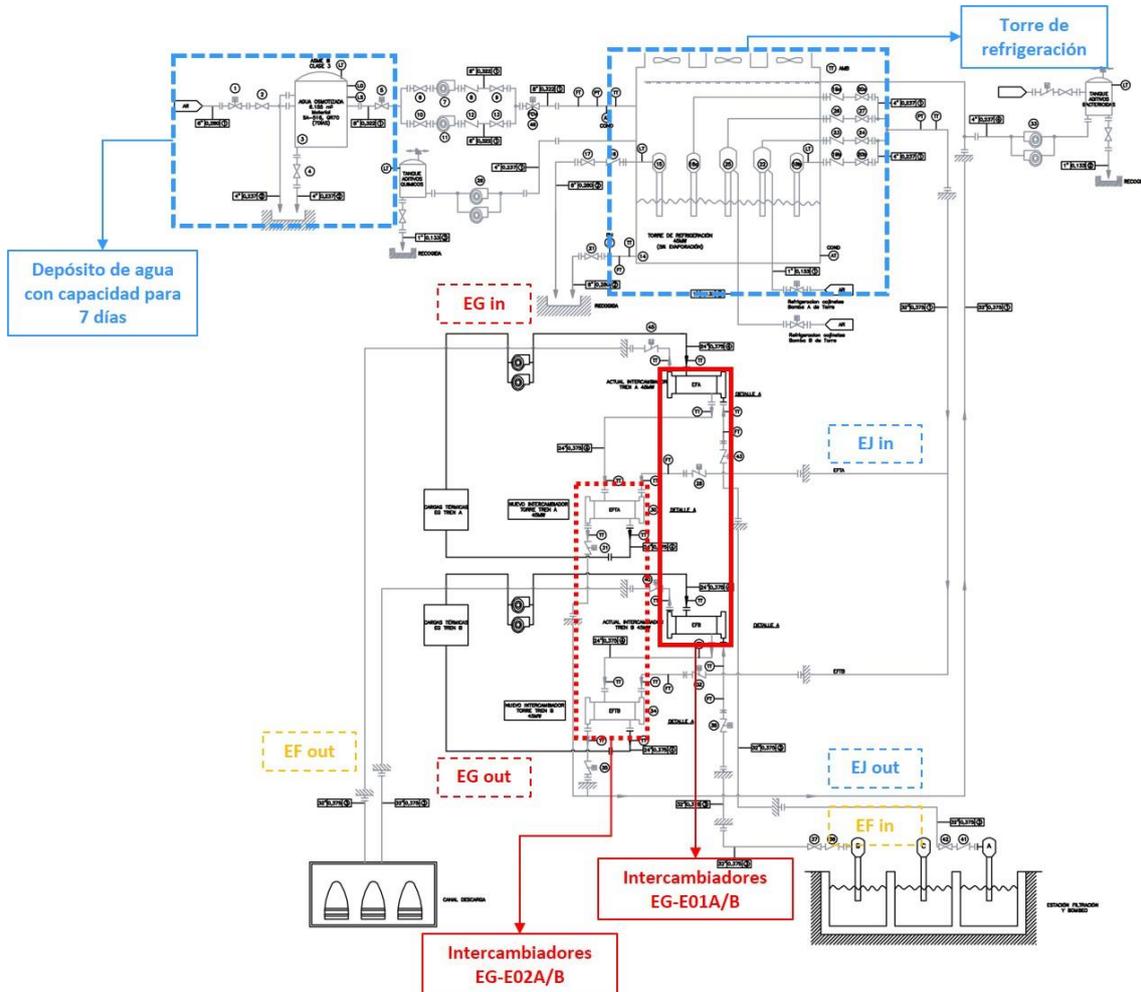


Imagen 2.4 – Opción 1B con depósito

Opción 2: Esta es la opción equivalente a la 1 B, puesto que se añade un nuevo intercambiador en serie en el lado EG de cada tren (EG-A y EG-B). En el lado EJ estos intercambiadores están cada uno en paralelo con una nueva torre de refrigeración, constituyendo los trenes EJ-A y EJ-B. En este caso los trenes EF quedarían desclasificados y pasarían a emplearse en operación normal de la central.

En el proyecto de esta opción se definen los siguientes edificios y componentes:

- balsa
- dos torres de refrigeración
- dos nuevos intercambiadores EG
- edificio eléctrico
- ampliación edificio Refrigeración de Componentes

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

En este caso no se da el problema de mezcla de aguas porque los circuitos de agua de mar y agua de la balsa son circuitos separados. Presenta el inconveniente de requerir una interconexión importante con el sistema EG, la inclusión de un número importante de válvulas, y el tener dos sistemas de bombeo en paralelo.

- En este caso el agua se acumula en una balsa con capacidad para aportar agua durante 30 días para la refrigeración del sistema EG. Sólo se contempla la instalación de la balsa ya que esta dispone de mayor capacidad de almacenamiento.

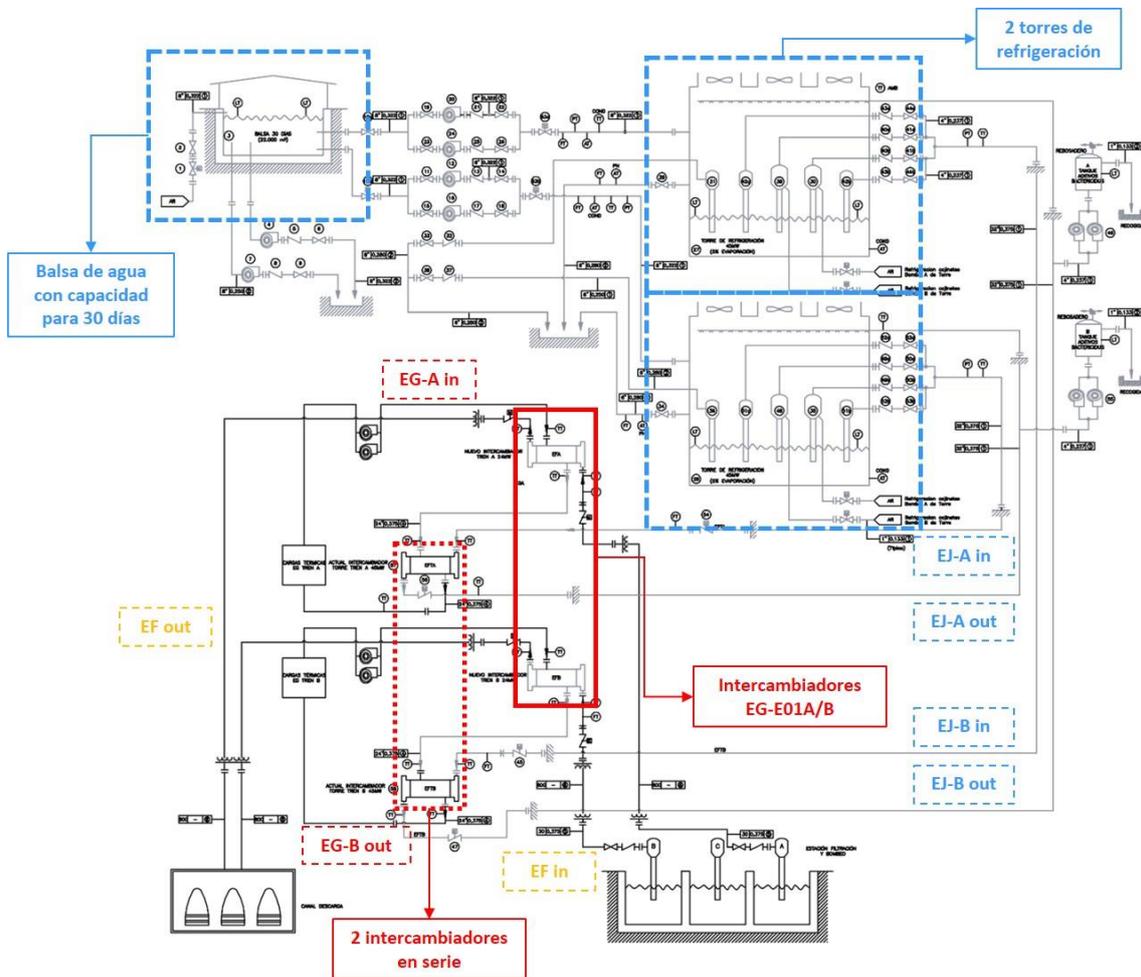


Imagen 2.5 – Opción 2 con balsa

Presentadas estas 3 alternativas de diferente disposición de equipos, el Cliente finalmente eligió la última alternativa debido a que se buscaba un sistema que asegure el funcionamiento seguro de la planta.

Después de analizar detenidamente el funcionamiento de la propuesta 2 se decidió cambiar la disposición de los equipos. Los nuevos intercambiadores se instalarán finalmente en paralelo a los existentes.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

En la siguiente imagen se representa de manera esquemática la situación antes de la modificación de los equipos, sólo con los Sistema EG y EF:

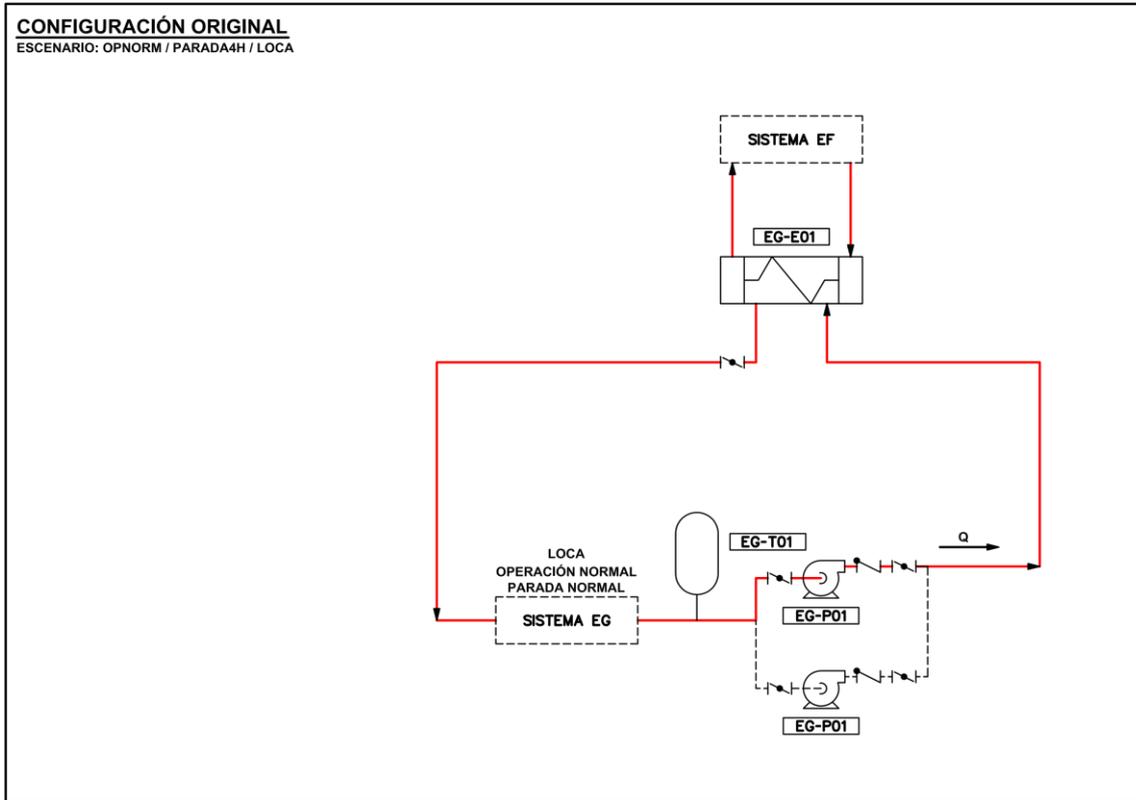


Imagen 2.6 – Configuración original

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Esta es la disposición inicial que se había planteado, con los intercambiadores nuevos en serie con los intercambiadores EG:

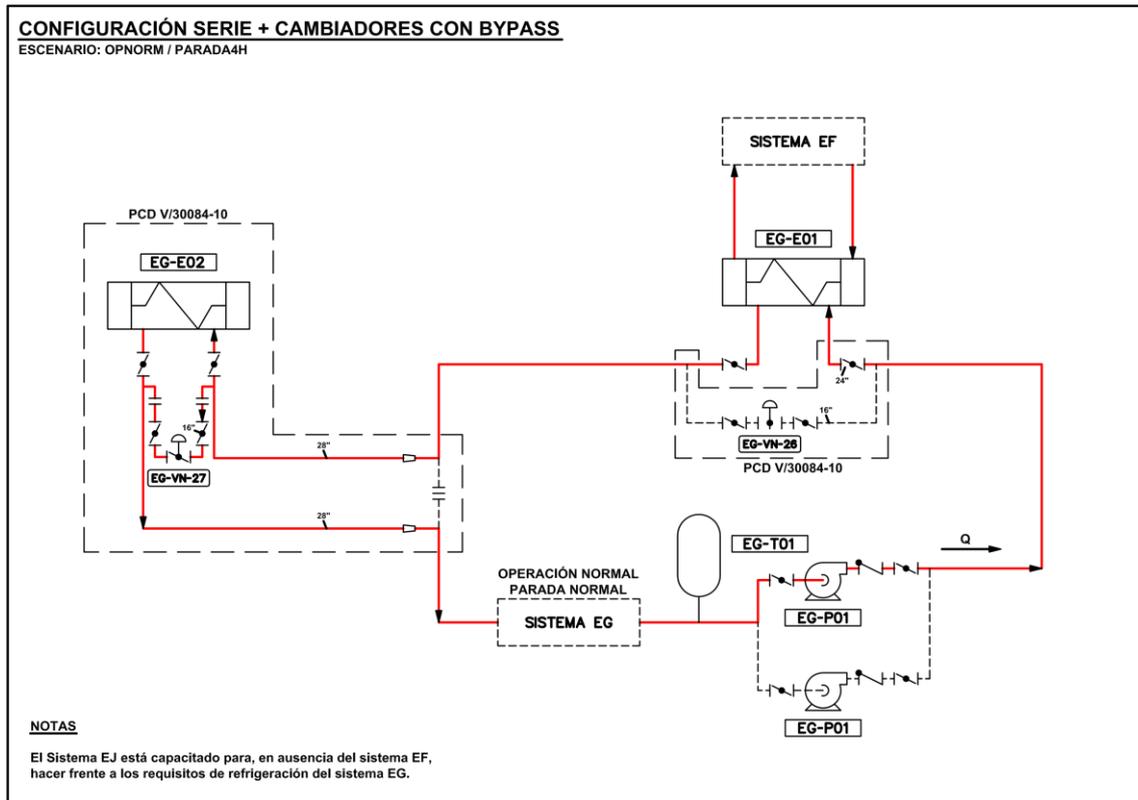


Imagen 2.7 – Configuración serie. Operación normal y parada

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

En caso de necesitarse la entrada en funcionamiento el sistema EJ (accidente LOCA) mediante válvulas neumáticas se cierra el aporte de agua del sistema EF y mediante otras válvulas neumáticas se abre la alimentación desde la balsa hacia los nuevos intercambiadores:

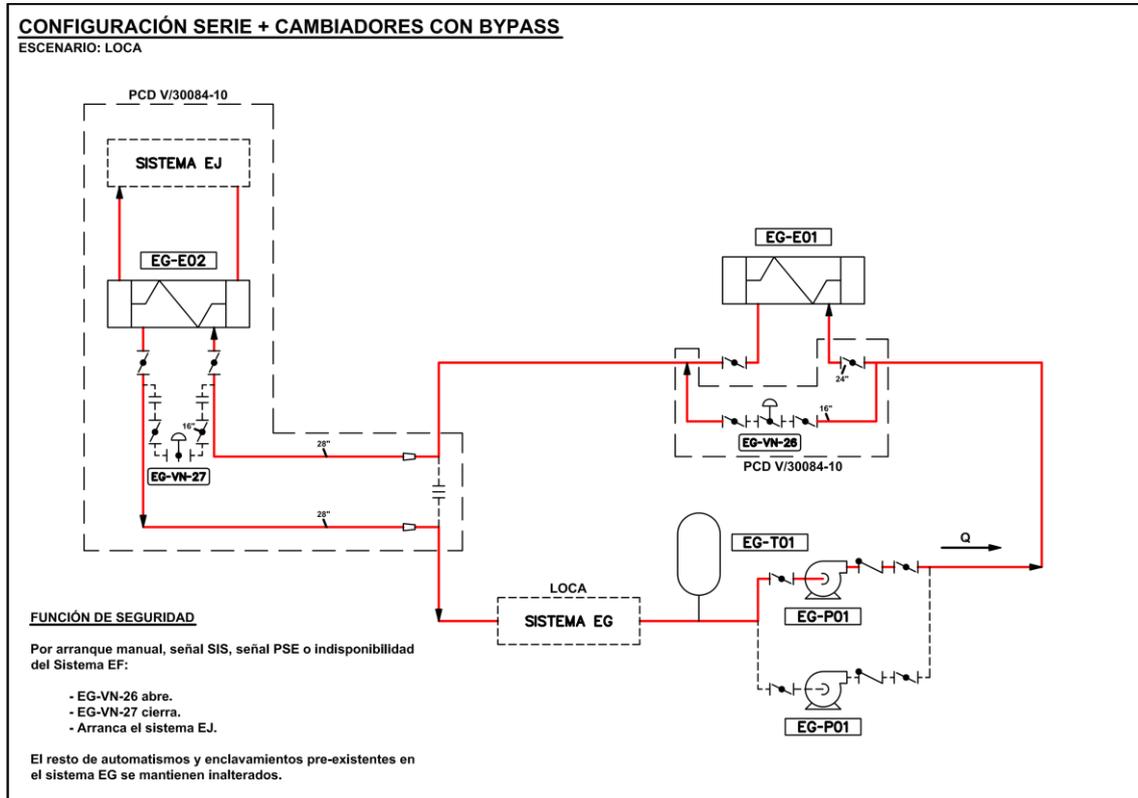


Imagen 2.8 – Configuración serie. LOCA

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Finalmente se ha decido realizar la conexión de los intercambiadores en paralelo en vez de en serie. Según se indica en el siguiente esquema:

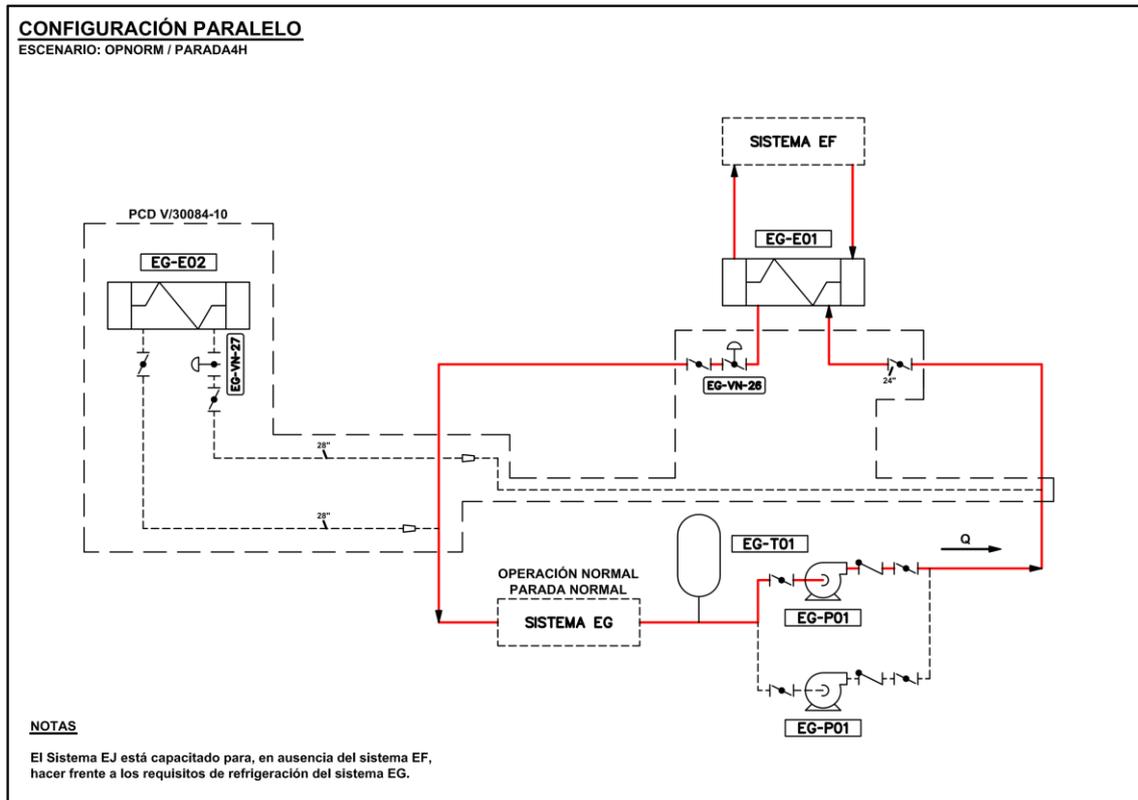


Imagen 2.9 – Configuración paralelo. Operación normal y parada

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Este será el funcionamiento del sistema de refrigeración en caso de producirse LOCA.

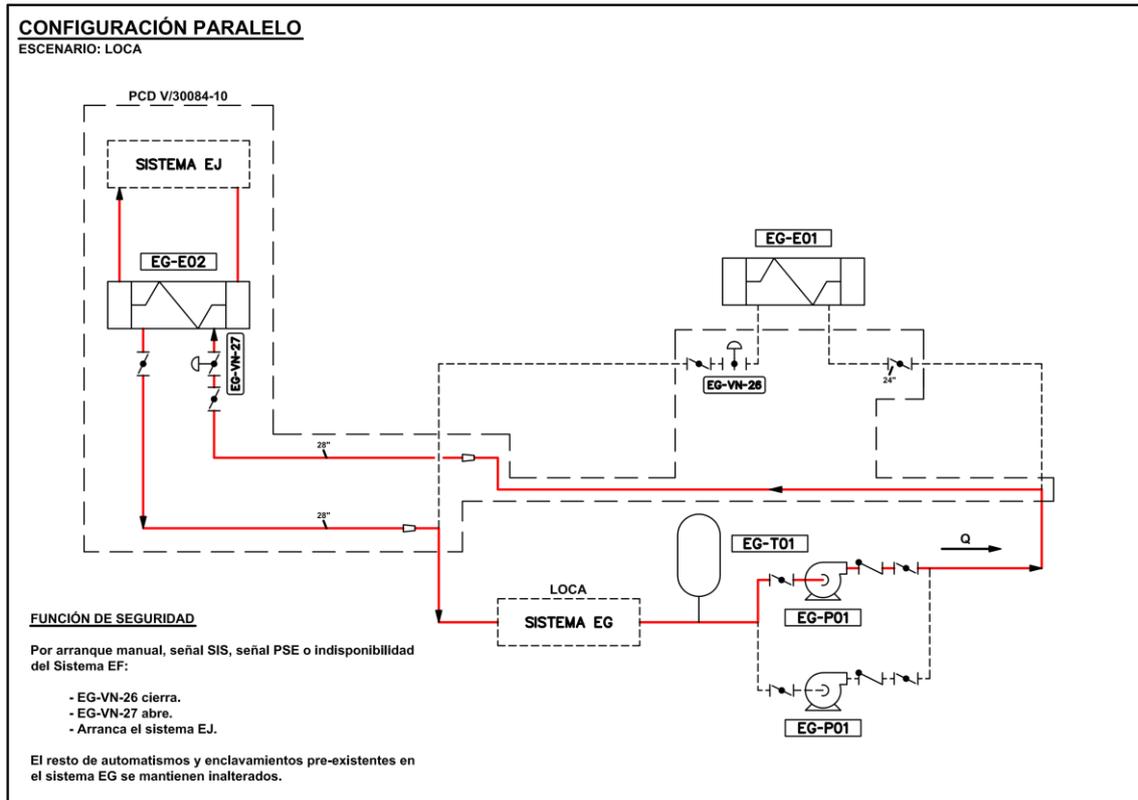


Imagen 2.10 – Configuración paralelo. LOCA

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

En la siguiente tabla se realiza una comparación entre las dos disposiciones planteadas, serie o paralelo, para la nueva configuración del Sistema EG.

Nº	Parámetro	Paralelo	Serie	Comentarios
#01	Impacto general	✓	✗	SERIE: Requiere mayor metraje de tubería a instalar para su correcto funcionamiento
#02	Mantenibilidad componentes existentes	✓	✗	SERIE: Los bypasses que se instalan para aislar a los nuevos equipos condicionan la mantenibilidad de los equipos ya existentes.
#03	Mantenibilidad componentes nuevos	✗	✓	PARALELO: En esta situación se instalará una válvula neumática que dificultará el mantenimiento de los nuevos equipos.
#04	Uso simultáneo de EF y EJ	✓	✗	PARALELO: Permite el uso simultáneo de ambos sistemas a) sin comprometer el caudal de licenciamiento, cada uno de los circuitos utiliza focos fríos diferentes, y b) sin bypass en ninguno de los dos, es decir no es necesario el uso de by-pass para que funcione uno u otro de los sistemas
#05	Caudales de operación	=	=	GENERAL: Ya que son dos circuitos bastante parecidos en cuanto a los equipos que utilizan, por lo que, ambos sistemas son esencialmente equivalentes respecto a la resistencia hidráulica que generan.
#06	Transferencia de Calor	=	=	GENERAL: Ambas configuraciones no se distinguen respecto a su capacidad de disipación, es decir deben disipar el mismo calor proveniente del sistema EG.
#07	Interferencia termodinámica	✗	✓	SERIE: Debido a la presencia del sistema de recirculación EJ (tratamiento químico), el agua de la balsa tendrá tendencia a adquirir calor del sistema EG, aun cuando el Sistema EJ se encuentra detenido. Esto puede llevar a: <ul style="list-style-type: none"> - Un aparente incremento de rendimiento del Sistema EF. - Un calentamiento de la balsa. - Leve incremento de consumo de agua.
#08	Mantenibilidad Intercambiador EF	✓	✗	PARALELO: Permite mantener el lado EG del intercambiador EG-E01 sin comprometer su disponibilidad/operabilidad. SERIE: Con un by-pass no es suficiente para permitir el aislamiento del lago EG del cambiador.
#09	Coste de ejecución	✓	✗	SERIE: La configuración serie presenta la mayor complejidad de desarrollo, tanto por interferencias como por volumen de instalación.

Tabla 2-1 - Comparación configuración serie/paralelo

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Como se ha visto en esta tabla, la configuración en paralelo presenta mayores ventajas que la configuración en serie.

Por tanto, a partir de este momento el sistema EJ finalmente tendrá dos intercambiadores en paralelo con los intercambiadores existentes del Sistema EG.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

3 METODOLOGÍA

En este apartado se va a exponer la manera en la que se ha realizado este trabajo.

Descripción general

Al tratarse de un proyecto con la aplicación directa en una central nuclear lo primero que se ha realizado es recopilar información necesaria para comprender el funcionamiento de las centrales nucleares, y más concretamente sobre cómo se realiza la refrigeración del reactor y del resto de los componentes. Las fuentes de información que se han utilizado para ello se indican en el apartado **8. BIBLIOGRAFÍA**.

Una vez conocido el funcionamiento de la refrigeración en las centrales PWR se empezó a analizar el funcionamiento del Sistema de Agua de Refrigeración de Componentes (EG) en la central estudiada. El punto más importante de este análisis fue la identificación y extracción de las cargas térmicas que el sistema debe evacuar. Se comprobó como en función del modo de operación de la central estas cargas pueden variar significativamente. Las cargas térmicas y las temperaturas de funcionamiento se indican a continuación en las Hipótesis de partida.

Posteriormente se realizó un estudio preliminar para presentar al Cliente varias alternativas de disposición de los equipos para el nuevo Sistema de Agua de Salvaguardias Tecnológicas.

Una vez elegida la opción que mayor seguridad proporcionaba en el funcionamiento se ha continuado con el dimensionamiento previo de los equipos de la nueva instalación. Se han definido las temperaturas de funcionamiento de los equipos y sus dimensiones aproximadas.

A continuación se realizó la planificación de los trabajos que serán necesarios realizar para la ejecución del proyecto.

Finalmente se ha realizado un presupuesto aproximado de lo que podría llegar a costar la realización de este proyecto.

Hipótesis de partida

Los datos de partida para la realización de los cálculos han sido establecidos, teniendo en cuenta los valores utilizados en el sistema existente actualmente - Sistema EF, para asegurar el correcto funcionamiento del nuevo sistema, y son los que se exponen a continuación.

- Cargas térmicas en diferentes modos de operación:

Modos operación	Carga térmica Tren A	Carga Térmica Tren B
Operación Normal	23,66 MW	N/A*
Parada Normal	43,53 MW	29,17 MW
LOCA	42,01 MW	42,01 MW

Tabla 3-1 – Cargas térmicas

*En Operación Normal sólo funciona uno de los trenes.

- Temperaturas de funcionamiento
 - Sistema EF

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Estas son las temperaturas de funcionamiento del Sistema EF tras la modificación:

	Operación Normal	Parada Normal	LOCA
Temperatura de agua del mar	24,5[°C]	24,5[°C]	24,5[°C]*
Temperatura máxima de salida de EG-E01A/B (lado EG)	35[°C]	48,9[°C]	48,9[°C]*

Tabla 3-2 – Temperaturas máximas de EG-E01A/B

**Tras la modificación el Sistema EG ya no se refrigera por el Sistema EF en LOCA.*

- Sistema EJ

Estas son las temperaturas con las que debe funcionar el nuevo sistema:

	Operación Normal	Parada Normal	LOCA
Temperatura de la balsa	27,8 [°C]	35 [°C]	35 [°C]
Temperatura ambiental exterior bulbo húmedo	24,5 [°C]	24,5 [°C]	24,5 [°C]
Temperatura máxima de salida de EG-E02A/B (lado EG)	35 [°C]	48,9 [°C]	48,9 [°C]

Tabla 3-3 – Temperaturas máximas de EG-E02A/B

Suposiciones

- Tanto para el agua del mar como para el agua de la balsa se ha supuesto que las propiedades como la densidad, viscosidad, etc. son del agua estándar
- Se supone el valor de la evaporación de agua en la torre del 0,89% del caudal total de circulación
- Se supone el valor del arrastre del agua en la torre por el movimiento del aire al realizarse el enfriamiento del 0,01% del caudal de circulación
- Se supone un valor medio de evaporación de agua en la balsa de 10,5 [mm/día]

Realización de los cálculos

Para la realización de los cálculos se han utilizado diferentes hojas Excel, que se adjuntan en el **Anexo II**.

Para la obtención de datos como densidad, viscosidad, coeficientes de pérdida de carga en accesorios se ha utilizado el programa PIPE FLOW (fuente IDOM).

También se han utilizado las tablas con propiedades termodinámicas utilizadas en la asignatura de Termotecnia para comprobar los valores del coeficiente de transferencia de calor en los intercambiadores.

Para el cálculo de pérdida de carga se han utilizado las siguientes ecuaciones:

- Pérdida de carga en equipos

$$PdC_{equipos} = K \cdot Q_V^2$$

Donde:

PdC_{eq} – pérdida de carga en equipos [Pa]

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Q_v – caudal volumétrico [m^3/h]

K – constante de proporcionalidad $K = 2,12 \cdot 10^{-3}$

- Pérdida de carga en accesorios

$$PdC_{accesorios} = \sum_i K_i \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

Donde:

PdC_{acc} – pérdida de carga en accesorios [Pa]

K_i – coeficiente individual de pérdida de carga (adimensional)

ρ – densidad del fluido [kg/m^3]

v – velocidad de flujo [m/s]

- Pérdida de carga en tuberías

La pérdida de carga en tuberías se calcula de la siguiente manera:

- Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{v \cdot D_{int} \cdot \rho}{\mu}$$

Se considera que a partir de un número de Reynolds mayor de 4000 el régimen de flujo es turbulento en la tubería

- Para el caso de régimen laminar la pérdida de carga se calcula según la siguiente expresión:

$$PdC_{laminar} = \frac{32 \cdot \mu \cdot v}{D_{int}^2 \cdot \rho \cdot g}$$

- Para el caso de régimen turbulento primero se calcula el factor de fricción de Darcy utilizando la siguiente expresión:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D_{int}} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right)$$

- El siguiente paso es el cálculo de la pérdida de carga, mediante la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$PdC_{turbulento} = f \cdot \frac{v^2}{2 \cdot D_{int} \cdot g}$$

Donde:

$PdC_{lam/tur}$ – pérdida de carga flujo laminar/turbulento [Pa]

Re – número de Reynolds (adimensional)

v – velocidad del flujo [m/s]

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

D_{int} – diámetro interior de la tubería [m]

ρ – densidad del fluido [kg/m^3]

μ – viscosidad dinámica [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]

f – factor de fricción (adimensional)

g – aceleración de la gravedad de $9,81$ [m/s^2]

ϵ – rugosidad del material de las tuberías [m]

La pérdida de carga por metro lineal total es igual a:

$$PdC_{total} = PdC_{equipos} + PdC_{accesorios} + PdC_{laminar/turbulento}$$

Las curvas características de las bombas y las pérdidas de carga en las tuberías se ajustan a la siguiente ecuación:

$$TDH = A + B \cdot Q_v + C \cdot Q_v^2 + D \cdot Q_v^3 + E \cdot Q_v^4 + \dots$$

Donde:

TDH: Altura manométrica [kg/cm^2]

A, B, C, D, E,... - constantes

Q_v : Caudal volumétrico [m^3/h]

Para el cálculo de balances de energía en los intercambiadores de calor se han utilizado las siguientes ecuaciones:

$$Q_{lado_caliente} = Q_{lado_frío} = Q = \dot{m} \cdot Cp \cdot (T_{in} - T_{out}) = A \cdot U_c \cdot \Delta T_{ml}$$

Con,

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Donde:

Q – carga térmica a evacuar [MW]

\dot{m} – flujo másico [kg/s]

Cp – calor específico [$\text{kJ}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$]

T_{in} – temperatura de entrada [$^\circ\text{C}$]

T_{out} – temperatura de salida [$^\circ\text{C}$]

A – área de intercambio de calor [m^2]

U_c – coeficiente total de transferencia de calor [$\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$]

ΔT_{ml} – diferencia de temperaturas media logarítmica [$^\circ\text{C}$]

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

4 MEMORIA

4.1 DESCRIPCIÓN CENTRAL NUCLEAR PWR

Dependiendo del tipo de central, la refrigeración del reactor se puede realizar en diferentes etapas. En este trabajo el estudio se ha realizado para una central de tipo PWR (Pressurized Water Reactor – Reactor de Agua a Presión). En este tipo de centrales el agua se utiliza para la refrigeración del reactor y además como moderador de neutrones. Otra particularidad de este sistema es que el agua que se encuentra en contacto directo con el reactor está presurizada para evitar que el agua alcance su punto de ebullición al absorber el calor de la fisión del uranio.

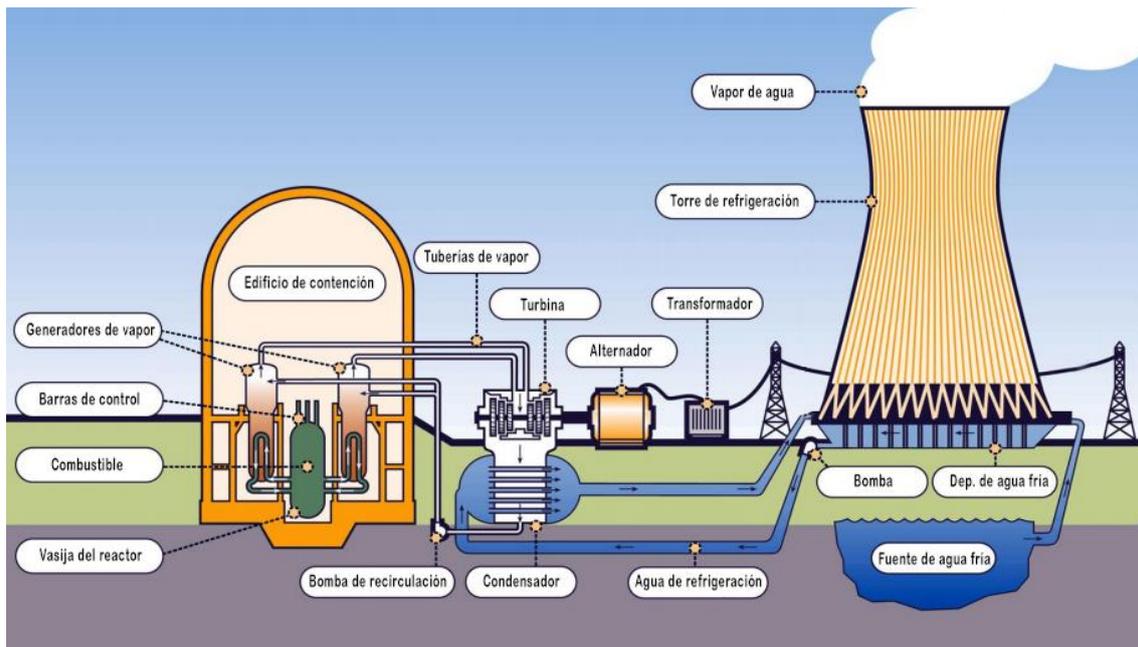


Imagen 4.1 – Central nuclear tipo PWR

En las secciones siguientes se realiza la descripción del sistema de refrigeración de una central PWR, así como también de los equipos que lo componen, con el objetivo de describir de manera breve su funcionalidad para entender mejor el trabajo realizado.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

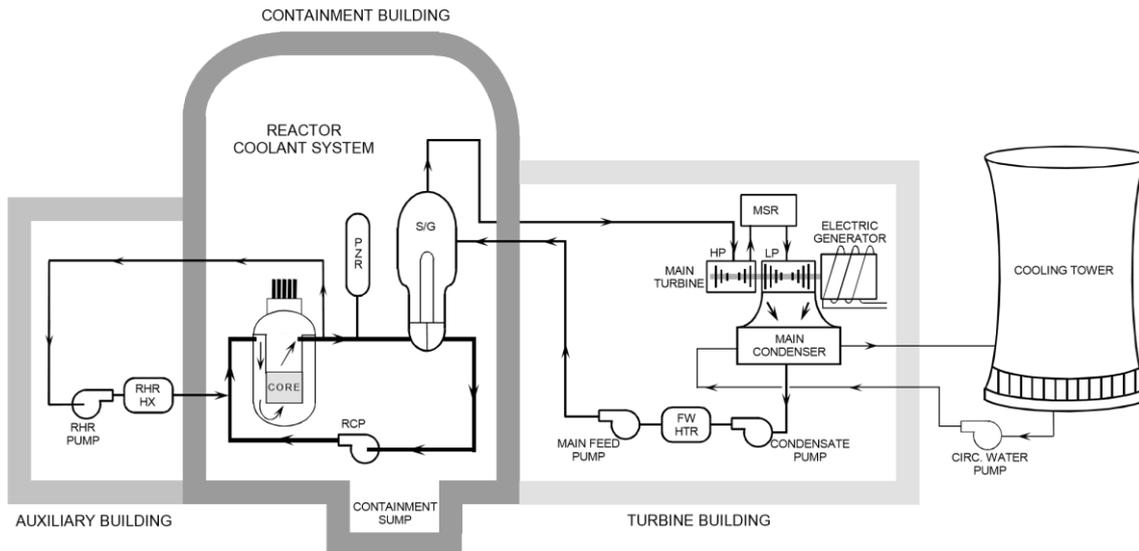


Imagen 4.2 – Esquema de una central PWR

Para convertir el calor generado debido al combustible nuclear a energía eléctrica para el uso industrial o residencial, en caso de una central PWR, se utilizan estos sistemas:

- El **Sistema primario** (circuito primario) transfiere el calor generado en el reactor al generador de vapor. Este calor se genera al enfriar el reactor en la fisión de los átomos de uranio. El agua de refrigeración no entra en ebullición y permanece en estado líquido debido a que se encuentra bajo presión. Este sistema lo componen los siguientes equipos:
 - Vasija del reactor
 - Generadores de vapor
 - Bombas de refrigeración del reactor
 - Presionador
 - Tuberías y válvulas de conexión

El circuito primario es un circuito cerrado, el agua circula por el sistema gracias al impulso de las bombas de refrigeración del reactor.

- En el **Sistema secundario** (circuito secundario) se produce el vapor en el generador de vapor. Este vapor se trasfiere a la turbina de vapor y mediante el generador de la turbina, se convierte en electricidad. Después de pasar por la parte de la turbina de baja presión el vapor se dirige al condensador principal. El agua fría que fluye a través del condensador enfría el vapor para condensarlo. A continuación el agua condensada se bombea hasta el generador de vapor para empezar de nuevo el ciclo de generación. Este sistema se compone mayoritariamente de estos equipos:
 - Turbina de vapor con secciones de alta y baja presión
 - Condensador
 - Bombas del condensado
 - Generador eléctrico
 - Recalentadores intermedios
 - Tuberías y válvulas de conexión

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

El circuito secundario también es cerrado y no hay mezcla entre los sistemas primario y secundario.

- También hay que indicar que existe otro sistema, que es el **Circuito terciario** que lo compone el foco frío. Se utiliza para aportar agua fría al condensador de vapor. Para ello se utilizan diferentes tipos de fuentes según la ubicación de la central:
 - Mar
 - Río
 - Torres de refrigeración
 - Balsas
 - O una combinación de las anteriores

Este circuito es abierto a diferencia de los anteriores, el agua para el condensado después de enfriar el vapor sobrante retorna a la fuente de donde se ha extraído.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

4.2 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE UNA CENTRAL NUCLEAR

A continuación se explica el funcionamiento de cada equipo de los que se compone el sistema de refrigeración de una central PWR.

Circuito primario

En la siguiente imagen se representa la disposición típica del sistema, aunque dependiendo de que tecnológico (fabricante) se trate esta disposición podría variar.

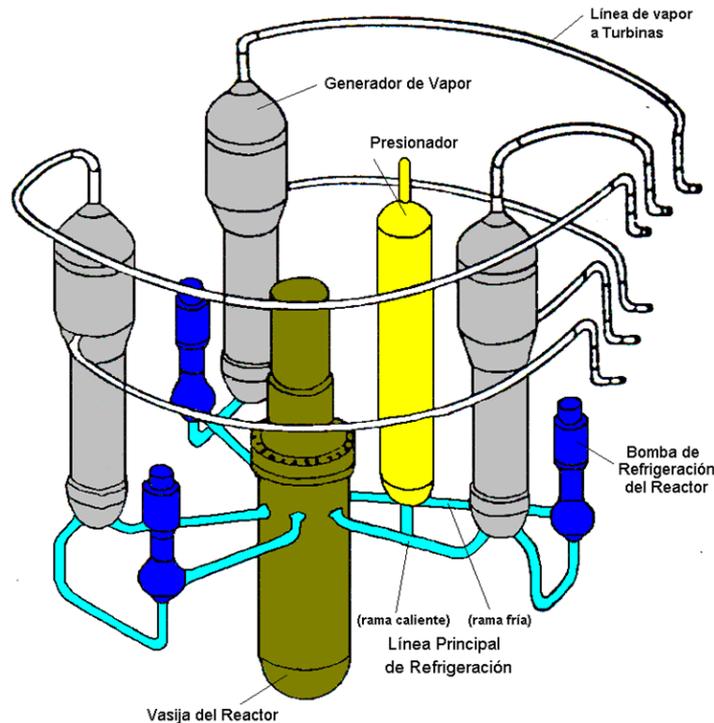


Imagen 4.3 – Esquema circuito primario de una central PWR

Lo componen la vasija del reactor, tres generadores de vapor, tres bombas de refrigeración del reactor y un presionador.

Vasija del reactor

Se divide en la vasija, el cilindro del núcleo y el núcleo del reactor. Es un recipiente cilíndrico con extremos hemisféricos, con la cabeza superior desmontable para la recarga del reactor. Dispone de orificios de entrada y salida para el refrigerante del reactor.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

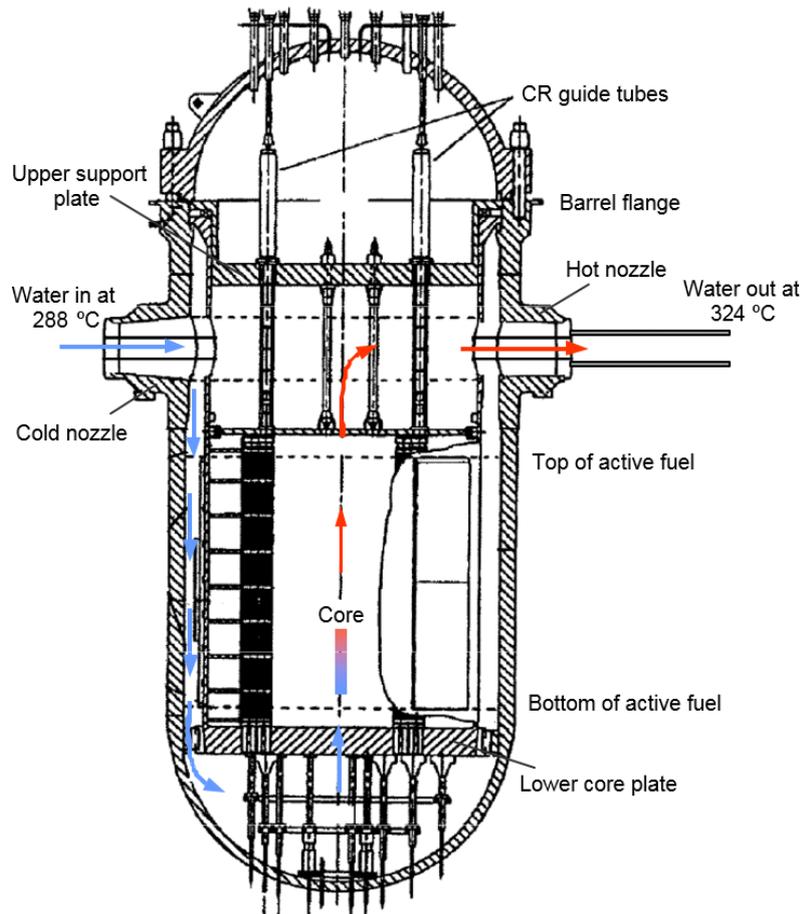


Imagen 4.4 – Esquema vasija del reactor

El refrigerante fluye a través del reactor de la siguiente manera:

- El agua entra a través del orificio de entrada y choca contra el cilindro del núcleo
- A continuación el agua fluye hacia abajo entre el espacio existente entre la vasija y el cilindro del núcleo
- Al alcanzar el fondo de la vasija el agua se fuerza a pasar por el núcleo del reactor, de esta manera refrigerando el combustible para eliminar el calor que se produce durante la fisión
- Finalmente el agua caliente sale por un orificio superior y se dirige al generador de vapor

Generador de vapor

Dentro del generador de vapor, que en sí es un intercambiador de calor, el agua caliente del circuito primario fluye a través de los tubos y el agua de alimentación, o refrigerante secundario, fluye en el espacio entre la carcasa y los tubos, recibiendo el calor de estos últimos. El agua de alimentación empieza a hervir al absorber el calor en el generador formándose así el vapor. El objetivo es generar el vapor de mayor pureza, es decir, con menor contenido de agua líquida posible.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

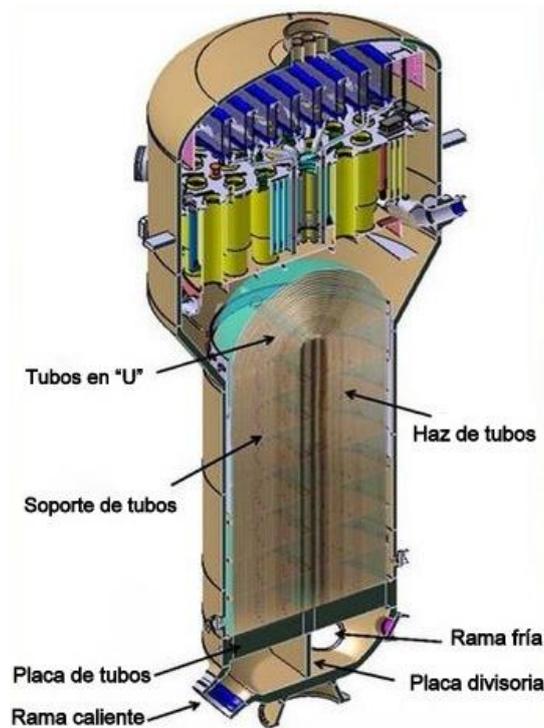


Imagen 4.5 – Esquema Generador de vapor

A continuación el vapor producido se dirige a la turbina principal y el refrigerante primario se succiona mediante las bombas de refrigeración del reactor.

En la parte superior del generador se ubican los separadores de humedad, equipos que evitan que el vapor arrastre humedad que podría perjudicar el funcionamiento de la turbina.

Bombas de refrigeración del reactor

La principal característica de estos equipos es que son de un tamaño y potencia considerables para poder transportar el agua de refrigeración desde los generadores de vapor hasta la vasija del reactor.

Presionador

Es el equipo que mantiene la presión en el circuito primario constante y sólo se instala en las centrales de tipo PWR.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

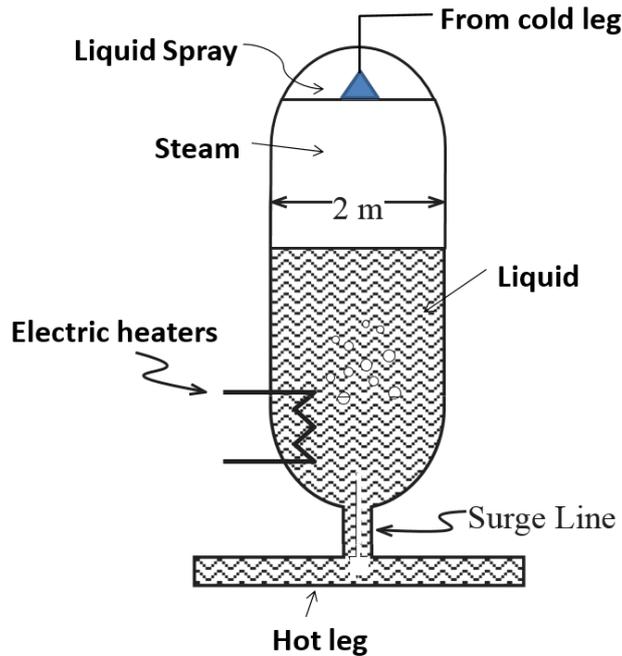


Imagen 4.6 – Esquema Presionador

Esta regulación se realiza mediante unas resistencias, en la parte inferior, y unas duchas, en la parte superior, que enfrían o calientan el contenido del presionador. Con ello se consigue disminuir o aumentar la presión dentro del circuito primario.

Circuito secundario

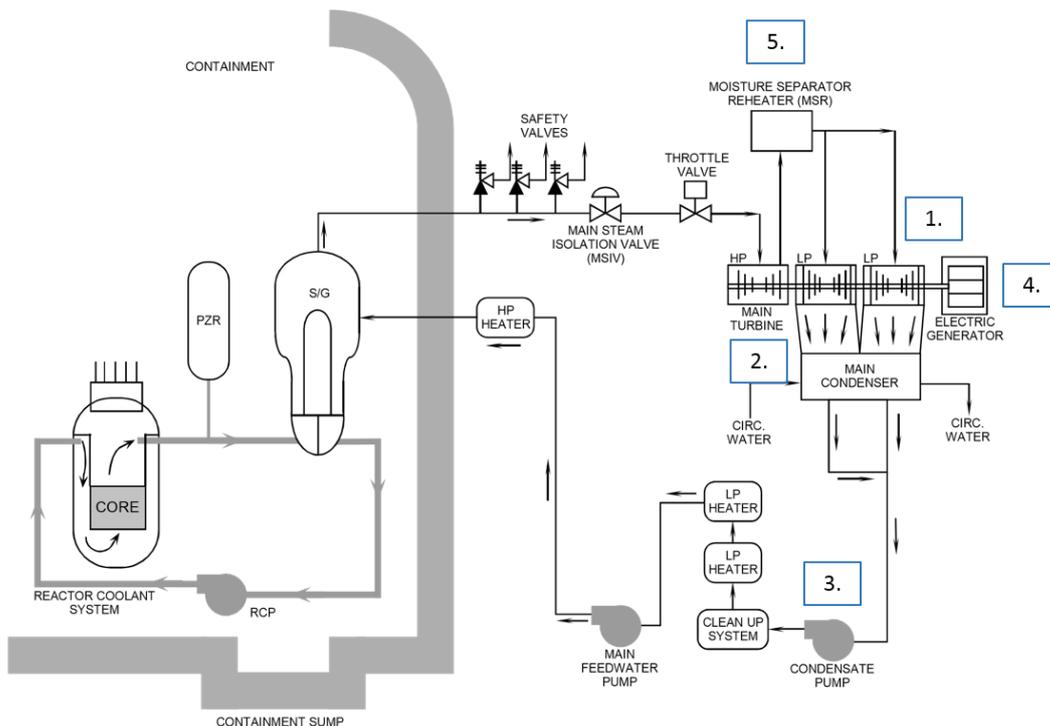


Imagen 4.7 – Esquema circuito secundario de una central PWR

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

1. Turbina de vapor

El calor producido en el generador de vapor se transforma en energía mecánica en la turbina.

Después de la etapa de alta presión el vapor se dirige hacia el recalentador intermedio para eliminar la humedad. El vapor se seca y se sobrecalienta usando otro vapor como fuente de calor. Después de pasar por la etapa de baja presión el vapor restante se condensa en el condensador. Este condensador funciona con un alto grado de vacío para permitir la mayor eliminación de energía por la turbina de baja presión.

En el esquema presentado se utiliza un equipo para la eliminación de impurezas. Esto se realiza para ensuciar lo menos posible el generador de vapor y no disminuir su capacidad de transferencias de calor.

A continuación el condensado se precalienta mediante la extracción desde la turbina de baja para reducir el salto térmico a la entrada del generador de vapor.

De allí el condensado precalentado se bombea hacia el generador de vapor de nuevo.

2. Condensador

El vapor restante a la salida de la turbina se enfría en el condensador mediante el agua desde el circuito terciario.

3. Bombas de condensado

Las bombas de condensado bombean el agua hacia el generador de vapor.

4. Generador eléctrico

El alternador está conectado a la turbina mediante un eje que le transmite el giro de la turbina. En esta etapa se transforma la energía mecánica en energía eléctrica.

5. Recalentadores intermedios

Sobrecalientan el vapor a la salida de la turbina para eliminar la humedad en la corriente.

Edificios de una central nuclear

Se exponen a continuación los edificios de los que se compone normalmente una central nuclear:

Edificio de contención

Alberga en su interior el reactor nuclear y los equipos asociados con materiales con alto grado de reactividad. En caso de una central PWR dentro de este edificio se encuentra la vasija del reactor, los generadores de vapor, las bombas de refrigeración del reactor y el presionador.

Edificio de combustible

Almacena el combustible fresco así como el combustible ya gastado. A su vez el combustible gastado se guarda en piscinas hasta el momento de su gestión final.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Edificio de turbinas

Donde se ubican el grupo o grupos turbina-alternador, los recalentadores-separadores de humedad, los condensadores y el sistema de agua de alimentación de los generadores de vapor.

Edificio de salvaguardias

Donde se ubican los equipos de funcionamiento en emergencia y sistemas de seguridad en caso de producirse algún accidente en la central.

Edificio Eléctrico

Donde se ubican los sistemas eléctricos, centros de control de motores, cabinas de potencia y la Sala de Control desde donde se controla toda la central.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

4.3 SEGURIDAD EN LAS CENTRALES NUCLEARES

Otro concepto a tener cuenta para entender mejor el planteamiento de este trabajo es la seguridad en las centrales nucleares.

La seguridad nuclear tiene como objetivo la defensa de las personas y el medio ambiente frente a los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes pero sin renunciar a los beneficios que la utilización de la energía nuclear reporta a la humanidad.

Para conseguir una protección adecuada es necesario establecer una serie de medidas técnicas y administrativas que garanticen esta seguridad.

- **Barreras de contención**

Las barreras físicas de seguridad son cuatro:

- La primera barrera la forman las pastillas de combustible, que debido a su estructura cerámica retienen las sustancias radiactivas producidas en la fusión
- La segunda barrera la componen las varillas que contienen el combustible, reteniendo las sustancias radiactivas que se han podido escapar de las pastillas
- La tercera la compone el circuito de refrigeración formado por la vasija del reactor que se construye de un acero especial
- La cuarta barrera es el edificio de contención conformado de hormigón armado sobre una losa de hormigón y recubierto interiormente con una chapa de acero para asegurar su hermeticidad

Las centrales nucleares se diseñan para funcionar de forma segura durante toda su vida útil y en caso de producirse algún accidente imprevisto están dotas de sistemas automáticos de seguridad que entran en funcionamiento inmediatamente tras el accidente. Estos sistemas deben asegurar:

- Control de la reacción para realizar una parada segura del reactor
- La refrigeración ininterrumpida del reactor
- Confinamiento de las sustancias radiactivas dentro de las barreras físicas de la central
- Mitigar las consecuencias radiológicas

Para los casos de fallos técnicos, mecánicos o errores humanos se utiliza el término de la Defensa en Profundidad, es decir:

- Protección multibarrera – consiste en barreras sucesivas de aislamiento para evitar el escape del material radiactivo al exterior
- Salvaguardias tecnológicas – realizan la protección de las 4 barreras físicas. En su diseño se considera la aparición de sucesos poco probables pero posibles, como por ejemplo fenómenos naturales, tales como terremotos o inundaciones, o intrínsecos a la propia central como puede ser la rotura de una tubería de agua de refrigeración. Estas salvaguardias deben cumplir unos estándares de calidad muy exigentes y en su diseño se calculan para que sean redundantes, es decir el sistema se dobla para asegurar un correcto funcionamiento aunque se produzca un fallo de cualquier elemento del sistema de salvaguardias tecnológicas.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

- Salvaguardias administrativas – mediante Leyes, Decretos y Órdenes Ministeriales se impone al propietario de la planta una serie de normas para mantener los niveles técnicos requeridos durante el diseño, construcción y funcionamiento de la central
- Planes de emergencia – medidas adicionales para proteger al público y al medio ambiente

También se indica a continuación que es un Accidente Base de Diseño que es un término empleado para realizar el dimensionamiento del sistema de seguridad que se expone en este trabajo:

- **Accidente Base de Diseño**

El Proyecto de una central nuclear se basa en unos Criterios de Diseño en los que se anticipan los posibles accidentes que dentro de lo posible podrían ocurrir en la central y que en consecuencia afectarían a la seguridad nuclear.

Se denomina Accidente Base de Diseño (DBA o Design Basic Accident) a aquel que afectaría a la seguridad nuclear y como tal, la central tendrá que estar diseñada para evitar o mitigar sus efectos. Normalmente el accidente base de diseño está relacionado con la rotura de una tubería principal del NSSS (Nuclear Steam Supply System) y consiguiente pérdida de refrigerante del reactor.

El DBA puede ser de mayor o menor magnitud (se considera la rotura circunferencial de toda la tubería) pero también se considera de menor magnitud, denominándose entonces IBA (Intermediate Basic Accident) o SMA (Small Basic Accident).

- **LOCA**

Se considera como DBA la Pérdida de Refrigerante del Reactor (LOCA o Loss of Coolant Accident), lo que podría implicar la fusión del núcleo. Es decir, no siempre requiere rotura de tubería, bastando con la falta de circulación del refrigerante.

No obstante, y desde el punto de vista de las bases de diseño, el LOCA se considera asociado a la Rotura de una Tubería de Vapor Principal (MSLB o Main Steam Line Break), debido a combinar los efectos del LOCA con los del aumento de presión, temperatura y liberación de material radiactivo en la atmósfera de la contención.

Dentro de los DBE, se considera la Rotura de una Línea de Alta Energía (HELB o High Energy Line Break), dentro o fuera de contención y sin tener que afectar al refrigerante. Por ejemplo la rotura de la Línea de Agua de Alimentación Principal (MFWB o Main Feed Water Break).

Otro DBE es el terremoto SSE (Safe Shutdown Earthquake) y OBE (Operating Basic Earthquake), para el que deben estar calificadas todas las estructuras, sistemas y componentes relacionados con la seguridad.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

4.4 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS AFECTADOS

El principal objetivo del sistema de refrigeración de una central es enfriar el reactor para eliminar el calor generado en el proceso de fisión del combustible. Otro equipo a tener en cuenta es el condensador del circuito secundario que también requiere gran aporte de agua para la condensación del vapor.

Así mismo, aunque en menor medida, existen otros equipos que necesitan un aporte de agua del sistema de refrigeración para su correcto funcionamiento. El sistema EG es el que realiza la refrigeración de estos equipos, tal y como se describe a continuación.

4.4.1 Sistema de Agua de Refrigeración de Componentes

El sistema de agua de refrigeración de componentes suministra agua de refrigeración a diversos componentes de la central que contienen fluidos no radiactivos y potencialmente radiactivos durante la producción de energía, operaciones de parada y enfriamiento. Durante y después de los accidentes postulados, LOCA y MSLB, suministra agua de refrigeración a componentes relacionados con la seguridad.

Asimismo, constituye una barrera intermedia entre los sistemas potencialmente radiactivos a los que refrigera y los sistemas de agua de servicios esenciales (Sistema EF) y de agua de salvaguardias tecnológicas (Sistema EJ tras la modificación), que transfieren las cargas térmicas de esos sistemas al mar y al sumidero final de calor (la balsa) respectivamente, eliminando así, la posibilidad de un escape incontrolado de radiactividad.

El sistema consta esencialmente de dos lazos independientes y redundantes al 100% de capacidad, asociados a sendos trenes de seguridad y un lazo común y no redundante que puede ser interconectado o aislado a/de cualquiera de los otros dos lazos.

Los lazos independientes refrigeran a los siguientes componentes esenciales y relacionados con la seguridad:

- Cambiadores de calor del foso de combustible gastado
- Cambiadores de calor del RHR
- Bombas de carga
- Bombas del RHR
- Unidades de enfriamiento de la contención
- Carga térmica de las propias bombas de agua de refrigeración de componentes EG-P01A/B/C/D

El lazo compartido refrigera los siguientes componentes esenciales y no relacionados con la seguridad:

- Cambiador de calor de la descarga
- Cambiador de calor de agua de cierres
- Bombas del refrigerante del reactor
- Cambiador de calor de la descarga auxiliar
- Cambiador de calor del tanque de drenajes del refrigerante del reactor

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Del lazo compartido se deriva una rama que refrigera a los siguientes componentes no esenciales y no relacionados con la seguridad.

- Refrigerador de los compresores de aire
- Refrigeradores de muestras del detector de fallos del combustible
- Refrigeradores de muestras radiactivas y no radiactivas
- Refrigeradores no regenerativos de la purga de los generadores de vapor
- Evaporador de la recuperación de boro
- Desgasificador de la recuperación de boro
- Evaporador de los desechos líquidos

Las cargas térmicas absorbidas por el sistema EG en operación normal, así como en parada normal, pueden ser transferidas tanto al Sistema de Agua de Servicios Esenciales EF, como al sistema de agua de Salvaguardias Tecnológicas EJ.

Las cargas térmicas absorbidas por el sistema EG en LOCA se transfieren al Sistema EJ.

En las tablas siguientes se indican el caudal y la potencia necesarios para la refrigeración de los equipos indicados.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Operación Normal

EQUIPO	Tren A				Tren B			
	Q		P		Q		P	
	[gpm]	[m ³ /h]	[MBTU/h]	[MW]	[gpm]	[m ³ /h]	[MBTU/h]	[MW]
TRENES DE SEGURIDAD								
Cambiador de foso de combustible gastado	3.000,00	681,37	16,50	4,84	0,00	0,00	0,00	0,00
Cambiador RHR	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bomba de carga	95,00	21,58	0,25	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
Bomba de RHR	35,00	7,95	0,11	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Unidades de enfriamiento de la contención	4.400,00	999,35	13,20	3,87	0,00	0,00	0,00	0,00
Carga térmica de la bomba EG-P01	0,00	0,00	2,70	0,79	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Subtotal</i>	<i>7.530,00</i>	<i>1.710,25</i>	<i>32,76</i>	<i>9,60</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
LAZO COMPARTIDO ESENCIAL Y NO RELACIONADO CON LA SEGURIDAD								
Cambiador de la descarga	590,00	134,00	10,50	3,08	0,00	0,00	0,00	0,00
Cambiador de agua de cierres	150,00	34,07	1,53	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00
Bombas del refrigerante del reactor	1.308,00	297,08	6,15	1,80	0,00	0,00	0,00	0,00
Cambiador descarga auxiliar	210,00	47,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cambiador del tanque de drenaje	300,00	68,14	2,22	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Subtotal</i>	<i>2.558,00</i>	<i>580,98</i>	<i>20,40</i>	<i>5,98</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
RAMA NO ESENCIAL Y NO RELACIONADA CON LA SEGURIDAD								
Refrigerador de los compresores de aire	150,00	34,07	0,63	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00
Refrigeradores muestras fallos de combustible	36,00	8,18	0,50	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00
Refrigeradores muestras radiactivas y no radiactivas	72,00	16,35	0,55	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00
Refrigeradores de la purga	800,00	181,70	6,16	1,81	0,00	0,00	0,00	0,00
Evaporador recuperación de boro	927,00	210,54	10,30	3,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Desgasificador recuperación de boro	550,00	124,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evaporador desechos líquidos	766,00	173,98	9,43	2,76	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Subtotal</i>	<i>3.301,00</i>	<i>749,74</i>	<i>27,57</i>	<i>8,08</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
TOTAL	13.389,00	3.040,97	80,73	23,66	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 4-1 – Datos consumo Sistema EG en operación normal

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Parada Normal

EQUIPO	Tren A				Tren B			
	Q		P		Q		P	
	[gpm]	[m ³ /h]	[MBTU/h]	[MW]	[gpm]	[m ³ /h]	[MBTU/h]	[MW]
TRENES DE SEGURIDAD								
Cambiador de foso de combustible gastado	3.000,00	681,37	16,50	4,84	3.600,00	817,65	0,00	0,00
Cambiador RHR	3.320,00	754,05	92,50	27,11	4.000,00	908,50	92,50	27,11
Bomba de carga	95,00	21,58	0,22	0,06	110,00	24,98	0,00	0,00
Bomba de RHR	35,00	7,95	0,13	0,04	40,00	9,08	0,13	0,04
Unidades de enfriamiento de la contención	2.200,00	499,67	8,80	2,58	2.650,00	601,88	4,40	1,29
Carga térmica de la propia bomba EGP01	0,00	0,00	2,70	0,79	0,00	0,00	2,70	0,79
<i>Subtotal</i>	<i>8.650,00</i>	<i>1.964,63</i>	<i>120,85</i>	<i>35,42</i>	<i>10.400,00</i>	<i>2.362,10</i>	<i>99,73</i>	<i>29,23</i>
LAZO COMPARTIDO ESENCIAL Y NO RELACIONADO CON LA SEGURIDAD								
Cambiador de la descarga	654,00	148,54	4,80	1,41	0,00	0,00	0,00	0,00
Cambiador de agua de cierres	150,00	34,07	1,53	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00
Bombas del refrigerante del reactor	1.308,00	297,08	2,05	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00
Cambiador descarga auxiliar	210,00	47,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cambiador del tanque de drenaje	300,00	68,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Subtotal</i>	<i>2.622,00</i>	<i>595,52</i>	<i>8,38</i>	<i>2,46</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
RAMA NO ESENCIAL Y NO RELACIONADA CON LA SEGURIDAD								
Refrigerador de los compresores de aire	150,00	34,07	0,63	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00
Refrigeradores muestras fallos de combustible	28,00	6,36	0,25	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
Refrigeradores muestras radiactivas y no radiactivas	72,00	16,35	0,55	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00
Refrigeradores de la purga	880,00	199,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evaporador recuperación de boro	927,00	210,54	8,65	2,54	0,00	0,00	0,00	0,00
Desgasificador recuperación de boro	265,00	60,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evaporador desechos líquidos	766,00	173,98	9,43	2,76	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Subtotal</i>	<i>3.088,00</i>	<i>701,36</i>	<i>19,51</i>	<i>5,72</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
TOTAL	14.360,00	3.261,51	148,74	43,59	10.400,00	2.362,10	99,73	29,23

Tabla 4-2 – Datos consumo Sistema EG en parada

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

LOCA

EQUIPO	Tren A				Tren B			
	Q		P		Q		P	
	[gpm]	[m ³ /h]	[MBTU/h]	[MW]	[gpm]	[m ³ /h]	[MBTU/h]	[MW]
TRENES DE SEGURIDAD								
Cambiador de foso de combustible gastado	3.600,00	817,65	16,50	4,84	3.600,00	817,65	16,50	4,84
Cambiador RHR	4.000,00	908,50	64,00	18,76	4.000,00	908,50	64,00	18,76
Bomba de carga	110,00	24,98	0,22	0,06	110,00	24,98	0,22	0,06
Bomba de RHR	40,00	9,08	0,13	0,04	40,00	9,08	0,13	0,04
Unidades de enfriamiento de la contención	2.650,00	601,88	60,00	17,58	2.650,00	601,88	60,00	17,58
Carga térmica de la propia bomba EGP01	0,00	0,00	2,70	0,79	0,00	0,00	2,70	0,79
<i>Subtotal</i>	<i>10.400,00</i>	<i>2.362,10</i>	<i>143,55</i>	<i>42,07</i>	<i>10.400,00</i>	<i>2.362,10</i>	<i>143,55</i>	<i>42,07</i>
LAZO COMPARTIDO ESENCIAL Y NO RELACIONADO CON LA SEGURIDAD								
Cambiador de la descarga	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cambiador de agua de cierres	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bombas del refrigerante del reactor	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cambiador descarga auxiliar	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cambiador del tanque de drenaje	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Subtotal</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>
RAMA NO ESENCIAL Y NO RELACIONADA CON LA SEGURIDAD								
Refrigerador de los compresores de aire	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Refrigeradores muestras fallos de combustible	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Refrigeradores muestras radiactivas y no radiactivas	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Refrigeradores de la purga	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evaporador recuperación de boro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Desgasificador recuperación de boro	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evaporador desechos líquidos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Muestras post-accidente del edificio auxiliar	0,00	0,00	0,00	0,00	25,00	5,68	0,16	0,05
<i>Subtotal</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>25,00</i>	<i>5,68</i>	<i>0,16</i>	<i>0,05</i>
TOTAL	10.400,00	2.362,10	143,55	42,07	10.425,00	2.367,77	143,71	42,12

Tabla 4-3 – Datos consumo Sistema EG en LOCA

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Funciones del Sistema EG

Antes de la modificación

Previo la modificación el sistema se definía como una barrera entre el circuito abierto de refrigeración del Sistema de Agua de Servicios Esenciales (EF) y los sistemas potencialmente radiactivos del reactor.

La carga térmica absorbida por el sistema se transfería a través de los Cambiadores de Agua de Refrigeración de Componentes EG-E01A/B, al Sistema de Agua de Servicios Esenciales (EF).

Después de la modificación

La función principal del sistema no se ve modificada. Después de la instalación de los Cambiadores EG-E02A/B refrigerados por el Sistema de Agua de Salvaguardias Tecnológicas (EJ) el Sistema EG adquiere estas funciones:

- Hacer de barrera entre el circuito abierto del Sistema EF/Sistema EJ y los sistemas que pueden ser radiactivos
- La carga térmica absorbida por el Sistema EG se trasfiere a los Cambiadores de Agua de Refrigeración de Componentes EG-E01A/B, durante el funcionamiento normal de la planta y en operaciones de parada y mantenimiento
- La carga térmica absorbida por el Sistema EG se trasfiere a los Cambiadores de Salvaguardia Tecnológicas EG-E02A/B en caso de producirse Accidentes Base de Diseño

Por tanto los equipos principales de los que consta el sistema de agua de refrigeración de componentes son los siguientes:

- Dos intercambiadores de calor refrigerados por el sistema de agua de servicios esenciales (EF)
- Dos intercambiadores de calor refrigerados por el sistema de agua de salvaguardias tecnológicas (EJ)
- Cuatro bombas del 100% de capacidad (dos por tren), dispuestas en configuración tándem (una en marcha y otra en reserva)
- Dos válvulas neumáticas automáticas de bypass de los cambiadores refrigerados por el sistema EF
- Dos válvulas neumáticas de bypass de los cambiadores refrigerados por el sistema EJ
- Dos tanques de equilibrio presurizados con N₂
- Dos tanques de adición química (inhibidor de corrosión)
- Tubería, válvulas e instrumentación y control correspondiente

Se establece las temperaturas máximas del agua de refrigeración a la salida de los Cambiadores de Calor de Refrigeración de Componentes EG-E01A/B en condiciones de operación normal y parada.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

	Operación Normal	Parada Normal	LOCA
Temperatura de agua del mar	24,5[°C]	24,5[°C]	24,5[°C]*
Temperatura máxima de salida de EG-E01A/B (lado EG)	35[°C]	48,9[°C]	48,9[°C]*

Tabla 4-4 – Temperaturas máximas de EG-E01A/B

**Aunque tras la modificación el Sistema EG ya no se refrigera por el Sistema EF en LOCA.*

Se establece las temperaturas máximas del agua de refrigeración a la salida de los Cambiadores de Calor de Refrigeración de Componentes EG-E02A/B en condiciones de operación normal, parada y LOCA.

	Operación Normal	Parada Normal	LOCA
Temperatura de la balsa	27,8 [°C]	35 [°C]	35 [°C]
Temperatura ambiental exterior bulbo húmedo	24,5 [°C]	24,5 [°C]	32 [°C]
Temperatura máxima de salida de EG-E02A/B (lado EG)	35 [°C]	48,9 [°C]	48,9 [°C]

Tabla 4-5 – Temperaturas máximas de EG-E02A/B

Estas son las características principales de los cambiadores EG-E01A/B existentes anteriormente a la modificación del sistema de refrigeración.

<u>EJ-E01A/B</u>		
Tipo	Carcasa horizontal, tubos rectos	
Cantidad	2 de 100% capacidad cada uno	
Carga térmica	[MBTU/h]	[MW]
	80,76	23,67
Superficie	[ft ²]	[m ²]
	25.685,00	2.386,21
Tubos		
Fluido	Agua de mar	
Caudal	[gpm]	[m ³ /h]
	14.150,00	3.213,81
T entrada	[°F]	[°C]
	76,20	24,56
T salida	[°F]	[°C]
	89,06	31,70
Código de diseño	ASME 3, ND - TEMA R	
Clase de Seguridad	3	
Categoría Sísmica	1	
P de diseño	[psig]	[kg/m ²]
	150,00	10,55
T diseño	[°F]	[°C]
	200,00	93,33
Carcasa		
Fluido	Agua tratada con inhibidor de corrosión	

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Caudal	[gpm]	[m ³ /h]
	14.400,00	3.270,59
T entrada	[°F]	[°C]
	103,30	39,61
T salida	[°F]	[°C]
	90,32	32,40
Código de diseño	ASME 3, ND - TEMA R	
Clase de Seguridad	3	
Categoría Sísmica	1	
P de diseño	[psig]	[kg/m ²]
	200,00	14,06
T diseño	[°F]	[°C]
	200,00	93,33

Tabla 4-6 – Características cambiadores EG-E01A/B

4.4.2 Sistema de Agua de Servicios Esenciales

Funciones del sistema

El Sistema de Agua de Servicios Esenciales (Sistema EF) tiene como funciones:

- Disipar la carga térmica procedente de Sistema de Refrigeración de Componentes (sistema EG) en operación normal y parada
- Suministrar agua al Sistema de Rejillas Móviles y Lavado de rejillas (DC) cuando sea requerido

Las funciones de refrigeración que tenía asignadas el Sistema EF tras los accidentes base de diseño pasan a ser desempeñadas por el nuevo Sistema EJ, por lo que el Sistema EF deja de requerirse en condiciones de emergencia.

Hasta el momento de su desclasificación, la función del Sistema de Agua de Servicios Esenciales (EF) es suministrar agua de refrigeración (agua de mar) a los cambiadores de calor del Sistema de Agua de Refrigeración de componentes (EG-E01A/B) y al Sistema de Rejillas Móviles y Lavado de Rejillas (DC), con el caudal necesario tanto en operación normal y parada como tras los accidentes base de diseño.

Realizaba por tanto una función relacionada con Seguridad, y su diseño ha sido realizado con los criterios y requisitos establecidos por los sistemas relacionados con la seguridad.

Tras la puesta en marcha del Sistema de Agua de Salvaguardias Tecnológicas (EJ), las funciones de refrigeración que tiene asignadas el Sistema EF tras los accidentes base de diseño, pasan a ser desempeñadas por el nuevo Sistema EJ, por lo que el Sistema EF dejará de requerirse en condiciones de emergencia, por ello se procede a su desclasificación para que sea considerada como no relacionado con la seguridad.

Bases de Diseño

El Sistema de Agua de Servicios Esenciales, una vez desclasificado, continuará suministrando agua de refrigeración (agua de mar) a los cambiadores de calor del Sistema de Agua de

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Refrigeración de Componentes (EG-E01A/B) y el Sistema de Rejillas Móviles y Lavado de Rejillas, con el caudal necesario en operación normal y parada.

La nueva definición de funciones del sistema, hace que su diseño responda a las siguientes bases de diseño de generación de potencia:

1. El sistema es capaz de suministrar agua de refrigeración suficiente para la eliminación de las cargas térmicas de los equipos refrigerados por el Sistema de Agua de Refrigeración de Componentes (EG) durante operación normal y parada de la planta
2. El sistema dispone de dos circuitos del 100% de capacidad, con una bomba cada uno y que aspiran agua de mar filtrada por las rejillas móviles del Sistema DC.
3. El sistema está diseñado para que, en caso de producirse un golpe de ariete durante el arranque o la parada, no se superen las presiones de diseño
4. El sistema suministra el agua necesaria al subsistema de lavado de rejillas durante todos los modos de operación de la planta (operación normal y parada)
5. El sistema está protegido del ensuciamiento orgánico y de los problemas de corrosión a largo plazo
6. El sistema está diseñado para que, en caso de una Señal de Inyección de Seguridad (SIS) o caso de una señal del Pérdida de Suministro Exterior (PSE), las bombas del sistema disparen

Descripción General de la Modificación

La desclasificación del Sistema EF como sistema relacionado con la seguridad supone la realización de las siguientes modificaciones

1. Se elimina la bomba EF-P01C, instalándose una brida ciega, reduciéndose por tanto el número de bombas del sistema EF de tres a dos (EF-P01A y B). No obstante, se mantiene la redundancia del sistema con el objetivo de disponer de su función en caso de pérdida del circuito que esté en funcionamiento
2. Se mantiene la capacidad de refrigeración de los cambiadores EG-E01A/B desde el Sistema EF
3. Se eliminan las válvulas EF-008 y EF-009 y su instrumentación asociada. Estas realizan la interconexión de la bomba EF-P01C (eliminada) con las EF-P01A y EF-P01B. Se mantienen las válvulas EF-007 y EF-010
4. Al producirse una señal de inyección de seguridad (SIS) o pérdida de suministro exterior (PSE) se elimina el arranque de las bombas EF-P01A/B
5. Cada bomba EF-P01A/B queda alineada con su cambiador EG-E01A/B. Si se produce una señal de bajo caudal en el sistema EF en uno de los circuitos con las bombas en funcionamiento o por disparo eléctrico de estas, arranca el tren correspondiente del Sistema EJ.

Tras la modificación el sistema sigue teniendo 100% de capacidad cada uno de los trenes, que disponen de bomba, tuberías, válvulas e instrumentación adecuadas para su operación. Las bombas en funcionamiento normal de la planta aspirarán el agua del mar. Suministrando agua al cambiador de calor de componentes EG-E01A/B. También suministra el agua para el lavado de las rejillas cuando se requiera.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Requisitos de potencia y caudal del sistema EF anterior a la modificación:

Operación	Equipo	Nº equipos: Total/Operación	TREN A		TREN B	
			Caudal/Carga		Caudal/Carga	
Normal	EG-E01A/B	2/1	12.284 [gpm] 80,76 [MBtu/h]	2790 [m ³ /h] 23,65 [MW]	0 [gpm] 0 [MBtu/h]	0 [m ³ /h] 0 [MW]
Parada	EG-E01A/B	2/2	12.284 [gpm] 148,53 [MBtu/h]	2790 [m ³ /h] 43,5 [MW]	11.404 [gpm] 99,52 MBtu/h	2590 [m ³ /h] 29,2 [MW]
LOCA	EG-E01A/B	2/2	11.404 [gpm] 143,34 [MBtu/h]	2590 [m ³ /h] 42 [MW]	11.404 [gpm] 143,34 [MBtu/h]	2590 [m ³ /h] 42 [MW]

Tabla 4-7 – Datos consumo Sistema EF anterior a la modificación

Requisitos de potencia y caudal del sistema EF tras la modificación:

Operación	Equipo	Nº equipos: Total/Operación	TREN A		TREN B	
			Caudal/Carga		Caudal/Carga	
Normal	EG-E01A/B	2/1	12.284 [gpm] 80,76 [MBtu/h]	2790 [m ³ /h] 23,65 [MW]	0 [gpm] 0 [MBtu/h]	0 [m ³ /h] 0 [MW]
Parada	EG-E01A/B	2/2	12.284 [gpm] 148,53 [MBtu/h]	2790 [m ³ /h] 43,5 [MW]	11.404 [gpm] 99,52 MBtu/h	2590 [m ³ /h] 29,2 [MW]
LOCA	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Tabla 4-8 – Datos consumo Sistema EF tras la modificación

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

4.5 NUEVO SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

4.5.1 Descripción general

El nuevo sistema está compuesto por dos trenes (A y B) independientes entre sí, formando un sistema redundante en cuanto a su capacidad. Cada tren dispone de dos bombas, situadas en paralelo, capaces de suministrar el 100% del caudal necesario cada una (EJ-P01A/C y EJ-P01B/D). El agua empelada como fluido refrigerante se aspira de la balsa de Salvaguardias Tecnológicas y se impulsa, por medio de las bombas principales, a los intercambiadores de calor de agua de Salvaguardias Tecnológicas (EG-E02-A/B), donde absorbe la carga térmica del Sistema EG. El retorno se conduce hasta las torres de refrigeración (EJ-E01/02/03/04-A/B), que disipan dicha carga térmica a la atmósfera, retornándose por gravedad el agua enfriada a la propia balsa mediante un canal de reparto y descarga.

La siguiente tabla resume los parámetros principales utilizados para el diseño general del sistema. Los valores que aparecen en dicha tabla no son requisitos mínimos sino parámetros de diseño.

Parámetro	Operación normal	Parada normal	LOCA
Temperatura de la balsa	≤ 27,8 [°C]	≤ 35 [°C]	≤ 35 [°C]
Temperatura ambiental exterior bulbo húmedo	24,5 [°C]	24,5 [°C]	32 [°C]
Caudal nominal bombas de agua de salvaguardias tecnológicas EJ-P01-A/B/C/D	A: 3525 [m ³ /h] B: 3455 [m ³ /h]	A: 3525 [m ³ /h] B: 3455 [m ³ /h]	A: 3185 [m ³ /h] B: 3118 [m ³ /h]
Caudal mínimo requerido bombas de agua de salvaguardias tecnológicas	N/A	N/A	2850 [m ³ /h]
Temperatura máxima salida cambiador de salvaguardias tecnológicas (EG-E02-A/B) – lado EG -	95 [°F] 35 [°C]	120 [°F] 48,9 [°C]	120 [°F] 48,9 [°C]
Trenes en Operación	A: Si B: No	A: Si B: Si	A: Si B: Si
Potencia disipada en cambiador EG-E02-A/B	A: 80,76 [MBtu/h] 23,67 [MW] B: 0,00 [MBtu/h] 0 [MW]	A: 148,53 [MBtu/h] 43,53 [MW] B: 99,52 [MBtu/h] 29,17 [MW]	A: 143,34 [MBtu/h] 42,01 [MW] B: 143,34 [MBtu/h] 42,01 [MW]

Tabla 4-9 – Parámetros principales Sistema EJ

Los valores de los caudales nominales se han obtenido mediante el cálculo **4.7.2 Caudal requerido en los intercambiadores nuevos** tal y como se puede comprobar según los datos adjuntados en el **Anexo II**.

Las diferencias de caudal entre tren A y B son debidas a que el tren A tiene un recorrido aproximadamente 80 [m] más largo que el tren B.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Han sido efectuados cálculos de dimensionamiento para los cambiadores EG-E02A/B, según se indica en el **Anexo II**, en los tres escenarios descritos y con las cargas térmicas de 23,67 MW para operación normal, 43,3 MW para parada normal y 42 MW para LOCA. Se ha encontrado que el caso más limitativo es el de operación normal. A pesar de que el valor limitativo de temperatura del EG es de 48,9 [°C] el valor utilizado para el diseño es de 35 [°C]. Esto provoca que, a pesar de que el escenario operación normal no es el que más carga térmica debe disipar, sí es el que requiere un dimensionamiento mayor de los cambiadores de salvaguardias EG-E02A/B.

La balsa de salvaguardias tiene un volumen aproximado de 23650 [m³], según se puede comprobar en el cálculo **4.7.5 Dimensionamiento de la balsa**. Dicho volumen útil es suficiente para afrontar un escenario post-LOCA durante 30 días.

La balsa dispone de un sistema para la reposición de agua que se evapora en el funcionamiento de las torres.

Para facilitar las operaciones de mantenimiento de la balsa, ésta se ha subdividido en dos celdas, cada una con el 50% de capacidad aproximadamente. De esta manera, y con la central parada, es posible vaciar una celda para inspección y/o mantenimiento de la misma. Cada tren puede aspirar agua desde cualquiera de las dos celdas de la balsa, ya que las dos bombas que existen en cada circuito aspiran desde celdas diferentes. Para ello las bombas EJ-P01A y EJ-P01B aspiran el agua de la celda 1, y las bombas EJ-P01C y EJ-P01D aspiran el agua de la celda 2.

Las bombas principales del sistema son tipo vertical de pozo húmedo y están situadas sobre la propia balsa.

En la descarga de cada bomba se instalan una válvula de retención y otra de aislamiento tipo mariposa que impide el giro inverso de la bomba en su detención, el vaciado del circuito con bombas paradas, y permiten la correcta operación de las bombas en una configuración tándem.

Todas las tuberías que discurren por las áreas exteriores están conducidas por galerías enterradas de sección rectangular, inspeccionarles a lo largo de la totalidad de su recorrido. Estas galerías están divididas por un muro de hormigón para separar e independizar cada tren.

Para proteger tanto las tuberías, como los elementos metálicos de los lazos de posible corrosión y evitar los problemas derivados del crecimiento orgánico, se va a instalar un sistema de dosificación química de inhibidor de corrosión, antiincrustante y biocida.

Todos los componentes y líneas del sistema dispondrán de los adecuados venteos y drenajes. Se emplean válvulas de bola (1" y 2") para facilitar la purga de fangos u otros depósitos, así como evitar malos asientos que den lugar a pequeñas fugas.

Las torres son de tiro mecánico inducido y flujo en contracorriente. El aire se introduce verticalmente a través de la entrada de aire situada en la parte inferior de la torre, aspirando por un ventilador axial ascenderá a través del relleno contra la corriente vertical de agua y se descargará a la atmósfera por la parte superior.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Cada una de las torres dispone de 4 celdas, con su ventilador correspondiente. La torre opera normalmente con 4 ventiladores y se ha diseñado para disipar la potencia nominal con 3 de los cuatro ventiladores en marcha.

Paralelamente a las bombas de impulsión, cada celda de la balsa dispone de una bomba de recirculación EJ-P02-A (celda 1) y EJ-P02-B (celda 2). Éstas tienen como función la recirculación permanente del agua y permiten varios servicios, tal y como se indica:

- Tratamiento químico del agua del sistema de agua de salvaguardias tecnológicas
- Vaciado de celdas para acciones de mantenimiento
- Capacidad de purga continua
- Filtrado de agua

Durante el funcionamiento habitual del sistema las bombas EJ-P02-A y EJ-P02-B recirculan el agua directamente a la celda correspondiente de la propia balsa a través del canal de reparto y descarga. Adicionalmente, se puede recircular el agua de la balsa a través de los circuitos de los trenes A y B, alineando el sistema para dicha operación.

Con el sistema parado se garantizará que éste se mantiene lleno mediante vigilancia a través de un transmisor de nivel en el colector de entrada a las torres de refrigeración. De esta manera se evitan los golpes de ariete que podrían producirse en arranques con presencia de gas en el circuito de impulsión.

Los motores de accionamiento de los trenes A y B estarán conectados eléctricamente a barras de seguridad distintas e independientes, pudiendo ser alimentadas por dos fuentes exteriores convencionales y una interior procedente del generador diésel de emergencia asociado a cada tren.

El sistema se completa con la adecuada instrumentación para el control manual y automático de la operación de éste, así como de la vigilancia de su correcto funcionamiento mediante la monitorización de sus variables de caudal, presión, temperatura, nivel y vibraciones, etc.

Nuevos edificios e infraestructuras

A fin de albergar los componentes de los nuevos sistemas, crear el nuevo almacenamiento de agua que constituye el sumidero último de calor y realizar la interconexión con las instalaciones de la planta, se deberán realizar las siguientes estructuras:

- Edificio de Cambiadores de Salvaguardias Tecnológicas

En este edificio se instalan los intercambiadores de calor EG-E02-A/B.

- Galería del Sistema EJ

En ella se realiza la conexión entre la Casa de las Bombas existente actualmente y el edificio con los cambiadores de salvaguardias, por donde pasan las tuberías del sistema EJ. Además se realiza la conexión entre el nuevo edificio eléctrico y el edificio eléctrico existente actualmente.

- Galería del Sistema EG

Conecta el nuevo edificio de cambiadores con el actual edificio con los cambiadores EG-E01-A/B y alberga las tuberías de interconexión entre los dos intercambiadores de calor.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

- Edificio eléctrico del Sistema de Agua de Salvaguardias Tecnológicas

Donde se sitúan las nuevas barras de conexión eléctrica así como los centros de distribución y centros de control de motores que dan servicio a los nuevos equipos de la instalación EJ.

- Torres de refrigeración de Salvaguardias Tecnológicas
- Balsa de Salvaguardias Tecnológicas
- Casa de Bombas de Salvaguardias Tecnológicas

4.5.2 Modos de operación de la central

Como se ha mencionado anteriormente la central puede estar en diferentes modos de funcionamiento. Dependiendo del modo de operación será necesario evacuar más o menos calor para asegurar el correcto funcionamiento de la central.

Operación Normal

Las modificaciones en el Sistema EG permiten cambiar la refrigeración del Sistema EF con foco frío el mar con Cambiadores EG-E01A/B a Sistema EJ con foco frío la balsa con Cambiadores EG-E02A/B. Para ello se realiza el control mediante unas válvulas neumáticas para activar o desactivar uno de los dos sistemas.

- Refrigeración por el Sistema de Agua de Servicios Esenciales EF

En esta situación, debe permanecer arrancada la bomba de agua de servicios esenciales EF-P01A/B correspondiente a tren del sistema EG en operación.

Las válvulas by-pass de los cambiadores EG-E01A/B del tren correspondiente (Refrigerados por el Sistema EF), se cierra para obligar a que el caudal circule a través de los cambiadores.

Las válvulas de by-pass de los cambiadores EG-E02A/B del tren correspondiente (refrigeración por el Sistema EJ), se abren para permitir la circulación del agua a través de la línea de by-pass.

En esta situación, la carga térmica extraída del Sistema EG, se trasfiere al agua de mar a través del Sistema de Agua de Servicios Esenciales EF.

- Refrigeración por el Sistema de Agua de Salvaguardias Tecnológicas EJ (si el Sistema EF no está en funcionamiento)

En esta situación, debe permanecer arrancado el tren correspondiente del Sistema de Agua de Salvaguardias Tecnológicas EJ correspondiente al tren del Sistema EG en operación.

Las válvulas de by-pass de los cambiadores EG-E01A/B del tren correspondiente (refrigeración por sistema EF), se abren para permitir la circulación del agua a través de la línea de by-pass.

Las válvulas de by-pass de los cambiadores EG-E02A/B del tren correspondiente (refrigeración por el Sistema EJ), se cierran para obligar a que el caudal circule a través de los cambiadores.

En esta situación, la carga térmica extraída del Sistema EG, se transfiere al Sumidero Final de Calor (balsa de salvaguardias y atmósfera a través de las torres de refrigeración), por el sistema de Agua de Salvaguardias Tecnológicas EJ.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Se establecen nuevas instrucciones de operación, para la realización de los cambios de alineamiento para la conmutación entre la refrigeración desde el Sistema EF, o bien desde el Sistema EJ.

Parada Programada

Al igual que en operación normal el sistema EG se refrigera con el sistema EF salvo casos excepcionales donde sería necesario activar el sistema EJ, como podría ser el fallo de algún componente del sistema EF.

Post-LOCA

Incidentes de frecuencia moderada

Se requiere mantener el caudal de refrigeración a los componentes esenciales, tanto los relacionados con la seguridad como los no relacionados con la seguridad durante los siguientes sucesos:

- Fallo simple de un componente
- Se mantendrá el caudal de refrigeración a los componentes no esenciales y no relacionados con la seguridad para cualquier otro suceso de esta condición, como por ejemplo la pérdida de energía exterior

En este caso, ante la señal de pérdida eléctrica exterior (PSE), se producirá de forma automática el alineamiento de los cambiadores hacia la posición correspondiente a refrigeración desde el Sistema de Agua de Salvaguardias Tecnológicas EJ. Las válvulas de by-pass de los cambiadores EG-E01A/B (Sistema EF) abrirían, mientras que las de los cambiadores EG-E02A/B (Sistema EJ) cerrarían.

En los escalones correspondientes del secuenciador de cargas, arrancarían las bombas, torres de refrigeración y equipos auxiliares del sistema EJ, así como las bombas y resto de equipos requeridos del Sistema EG.

Incidentes Infrecuentes

Se requiere mantener la refrigeración a los componentes esenciales y relacionados con la seguridad durante todos los sucesos que derivan en pérdida de energía exterior, iniciación de la señal de inyección de seguridad y durante:

- Pequeña rotura de tubería en sistema de alta energía
- Pequeña fuga en tubería de moderada energía
- Máximo incendio postulado

4.5.3 Funcionamiento del Sistema Nuevo

El sistema se pone en operación con el tren o trenes seleccionados adecuadamente alineados a las bombas que van a operarse, verificando que el tren o trenes se encuentran llenos de agua y venteados. Se pondrán en operación uno o los dos trenes del sistema, según el requerimiento del modo de operación de la central, actuando sobre los interruptores manuales de las bombas seleccionadas, llevándolos a su posición de marcha. Las válvulas de by-pass de los cambiadores EG-E01A/B del tren correspondiente (refrigerados por el Sistema

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

EF), se abren para permitir la circulación del agua a través de la línea de by-pass. Las válvulas de by-pass de los cambiadores EG-E02A/B del tren correspondiente (refrigerados por el Sistema EJ), se cierran para obligar a que el caudal circule a través de los cambiadores. El Sistema de Agua de Salvaguardias Tecnológicas deberá ponerse en operación, al menos un tren, con anterioridad al arranque del sistema EG.

En la siguiente imagen se representa el funcionamiento del Sistema EF:

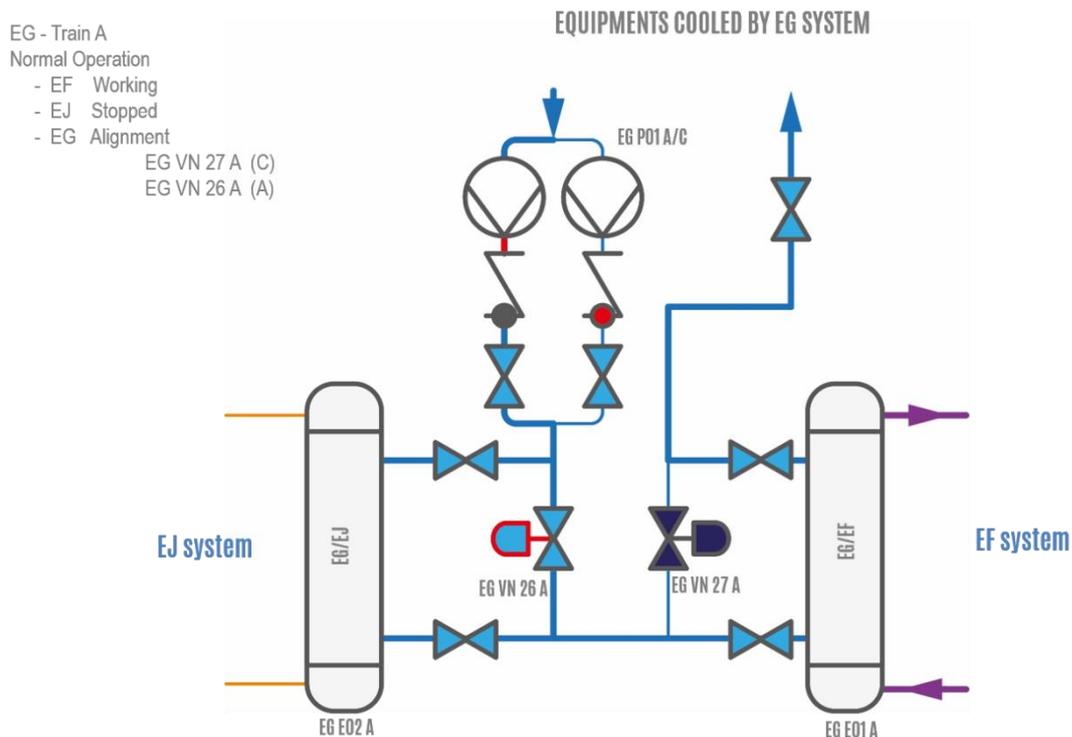


Imagen 4.8 – Operación Sistema EF

En el supuesto de PSE o bajo caudal o disparo eléctrico de la bomba en el Sistema EF se produce una orden de arranque automático del tren del Sistema EJ que corresponda. En caso de SIS se produce una orden de arranque automático de ambos trenes.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Operación Sistema EJ:

- EG - Train A
 Emergency Operation
 - EF Stopped
 - EJ Working
 - EG Alignment

EG VN 27 A (A)
 EG VN 26 A (C)

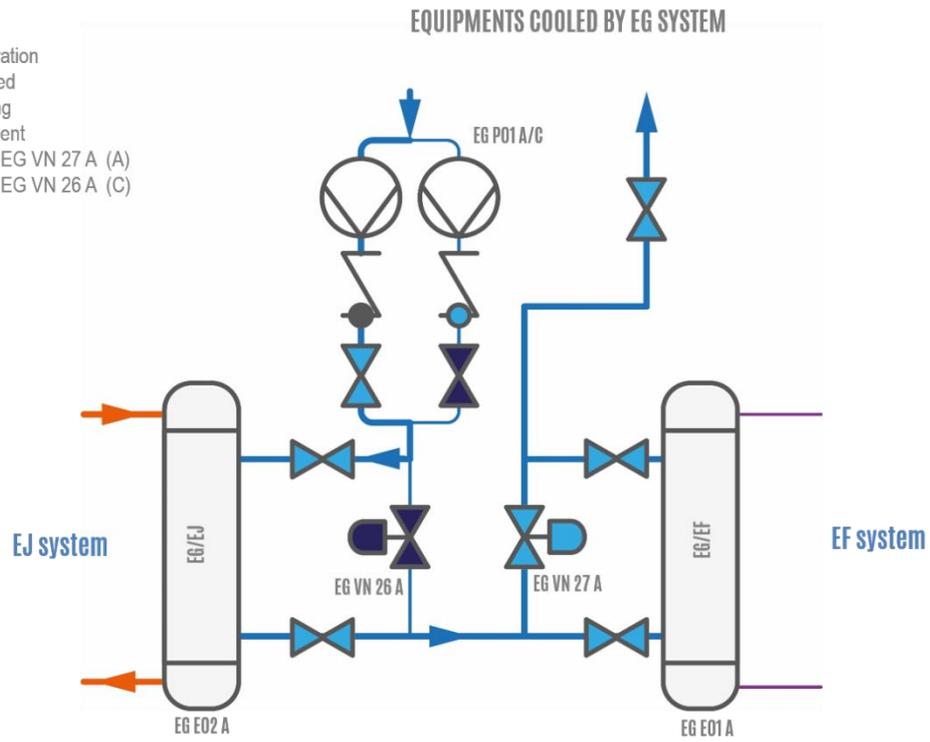


Imagen 4.9 – Operación Sistema EJ

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

En la siguiente imagen se representa la instalación completa, donde se observan los tres sistemas mencionados:

- Sistema EG
- Sistema EF
- Sistema EJ

Se observa como el Sistema EG se refrigera o por el Sistema EF o por el Sistema EJ según se requiera en cada momento.

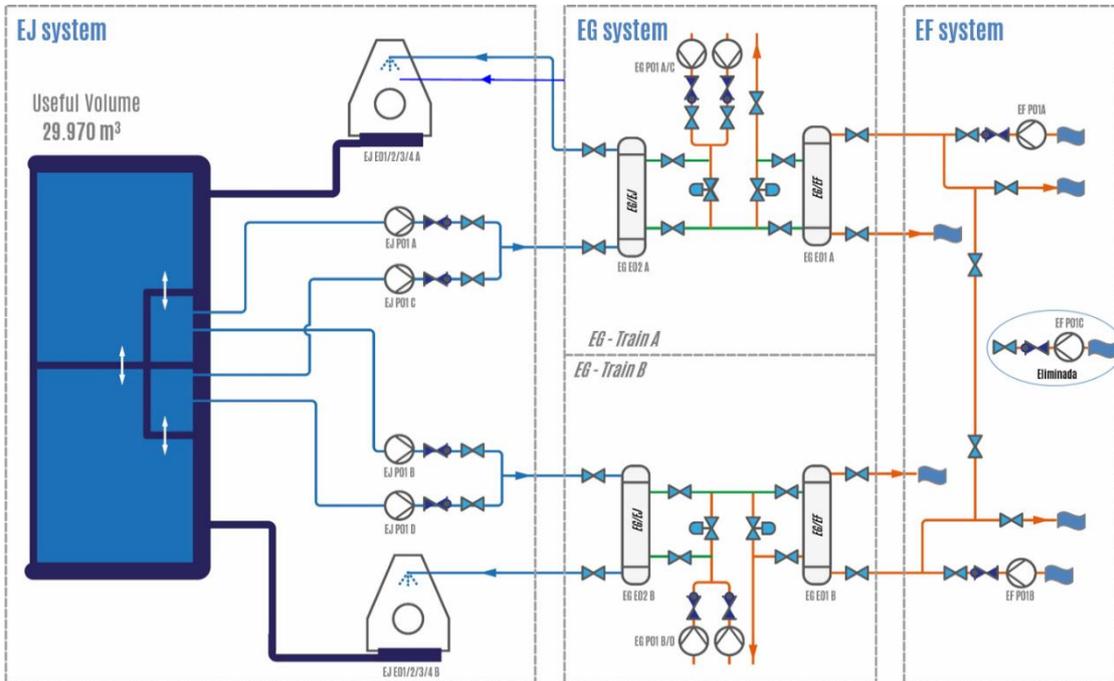


Imagen 4.10 – Disposición de los tres Sistemas

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

También se representan los edificios y galerías que se realizarán para el nuevo sistema EJ.

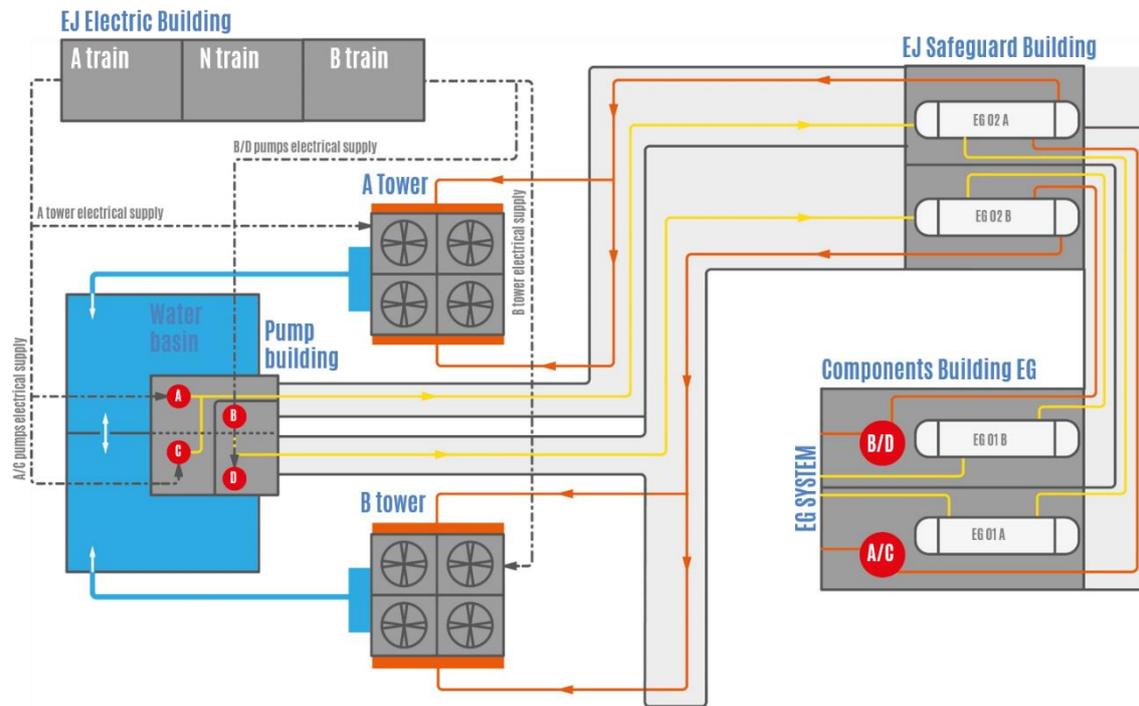


Imagen 4.11 – Esquema disposición equipos principales del Sistema EJ

4.5.4 Intervenciones

4.5.4.1 Bases de diseño

Criterios generales de diseño

El sistema EJ refrigera los cambiadores de calor del sistema EG de refrigeración de componentes con el objetivo de mantener la temperatura de salida del agua de EG por debajo de 120 [°F] (48,9°C) durante el periodo después de producirse un accidente.

Para asegurar un funcionamiento seguro, al tratarse de equipos que funcionan en caso de producirse algún accidente se diseñan dos trenes, tren A y tren B, de suministro de agua de refrigeración. Además el sistema EJ debe cumplir con los siguientes criterios de diseño:

- El sistema EJ se diseña de tal forma que en caso de fallo de cualquier componente y con pérdida de suministro eléctrico externo no cause la pérdida de funcionamiento seguro.

Por ello en los equipos de bombeo:

- Por cada tren (A/B) se instalan dos bombas idénticas con capacidad 100% cada una, para asegurar la circulación desde la torre de refrigeración a intercambiador de calor (EJ-P01A/B/C/D)
- Por cada tren (A/B) se dispondrá de 1 bomba con capacidad 100% cada una, para la recirculación y la dosificación de aditivos (EJ-P02A/B)

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

- Por cada tren se tendrá 1 bomba con capacidad 100% cada una, para la purga y vaciado de la torre (EJ-P04A/B)
- Cada tren (A/B) tendrá 2 bombas idénticas con capacidad 100% para asegurar el aporte de agua desde la balsa a la piscina de las torres (EJ-E08/09-A/B)
- Cada tren (A/B) dispondrá de 1 bomba con capacidad 10% para la circulación de agua en casos cuando el sistema EJ este parado, con la función de detectar fugas así como asegurar la dispersión de aditivos químicos que se inyectan en el sistema durante las paradas del sistema (EJ-E010N)
- En caso de fallo de la alimentación de los motores eléctricos de los nuevos equipos estos se podrán alimentar desde una fuente propia de energía situada en el nuevo edificio eléctrico para asegurar la seguridad del funcionamiento de los equipos
- El diseño estructural, el diseño de la balsa, piscinas de torres, casa de bombas, salas eléctricas, galería de servicio, nuevo edificio de componentes, y los sistemas, equipos y componentes contenidos en esas estructuras garantizarán que el caudal de diseño de las bombas del sistema EJ se mantendrá en todos los modos de operación normal, parada y condiciones de accidente base de diseño
- El sistema se diseña de tal manera que las sobrepresiones que se producen por el golpe de ariete que se produce en el arranque y parada de la bomba principal no sobrepasen la presión de diseño de 6.5 [kg/cm²]
- El sistema dispondrá de la instrumentación para la medición de caudal que mostrará el resultado en la sala de control principal ya existente

Desde el punto de vista operativo el sistema además deberá cumplir con los siguientes criterios:

- En operación normal uno de los trenes del sistema (A o B) suministrará agua de refrigeración al cambiador de calor de refrigeración de componentes EG-E01-A/B
- En parada ambos trenes están en funcionamiento refrigerando los dos cambiadores de calor de refrigeración de componentes para cumplir con los requisitos de enfriamiento normal del sistema EG. Aunque con un único tren se podría enfriar el sistema EG de manera segura pero con más tiempo
- Los caudales de agua de refrigeración de componentes y cargas térmicas transferidas en el intercambiador, en el lado EG, son variables en función del modo de operación del sistema:
 - En operación normal la transmisión térmica máxima será de 23,6 MW
 - En parada normal (en 20 horas con los dos trenes funcionando) la carga térmica máxima es de 43,5 MW
 - En momentos de post-LOCA la carga es de 42 MW

Pero el caudal en el lado del nuevo sistema EJ se mantendrá prácticamente constante para los diferentes modos de funcionamiento para asegurar una buena transmisión térmica para el caso más desfavorable.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

EQUIPOS PRINCIPALES

Para el correcto funcionamiento del nuevo sistema EJ se instalarán los siguientes equipos mecánicos principales:

#	Nomenclatura
EJ-T01 EJ-T02	Balsa de Salvaguardias Tecnológicas
EJ-P01-A/B/C/D	Bombas de Agua de Salvaguardias Tecnológicas
EJ-P02-A/B	Bombas de Recirculación de la Balsa de Salvaguardias Tecnológicas
EJ-P04-A/B	Bombas de purga y vaciado de torre
EJ-P08-A/B	Bombas de impulsión de balsa a torre
EJ-P09-A/B	Bombas de impulsión de balsa a torre
EJ-P010-N	Bomba de vaciado y recirculación de balsa
EJ-UV01-A/B EJ-UV02-A/B EJ-UV03-A/B EJ-UV04-A/B	Ventilador de la Torre de Refrigeración de Salvaguardias Tecnológicas
EJ-E01-A/B EJ-E02-A/B EJ-E03-A/B EJ-E04-A/B	[Módulo de la] Torre de Refrigeración de Salvaguardias Tecnológicas
EG-E02-A/B	Cambiador de Calor de Salvaguardias Tecnológicas
EJ-F01	Filtro de Recirculación de Balsa de Salvaguardias Tecnológicas

Tabla 4-10 – Nomenclatura equipos principales Sistema EJ

Como se ha mencionado el sistema EJ dispondrá de dos trenes idénticos para asegurar un funcionamiento seguro. Por ello todos los equipos estarán duplicados en cada tren para asegurar la máxima disponibilidad.

A continuación se describen los equipos principales del sistema, los requisitos de diseño que deben cumplir y también sus parámetros básicos.

4.5.4.2 Descripción equipos

4.5.4.2.1 Torres de refrigeración (EJ-E01/2/3/4-A/B)

Cada una de las torres de refrigeración dispondrá del 100 % de capacidad con el fin de poder funcionar de forma alternada en función del tren alineado en cada instante.

Cada una de las torres dispondrá de tres celdas para dispar el total de la potencia de diseño más una cuarta celda en stand-by o reserva con el fin de aumentar la disponibilidad de cada uno de los dos trenes.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

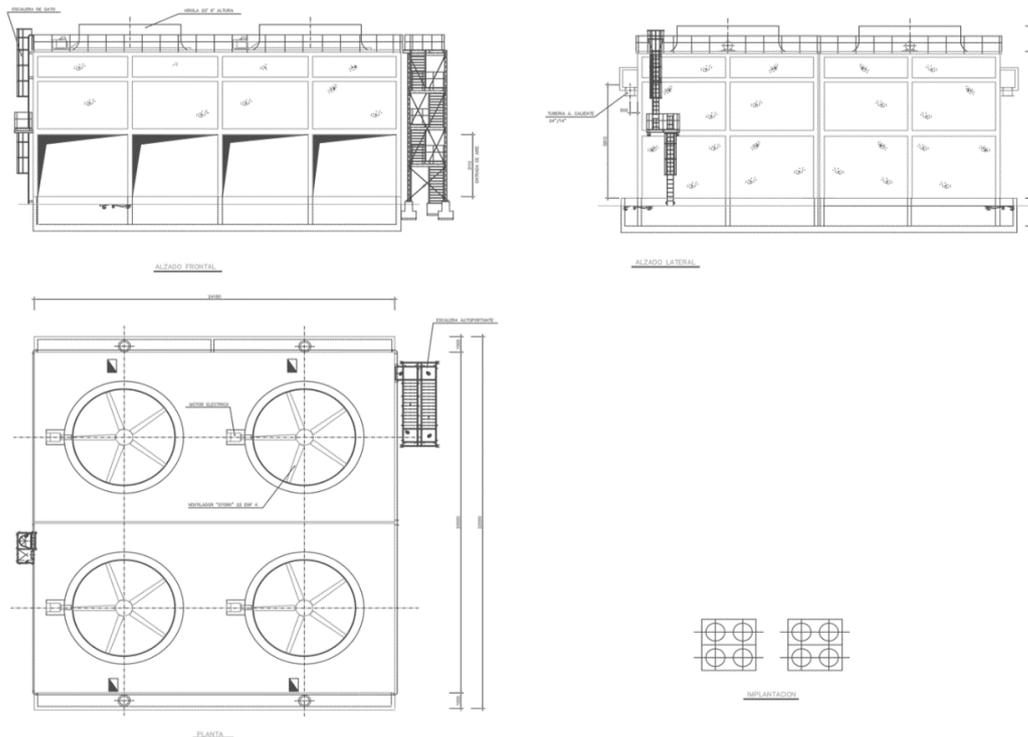


Imagen 4.12 – Croquis Torre de Refrigeración

Las torres serán de tipo flujo en contracorriente. El aire se introducirá verticalmente a través de la entrada de aire situada en la parte inferior de la torre, viajará a través del relleno contra la corriente vertical de agua y se descargará a la atmósfera a gran velocidad.

En la imagen siguiente se representa un esquema aproximado del funcionamiento de las torres:

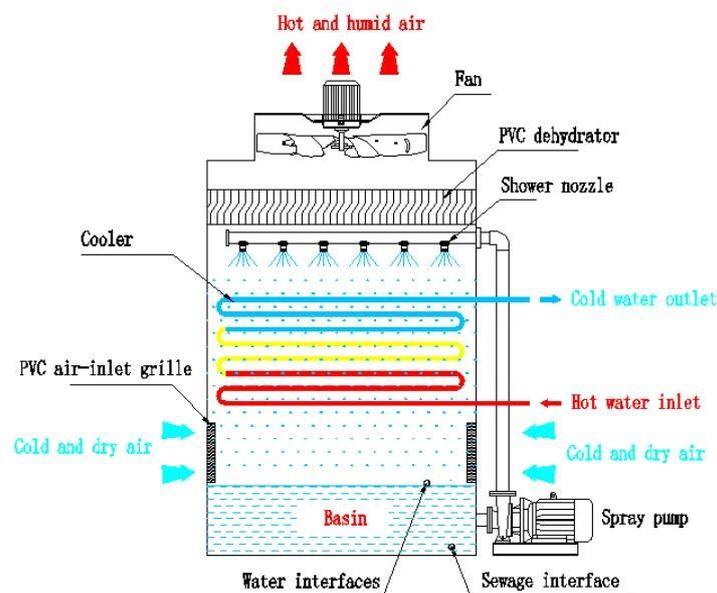


Imagen 4.13 – Esquema funcionamiento Torre de Refrigeración

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

La estructura de la torre estará compuesta básicamente de hormigón armado colocado in situ o prefabricado. La estructura servirá de soporte al relleno, eliminadores de gotas, sistema de distribución de agua, equipos mecánicos y cubierta de la torre.

La superficie de intercambio térmico será de flujo laminar. El relleno estará formado por láminas agrupadas en módulos que cubrirán toda la superficie de la torre. La alimentación de agua caliente se realizará desde la parte superior mediante platillos especiales en los cuales se pulverizará el chorro de agua, que caerá sin presión desde las tubuladuras, convirtiéndose en una fina lluvia y asegurando un reparto uniforme del agua sobre la superficie de la celda.

Para evitar el arrastre de partículas de agua por la corriente de aire creada por el ventilador, la torre irá provista de paneles separadores de gotas, situados en un plano superior al de distribución de agua.

La torre incorporará, como equipos mecánicos, un reductor de ejes perpendiculares conectado a un motor eléctrico con un eje motriz. Un ventilador axial se montará en el eje de salida de cada reductor. Los ventiladores serán alimentados desde los nuevos centros de control de motores ubicados en el nuevo edificio del sistema EJ.

Los materiales seleccionados para las láminas de relleno, conducciones de distribución de agua, elementos estructurales y elementos mecánicos tendrán una resistencia total a la corrosión debida al ambiente marino.

Cada torre dispondrá de una balsa común a todas las celdas que la componen, y de la cual aspirarán las bombas de impulsión a los cambiadores del sistema EG.

Las dimensiones estimadas serán de 38 x 12 x 12 por torre, unidades expresadas en metros para el largo, ancho y alto respectivamente.

4.5.4.2.2 Bombas centrífugas

La función de las bombas relacionadas en la introducción del presente apartado será la de suministrar agua a las diferentes cargas y circuitos hidráulicos del sistema EJ. Todas ellas serán bombas centrífugas de una sola etapa.

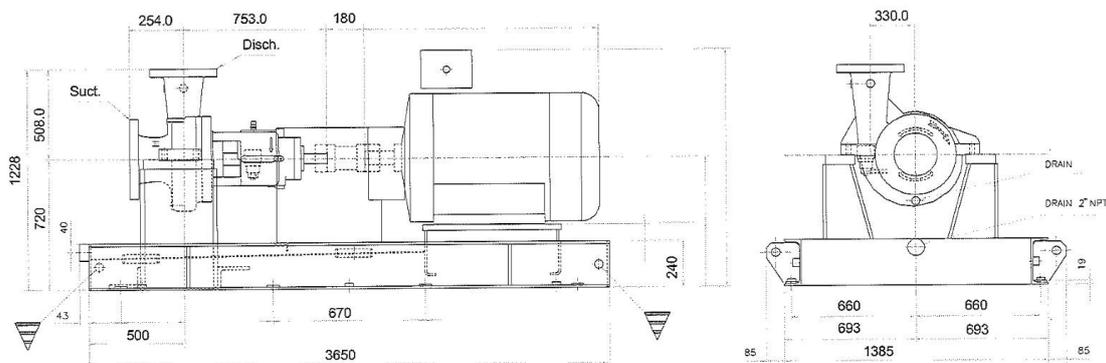


Imagen 4.14 – Croquis Bomba Centrífuga

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Las bombas del Sistema EJ deberán cumplir los siguientes requisitos:

- Las bombas se diseñarán de forma que su capacidad pueda aumentarse en un 10 % respecto a la nominal en el caso de cambio de rodete
- Las bombas se diseñarán de modo que funcionen en el punto de óptimo rendimiento para las condiciones nominales de caudal y presión
- Los equipos de bombeo deberán ser autónomos respecto su lubricación, refrigeración y sellado

A continuación se describen las particularidades para cada tipo de bomba así como sus parámetros principales como diseño básico de las mismas.

Bombas principales del nuevo Sistema de Agua de Salvaguardias Tecnológicas (EJ-P01-A/B/C/D)

La función de dichas bombas es la de recircular el agua de refrigeración entre las torres de refrigeración y los intercambiadores de calor del sistema de refrigeración de componentes (circuito cerrado con pérdidas a través de evaporación y arrastre en torre).

En cada tren se dispondrá de una pareja de bombas del 100% de capacidad unitaria, con funcionamiento alternativo. El funcionamiento de estas bombas será continuo en cualquier modo de operación de la planta: funcionamiento normal, parada o emergencia.

Como valor preliminar se estima un caudal de diseño de 3900 [m³/h], con una altura manométrica de 3 [kg/cm²]. Se prevé alimentar dichas bombas desde nuevos centros de control de motores del nuevo edificio del sistema EJ.

Bombas de recirculación sistema EJ (EJ-P02-A/B)

Las bombas de recirculación del sistema EJ tendrán una doble función:

- Recirculación del circuito del nuevo sistema de Agua de Salvaguardias Tecnológicas durante los periodos de espera, situación en que las bombas principales no operarán (Stand-by). La recirculación vendrá acompañada de la dosificación de aditivos para mantener las concentraciones de aditivos en los niveles adecuados. Con la recirculación se evitará el vaciado paulatino del circuito durante periodos prolongados de espera
- Llenado del circuito principal tras vaciados por mantenimiento

Cada tren tendrá una única bomba (no redundancia), y su funcionamiento será discontinuo y sólo cuando las bombas principales del sistema (EJ-P01-A/B/C/D) estén fuera de operación.

Como valor preliminar se estima un caudal de diseño de 390 [m³/h], con una altura manométrica de 1 [kg/cm²]. Se prevé alimentar dichas bombas desde los nuevos centros de control de motores ubicados en el nuevo edificio del sistema EJ.

Bombas de purga y vaciado de torre (EJ-P04-A/B)

La función de estas bombas será la de vaciar el agua de la balsa de las torres. Dicho vaciado puede hacerse necesario bien por mantenimiento de la torre, bien por purga debido a elevada concentración de sales en el agua de la balsa, si bien esta última situación se prevé poco frecuente debido a la utilización de agua osmotizada en el circuito de refrigeración.

Cada tren tendrá una única bomba (no redundancia) y su funcionamiento se prevé esporádico.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Bombas de impulsión de balsa a torre (EJ-P08/P09-A/B)

La función de las bombas de impulsión de balsa a torre será la reponer aquella cantidad de agua que se perderá en el circuito de la torre, ya sea por evaporación o bien por arrastre.

Cada tren dispondrá de una pareja de bombas del 100% de capacidad unitaria, con funcionamiento alternativo. Su funcionamiento será discontinuo y estará regulado mediante señal de la sonda de nivel en la torre. Las bombas se arrancarán ante una señal de nivel bajo y se pararán cuando el nivel llegue a un valor máximo.

Como valor preliminar se estima un caudal de diseño de 200 [m³/h], con una altura manométrica de 2 [kg/cm²]. Se prevé alimentar dichas bombas desde los nuevos centros de control de motores ubicados en el nuevo edificio del sistema EJ.

Bomba de vaciado y recirculación de balsa (EJ-P10-N)

Dicha bomba tendrá la función de vaciar las celdas de la balsa de alimentación de las torres de refrigeración o bien de trasiego del agua entre dos celdas por motivos de mantenimiento.

Existirá una única bomba (no redundancia) que no estará asociada a ningún tren en particular, puesto que la balsa es única para las dos torres de refrigeración. Su funcionamiento se prevé esporádico.

Como valor preliminar se estima un caudal de diseño de 250 [m³/h], con una altura manométrica de 2 [kg/cm²]. Se prevé alimentar dicha bomba desde los nuevos centros de distribución ubicados en el nuevo edificio del sistema EJ.

4.5.4.2.3 Intercambiadores de calor

Se ha mantenido como valores de diseño las condiciones de entrada y salida del flujo EG así como su caudal. Por otro lado, el régimen de temperaturas de agua de mar utilizado (28 a 40 [°C]) es compatible con el régimen de funcionamiento en torre definida.

Se propone la instalación de dos cambiadores de tamaño y capacidad de transferencia térmica prácticamente igual a los existentes (EG-E01A/B), pues el nuevo circuito de torre de refrigeración debe ser capaz de disipar a la atmósfera la misma carga térmica que el sistema EF disipa al mar.

En un principio se no se prevé un funcionamiento simultáneo de los sistemas EJ y EF, por lo que los nuevos intercambiadores tendrán la misma potencia de disipación que los actuales, estimándose ésta en los 43,5 MWt de potencia máxima en parada.

Los Cambiadores de calor de Salvaguardias Tecnológicas son de carcasa horizontal y tubos rectos. De un solo paso, tanto por carcasa como por tubos. El haz tubular lo componen 3504 tubos de diámetro 19,0 [mm] (3/4") de 10 [m] de longitud.

En la siguiente tabla se resumen los parámetros básicos.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

EJ-E02A/B		
Tipo	Carcasa horizontal, tubos rectos	
Cantidad	2 de 100% capacidad cada uno	
Carga térmica	[MBTU/h]	[MW]
	80,73	23,66
Superficie	[ft ²]	[m ²]
	22.259,78	2.068,00
Tubos		
Fluido	Agua de balsa	
Caudal	[gpm]	[m ³ /h]
	15.321,99	3.480,00
T entrada	[°F]	[°C]
	82,04	27,80
T salida	[°F]	[°C]
	92,89	33,83
Código de diseño	ASME 3, ND - TEMA R	
Clase de Seguridad	3	
Categoría Sísmica	1	
P de diseño	[psig]	[kg/m ²]
	150,00	10,55
T diseño	[°F]	[°C]
	200,00	93,33
Carcasa		
Fluido	Agua tratada con inhibidor de corrosión	
Caudal	[gpm]	[m ³ /h]
	13.390,01	3.041,20
T entrada	[°F]	[°C]
	107,17	41,76
T salida	[°F]	[°C]
	94,64	34,80
Código de diseño	ASME 3, ND - TEMA R	
Clase de Seguridad	3	
Categoría Sísmica	1	
P de diseño	[psig]	[kg/m ²]
	200,00	14,06
T diseño	[°F]	[°C]
	200,00	93,33

Tabla 4-11 – Características cambiadores EG-E02A/B

Se propone la utilización de nuevos intercambiadores de carcasa y tubos, en los que el agua del nuevo sistema circule por el lado tubos enfriando el agua de refrigeración de componentes que impulsada por las bombas del sistema pasa por el lado carcasa en contracorriente. Los caudales de agua de refrigeración de componentes y cargas térmicas transferidas en los

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

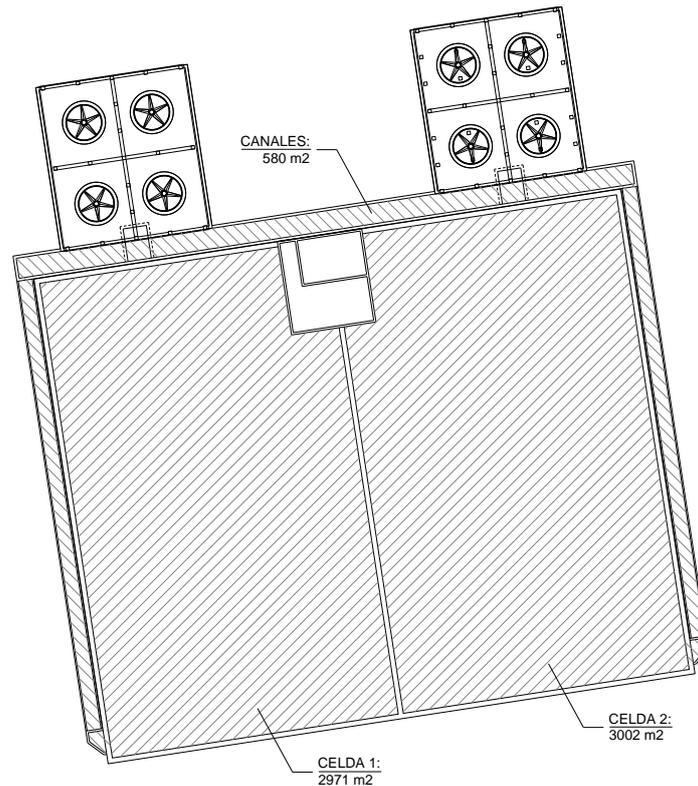


Imagen 4.16 – Croquis de la Balsa

Para verificar si la capacidad de almacenamiento es suficiente para cumplir con las bases de diseño del sistema es necesario estimar los consumos, a lo largo de los 30 días posteriores al accidente. En concreto, determinar:

- volumen necesario para compensar el consumo requerido por evaporación y arrastre en las torres de refrigeración
- pérdidas por evaporación y arrastre en la superficie libre de la balsa

Estas estimaciones se explican en los apartados **4.7.4 Caudal de evaporación en las torres de refrigeración** y **4.7.5 Dimensionamiento de la balsa**.

Al objeto de maximizar el consumo de la balsa se considera la actuación de máximas salvaguardias, es decir dos trenes en operación.

Se considera un valor inicial de temperatura del agua de la balsa de 35 [°C].

4.5.4.2.5 Tubería y valvulería

Los sistemas fluidos que configuran el sistema de agua de refrigeración esencial cumplen una misión crítica en la capacidad de llevar a la central a parada segura y mantenerla en ese estado por tiempo indefinido.

Para las tuberías que conectan las nuevas torres de refrigeración con los cambiadores de refrigeración de componentes se ha seleccionado acero inoxidable 316L.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Para las modificaciones del sistema EG se emplearán las actuales especificaciones de tuberías aplicadas a dicho sistema (acero al carbono).

Con esta selección de materiales se asegura un funcionamiento hasta el fin de la vida de la central sin riesgo de corrosión o pitting (es una forma de ataque corrosivo localizado que produce pequeños agujeros en un metal) de forma que sea posible confiar en el mantenimiento de la capacidad estructural y de circulación de fluidos de estos sistemas.

Se han previsto bocas de inspección en la tubería de 24" de agua de torre para permitir el acceso periódico a su interior.

Tuberías del sistema EJ

Las tuberías principales se dimensionarán con un diámetro de 24" con espesor de 0.375".

Las condiciones de diseño no se espera que superen:

- Presión de diseño: 6.5 [kg/cm²] (relativo) (se incluye la consideración de transitorio hidráulico de disparo de bombas)
- Temperatura de diseño: 50 [°C]

El material empleado será acero inoxidable tipo 316L.

Las tuberías arrancarán de las nuevas torres de refrigeración y serán confinadas en galerías visitables.

Las galerías contendrán dos tuberías de impulsión y dos tuberías de retorno. Se preverá muros de separación entre tuberías de distinto tren para asegurar ausencia de interacciones estructurales no previstas.

Valvulería

Todas las válvulas serán de tipo "shut-off". No se prevén válvulas de control.

Las válvulas serán fundamentalmente de tipo mariposa con cierre estanco y asiento elastomérico continuo. Sus conexiones serán embridadas, tipo "lug".

Para válvulas de pequeño diámetro (diámetro igual o inferior a 2") tales como válvulas de raíz, venteos y purgas se emplearán válvulas de globo, con uniones tipo "Socket Welding".

No se emplearán aleaciones de cobre en contacto con el agua, ya que pueden resultar sensibles a los aditivos biocidas y anti-corrosión.

Para las tuberías con reactivos de aditivación, se emplearán válvulas de material plástico (PVC, HDPE), tipo bola, con uniones encoladas o termosoldadas. Se evitará el uso de materiales metálicos por la elevada agresividad de los aditivos concentrados.

Las válvulas, tanto interiores como exteriores, no se pintarán exteriormente.

Todas las válvulas manuales de gran diámetro dispondrán de volantes manuales tipo tornillo sin fin, con sistema de autobloqueo de posición. Las válvulas de mediano y pequeño tamaño dispondrán de actuadores sencillos, tipo palanca o volante sencillo, siempre y cuando los esfuerzos de apertura no superen los 60 [kgf].

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

En el caso del intercambiador EG-E02A/B, las válvulas de seccionamiento dispondrán de actuadores eléctricos para facilitar su operación durante tareas de mantenimiento. Los actuadores serán desembragables y dotados de volantes manuales.

4.5.5 Electricidad

Los consumos eléctricos del nuevo sistema EJ se concentran básicamente en la zona de las nuevas torres de refrigeración, balsa y caseta de bombas. Por ello se plantea la construcción de un nuevo edificio eléctrico junto a dichas torres, que contendrá el aparellaje eléctrico necesario para la alimentación de los nuevos consumos. El suministro eléctrico a los equipos de cada uno de los trenes del nuevo sistema será independiente.

Sistema de comunicaciones

Los nuevos espacios se dotarán de las instalaciones necesarias para quedar integrados en el sistema de comunicaciones de la Central.

A nivel de comunicación con el exterior, la actuación no requiere extensión alguna del sistema.

A nivel de comunicación interior, se extenderán las instalaciones de los siguientes sistemas:

- Sistema de teléfono automático
- Sistema de megafonía
- Sistema de comunicación contra incendios

4.5.6 Instrumentación y control

El Sistema de Control para el nuevo sistema EJ consistirá básicamente en el mantenimiento del sistema de control actual.

La operación normal de la central se realizará desde la Sala de Control Principal de la Central, incluyendo la supervisión y operación del nuevo sistema.

Las modificaciones de la central serán diseñadas para tener una máxima disponibilidad.

El nuevo sistema englobará sin que sea excluyente:

- El control modulado para la regulación de las nuevas variables
- Supervisión de las variables de las unidades paquete que lleven PLC independiente
- Secuencias de arranque y parada
- El control lógico y las protecciones de todos los motores y elementos de control binario
- La monitorización de los nuevos sistemas

Instrumentación mínima de equipos de proceso

Los criterios para definir la instrumentación mínima en las modificaciones propuestas para la central serán los siguientes:

- Los tanques y depósitos tendrán medidas de nivel locales, remotas y tendrán alarmas por alto (H) y bajo nivel (L) como mínimo
- Antes y después de los intercambiadores de calor se instalarán medidas de

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

temperatura

- En las impulsiones de las bombas se instalarán manómetros
- En los filtros se instalará detección de suciedad por presión diferencial
- En las entradas y salidas de agua se instalarán medidas de caudal
- En los recipientes a presión se instalarán medidas de presión locales y remotas

Indicados los criterios de diseño los instrumentos de control utilizados serán:

- Manómetros
- Termómetros
- Transmisores de presión y presión diferencial
- Transmisores de temperatura
- Placas de orificio
- Transmisores de caudal
- Transmisores de nivel
- Analizadores de pH
- Analizadores de conductividad

4.5.7 Química del sistema

El nuevo Sistema de Agua de Salvaguardias Tecnológicas EJ funcionará con agua desmineralizada. Para ello se instalará un sistema de almacenamiento y transferencia de agua desmineralizada. Dicho sistema dispondrá de una planta desmineralizadora con capacidad para el llenado de las celdas de la balsa de reposición de torre, desde las que el agua se bombeará hasta las balsas de las torres y desde las mismas al llenado de los correspondientes circuitos de ambos trenes. Las características básicas del agua proveniente del sistema de desmineralización se resumen en la siguiente tabla:

Conductividad específica	0,1 [mhos/cm] a 25 [°C]
pH	6 a 8 a 25 [°C]
Hidróxido libre	No detectable
Cloruros y fluoruros	0,1 [ppm]
Sólidos totales	1,0 [ppm]
Sólidos suspendidos	0,05 [ppm]
Sílice total	0,03 [ppm]
Potasio	0,1 [ppm]
Sodio	0,1 [ppm]
Aluminio	0,02 [ppm]
Calcio	0,005 [ppm]
Magnesio	0,005 [ppm]

Tabla 4-12 – Características del agua del sistema de desmineralización

La calidad del agua se controlará mediante sistema de muestras local. Se prestará especial atención a evitar fenómenos de corrosión microbológica, por lo que ambos trenes del sistema EJ contarán con tanques para aditivación de bactericida e inhibidores de corrosión, controlándose además el pH del agua con el fin de fijarlo en un valor ligeramente básico.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

4.5.8 Obra civil y edificios

Los edificios y estructuras de obra civil dentro del alcance del proyecto son los siguientes:

- Edificio de sala de bombas y nuevas salas eléctricas para sistema EJ.
- Edificio de nuevos cambiadores de calor sistema de refrigeración de componentes (EG).
- Galerías de tuberías de nuevo sistema EJ y canalizaciones eléctricas.
- Balsa de aporte de agua a nuevo sistema EJ.

NUEVOS EDIFICIOS DE SALA DE BOMBAS Y SALAS ELÉCTRICAS PARA EL SISTEMA EJ Y DE REFRIGERACIÓN DE COMPONENTES

Función

Se plantea un nuevo edificio en la zona de balsa y torres de refrigeración del nuevo sistema EJ que contendrá fundamentalmente los grupos de bombeo asociados a las torres y la balsa y también las nuevas salas eléctricas previstas para alimentar los consumos del nuevo sistema (Centros de distribución, CCM's, armarios y demás aparellaje eléctrico). Dicho edificio, situado entre la balsa y las torres de refrigeración, será único para ambos trenes, estando sus equipos convenientemente separados mediante muros de hormigón armado. Se prevé la edificación de dos plantas, una superior con centros de transformación, CCM y demás equipos eléctricos y una inferior, semienterrada, en la que instalarán los distintos grupos de bombeo y por la que discurrirán las tuberías de los nuevos circuitos del sistema EJ. De dicha planta partirán las distintas conducciones que, a través de galería enterrada, llegarán hasta el nuevo edificio de refrigeración de componentes.

El nuevo edificio de refrigeración de componentes albergará fundamentalmente los nuevos intercambiadores de refrigeración de componentes. Dichos intercambiadores se instalarán en paralelo con los actuales por el lado EG, lado del sistema de refrigeración de componentes o circuito a refrigerar, y serán refrigerados por el nuevo sistema EJ de agua de refrigeración de torres. Del mismo modo albergará y soportará las nuevas tuberías y valvulería necesaria para conexión de los intercambiadores a ambos sistemas. En la parte superior se situarán las bandejas de cables eléctricos.

Descripción de la estructura

El nuevo edificio del sistema EJ corresponde a la tipología de "Estructura en Cajón" (Box Type Structure). Corresponde a un edificio de hormigón armado de dos plantas, una superior y otra semienterrada, de sección rectangular de aproximadamente 70 x 20 [m], dividida en 5 secciones interiores correspondientes a las salas de bombas para ambos trenes (situadas en los extremos), más las salas eléctricas para los equipos clase de ambos trenes (situadas en la zona central) más una sala eléctrica compartida por ambos trenes de instrumentación eléctrica no clase (situada también en la zona central). Todas las secciones estarán separadas bien por un muro de hormigón armado, bien por el mismo forjado intermedio cuya función principal será la de separar trenes eléctricos redundantes e independientes o bien separar la sala de bombas de la sala eléctrica de un mismo tren.

El nuevo edificio de refrigeración de componentes será igualmente de la misma tipología de "Estructura en Cajón". Corresponde a un edificio de hormigón armado de una sola planta de

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

sección prácticamente cuadrada, dividida en dos por un muro de hormigón armado intermedio cuya función será la de separar los trenes independientes y redundantes de agua de refrigeración de componentes. Las dimensiones aproximadas en planta serán de aproximadamente 18 x 20 [m].

GALERÍAS ENTERRADAS

Función

Esta estructura enterrada albergará las nuevas tuberías de agua de refrigeración de componentes, conduciéndolas desde el nuevo edificio de sala de bombas hasta el nuevo edificio de refrigeración de componentes. Del mismo modo albergará los sistemas de bandejas de cables eléctricos necesarios para comunicar el equipo eléctrico con los elementos de control en la central. Finalmente deben permitir la inspección del estado de los sistemas de tuberías incluidos.

Descripción de la estructura

La galería enterrada de soportado de tuberías será una estructura en hormigón armado de sección rectangular enterrada en el terreno. Dispondrá de un muro de hormigón intermedio que separará los dos trenes redundantes de tuberías. En cada uno de los lados existirá espacio para disponer y soportar las tuberías y desarrollar el sistema de bandejas de cables eléctricos. Existirá suficiente espacio adicional para permitir el proceso de inspección del estado de las tuberías y proceder si se requiriese a su reparación o sustitución.

BALSA

Función

La balsa tendrá por función almacenar el volumen de agua necesaria para aporte al nuevo circuito de agua de torres (EJ), que si bien será un circuito cerrado tendrá pérdidas por evaporación y por arrastre en las propias torres. La balsa estará segmentada en 5 celdas independientes y separadas mediante muro de hormigón armado, estando una de ellas en reserva, siendo el volumen contenido en las cuatro restantes aquél que asegure la suficiente alimentación a las torres durante un supuesto de funcionamiento continuo de las mismas a plena potencia y sin aporte de agua exterior.

La balsa será única para ambos trenes del sistema EJ, y estará situada cerca de las torres de refrigeración y del nuevo edificio de bombas y equipos eléctricos del sistema EJ.

Descripción de la estructura

La balsa corresponde a una estructura de hormigón de contención de agua formada por una losa y un muro perimetral. Esta estructura se ejecutará superficialmente. Con objeto de minimizar contaminación y evaporación del agua almacenada, se dispone de una losa de cubierta. Esta se apoya en pilares y muros intermedios, cuya función es la separación y aislamiento en áreas independientes y redundantes del agua embalsada.

La balsa se compone de 5 celdas de un volumen unitario aproximado de 5900 [m³], separadas entre sí por muros de hormigón.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

4.6 CÁLCULOS

4.6.1 Pérdida de carga en las tuberías

La distribución de las tuberías y equipos de la instalación se realiza según el siguiente croquis:

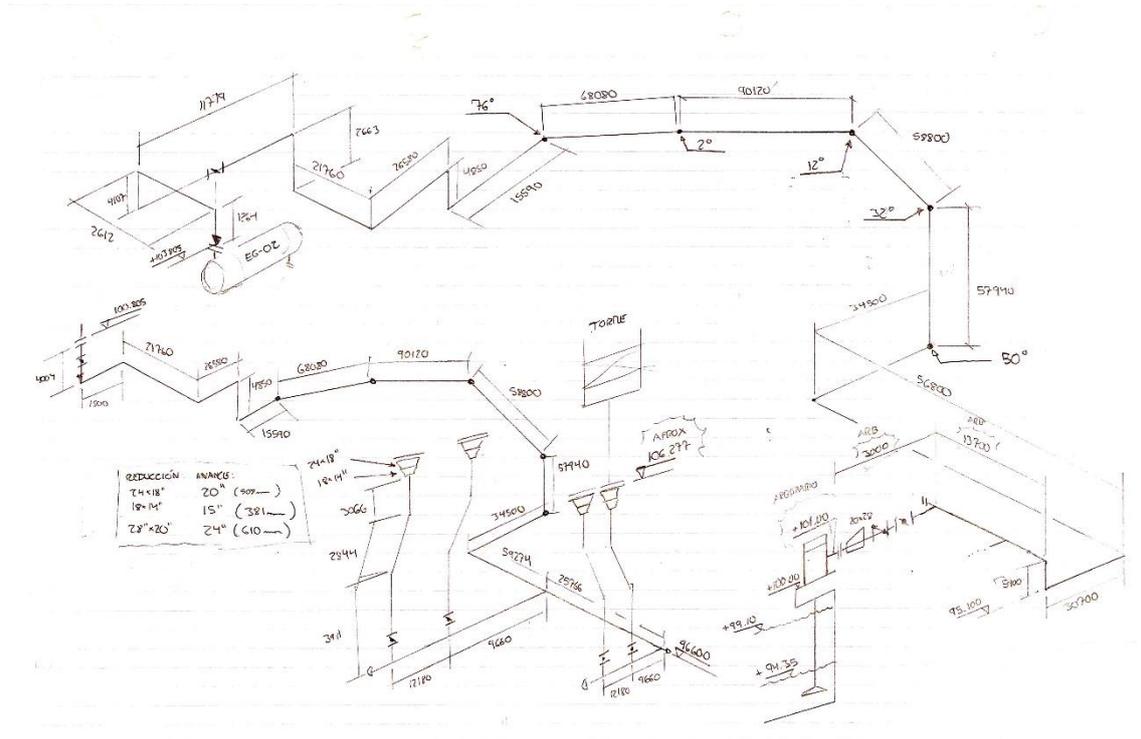


Imagen 4.17 – Croquis distribución de las tuberías

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

El trazado de la tubería se ha dividido en 5 tramos, según sea el diámetro y el caudal en la línea, tal y como se representa en la siguiente imagen:

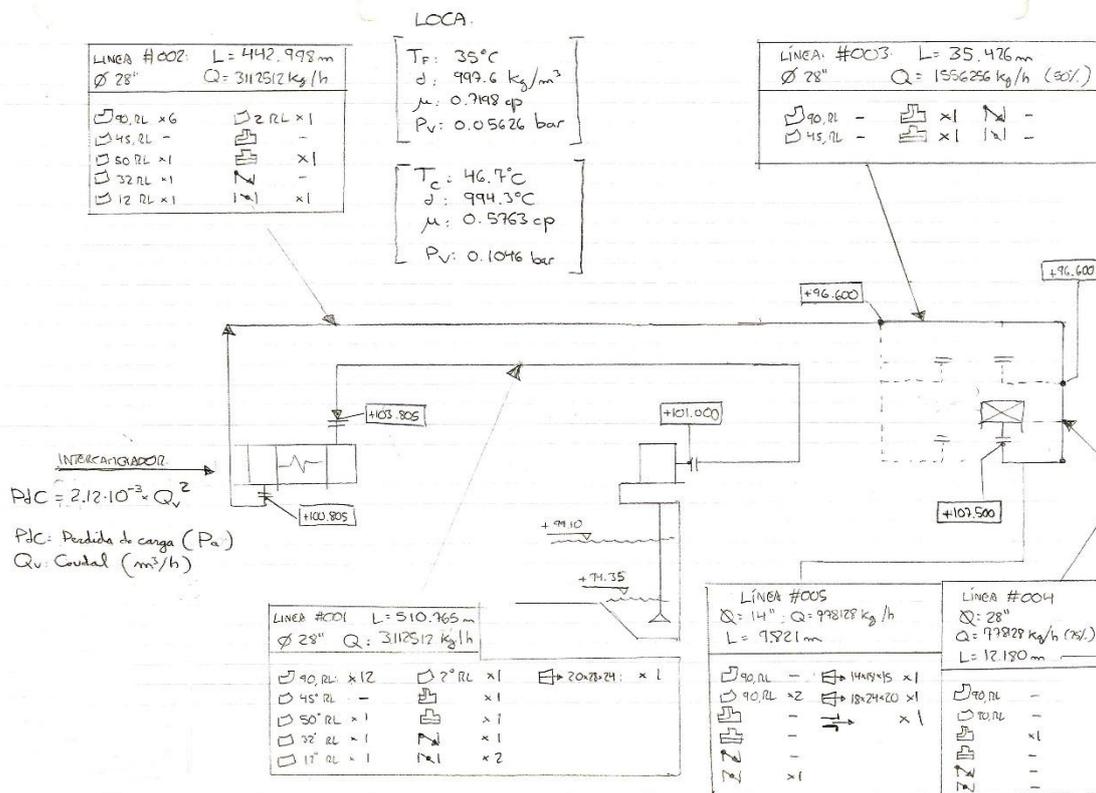


Imagen 4.18 – Croquis simplificado distribución de las tuberías

Pérdida de carga en equipos

El único equipo en la línea que podría provocar pérdida de carga es el intercambiador de calor (EG-E02A/B).

La pérdida de carga se calcula según la siguiente expresión:

$$PdC_{equipos} = K \cdot Q_V^2$$

Pérdida de carga en accesorios

Para calcular la pérdida de carga que se produce en los accesorios se utiliza la expresión de "Velocity Heads"

$$PdC_{accesorios} = \sum_i K_i \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

Según el croquis del trazado se tienen los siguientes valores del coeficiente individual de pérdida de carga: (fuente - IDOM)

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Accidente	DIÁMETRO		
	14"	24"	28"
Codo 90°; radio largo	0.1778	0.1589	0.1551
Codo 45°; radio largo	0.1259	0.1131	0.1098
TE; flujo 90°	0.7621	0.6847	0.6649
TE, flujo recto	0.2540	0.2282	0.2216
Válvula de mariposa	0.5716	0.5135	0.4987
Válvula de retención (tipo duocheck)	0.6351	0.5706	0.5541
Codo 50°; radio largo	-	-	0.11490
Codo 32°; radio largo	-	-	0.09674
Codo 12°; radio largo	-	-	0.07660
Codo 2°; radio largo	-	-	0.06553
Salida abrupta	1.0000	1.0000	1.0000
Ampliación 20x28"; Long. = 24"		0.10730	
Ampliación 14x18"; Long. = 15"		0.05776	
Ampliación 18x24"; Long. = 20"		0.07794	
Ampliación 24x28"; Long. = 24"		0.01598	
Reducción 28x24"; Long. = 24"		0.03410	

Tabla 4-13 - Valores coeficiente individual de pérdida de carga

En esta tabla se incluyen los valores de los siguientes accesorios:

- Codos
- TEs
- Válvulas
- Salidas abruptas
- Ampliaciones

Pérdida de carga en tuberías

Por último la pérdida de carga en tuberías se calcula de la siguiente manera:

- Se calcula el número de Reynolds:

$$Re = \frac{v \cdot D_{int} \cdot \rho}{\mu}$$

Se considera que a partir de un número de Reynolds mayor de 4000 el régimen de flujo es turbulento en la tubería

- Para el caso de régimen laminar la pérdida de carga se calcula según la siguiente expresión:

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

$$PdC_{laminar} = \frac{32 \cdot \mu \cdot v}{D_{int}^2 \cdot \rho \cdot g}$$

- Para el caso de régimen turbulento primero se calcula el factor de fricción de Darcy utilizando la siguiente expresión:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D_{int}} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right)$$

El siguiente paso es el cálculo de la pérdida de carga, mediante la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$PdC_{turbulento} = f \cdot \frac{v^2}{2 \cdot D_{int} \cdot g}$$

La pérdida de carga total es igual a: (por metro lineal)

$$PdC_{total} = PdC_{equipos} + PdC_{accesorios} + PdC_{laminar/turbulento}$$

Finalmente se multiplica por la longitud del tramo de las tuberías.

Mediante una hoja de cálculo Excel, adjuntada en el **Anexo II**, se ha realizado el cálculo de pérdida de carga total (incluyendo la pérdida en equipos, accesorios y la pérdida debida al flujo laminar o turbulento en las tuberías) variando el caudal de funcionamiento. Se han obtenido los resultados indicados en la tabla siguiente:

<u>CAUDAL</u>	<u>PDC TREN A</u>	<u>PDC TREN B</u>
[m ³ /h]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,00	1,31	1,31
200,00	1,32	1,32
400,00	1,34	1,34
700,00	1,40	1,40
1.000,00	1,48	1,49
1.300,00	1,60	1,61
1.600,00	1,74	1,76
1.900,00	1,91	1,94
2.200,00	2,11	2,15
2.500,00	2,34	2,39
2.800,00	2,59	2,66
3.100,00	2,88	2,96
3.400,00	3,19	3,29
3.700,00	3,52	3,64
4.000,00	3,90	4,03
4.300,00	4,29	4,45

Tabla 4-14 – Valores de pérdida de carga en los trenes A y B

Estas pérdidas de carga se han calculado para cada Tren por separado debido a que las líneas A y B presentan longitudes diferentes de tubería.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

4.6.2 Caudal requerido en intercambiadores nuevos

Cálculo del caudal requerido en los intercambiadores EG-E02-A/B:

Curva Hidráulica de las bombas EJ-P01 A/B/C/D

La bomba EJ-P01 tiene las siguientes características:

- Caudal: 3370 [m³/h]
- Presión diferencial: 2,9 [kgf/cm²]
- NPSH disponible: Sin requisito particular
- Submergencia mínima: 1,0 [m]

Para calcular la curva característica de la bomba se utilizan los datos proporcionados por el fabricante de las bombas, tras la petición de oferta para las bombas principales:

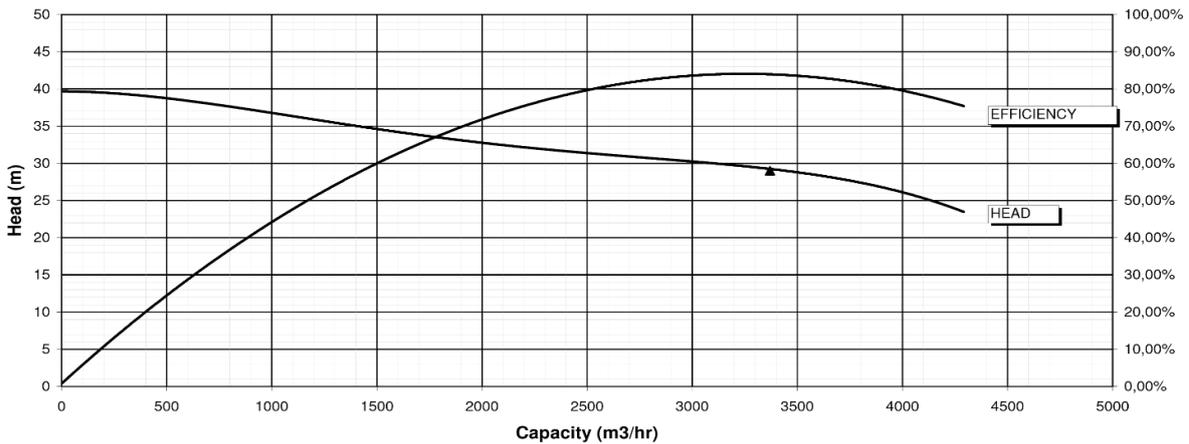


Imagen 4.19 – Curva característica de la bomba EJ-P01 A/B/C/D

Para calcular la pérdida de carga que se produce en la bomba según la variación del caudal se han ido sacando los puntos con la gráfica con caudales distintos y se han ido anotando en la siguiente tabla:

CAUDAL	MEDICIÓN	RESULTADO	TDH	CURVA
[m ³ /h]	[cm]	[m]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,00	8,25	39,68	3,96	3,96
200,00	8,20	39,44	3,93	3,94
400,00	8,10	38,96	3,89	3,89
700,00	7,90	38,00	3,79	3,78
1.000,00	7,60	36,56	3,65	3,66
1.300,00	7,35	35,35	3,53	3,52
1.600,00	7,10	34,15	3,41	3,40
1.900,00	6,85	32,95	3,29	3,29
2.200,00	6,65	31,99	3,19	3,19
2.500,00	6,50	31,27	3,12	3,12
2.800,00	6,35	30,54	3,05	3,05
3.100,00	6,20	29,82	2,98	2,98

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

3.400,00	6,05	29,10	2,90	2,90
3.700,00	5,80	27,90	2,78	2,78
4.000,00	5,40	25,97	2,59	2,60
4.300,00	4,85	23,33	2,33	2,33

Tabla 4-15 – Valores de pérdida de carga de la bomba EJ-P01 A/B/C/D

Con estos datos se realiza un ajuste polinómico (de 4 grado) para obtener la siguiente ecuación:

$$TDH = 3.95685 - 2.13903 \cdot 10^{-5} \cdot Q_V - 4.39270 \cdot 10^{-7} \cdot Q_V^2 + 1.84507 \cdot 10^{-10} \cdot Q_V^3 - 2.36514 \cdot 10^{-14} \cdot Q_V^4$$

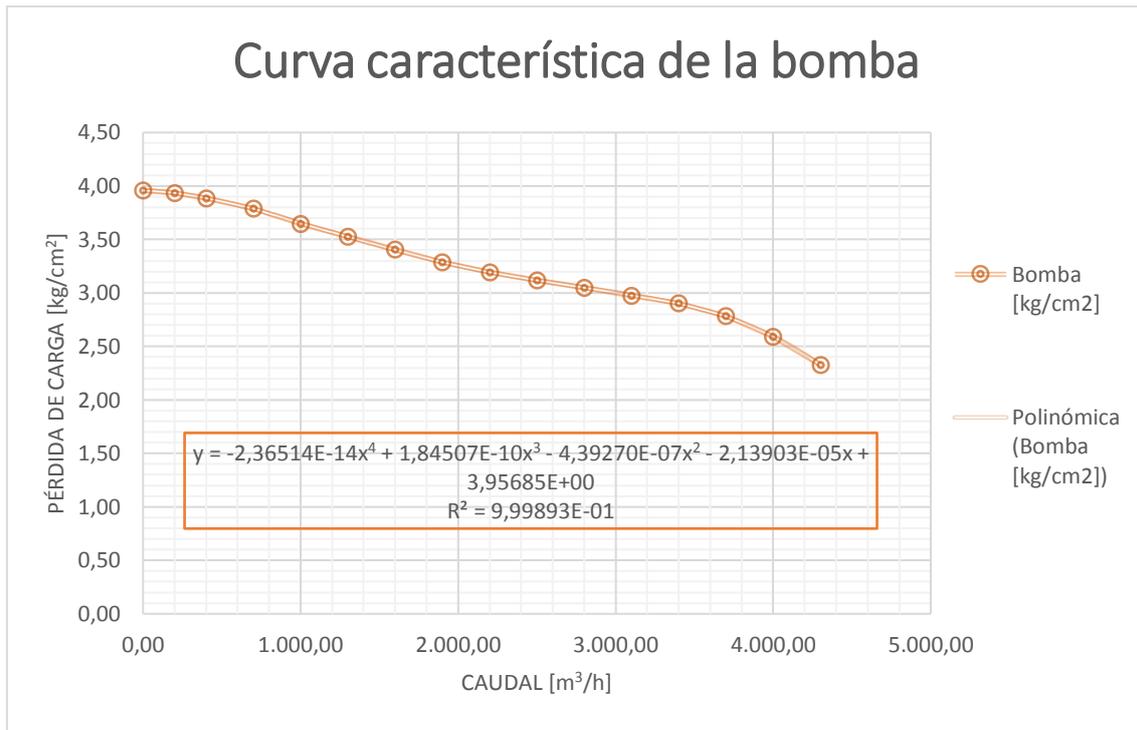


Imagen 4.20 – Curva teórica de la bomba EJ-P01 A/B/C/D

Con $R^2 = 0,99989$

Validez $0 \leq Q_v \leq 4300 [m^3/h]$

El siguiente paso es calcular la pérdida de carga en el circuito, para ello se ha utilizado una hoja de cálculo Excel, cuyo resultado se adjunta en el **Anexo II**.

Requisitos de dimensionamiento

- Cada tren (A/B) dispone de una bomba de 100% de capacidad
- Aunque cada tren dispone de dos bombas para estos cálculos se considera que está en funcionamiento solo una de ellas
- También se realizan los cálculos para la bomba del Tren B por estar ubicada en la situación más desfavorable, mayor recorrido de la tubería
- La temperatura de operación se considera de 35 [°C], que es la temperatura de la balsa al inicio de la situación LOCA

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

- Las propiedades del agua que se utiliza se asimilan a las del agua pura
- Tuberías – propiedades y criterio de dimensionamiento
 - Dimensiones: ANSI B36.10-75 & ANSI B36.19-65
 - Schedule: 40/STD
 - Rugosidad: 0,0018 pulgadas (0,046 mm)
 - Ensuciamiento: No se considera incremento de rugosidad o reducción de diámetro interior por ensuciamiento de tubería

La tubería se dimensiona siguiendo el criterio de la velocidad. Los umbrales máximos de velocidad se ajustan de acuerdo a la siguiente figura con velocidades recomendadas.

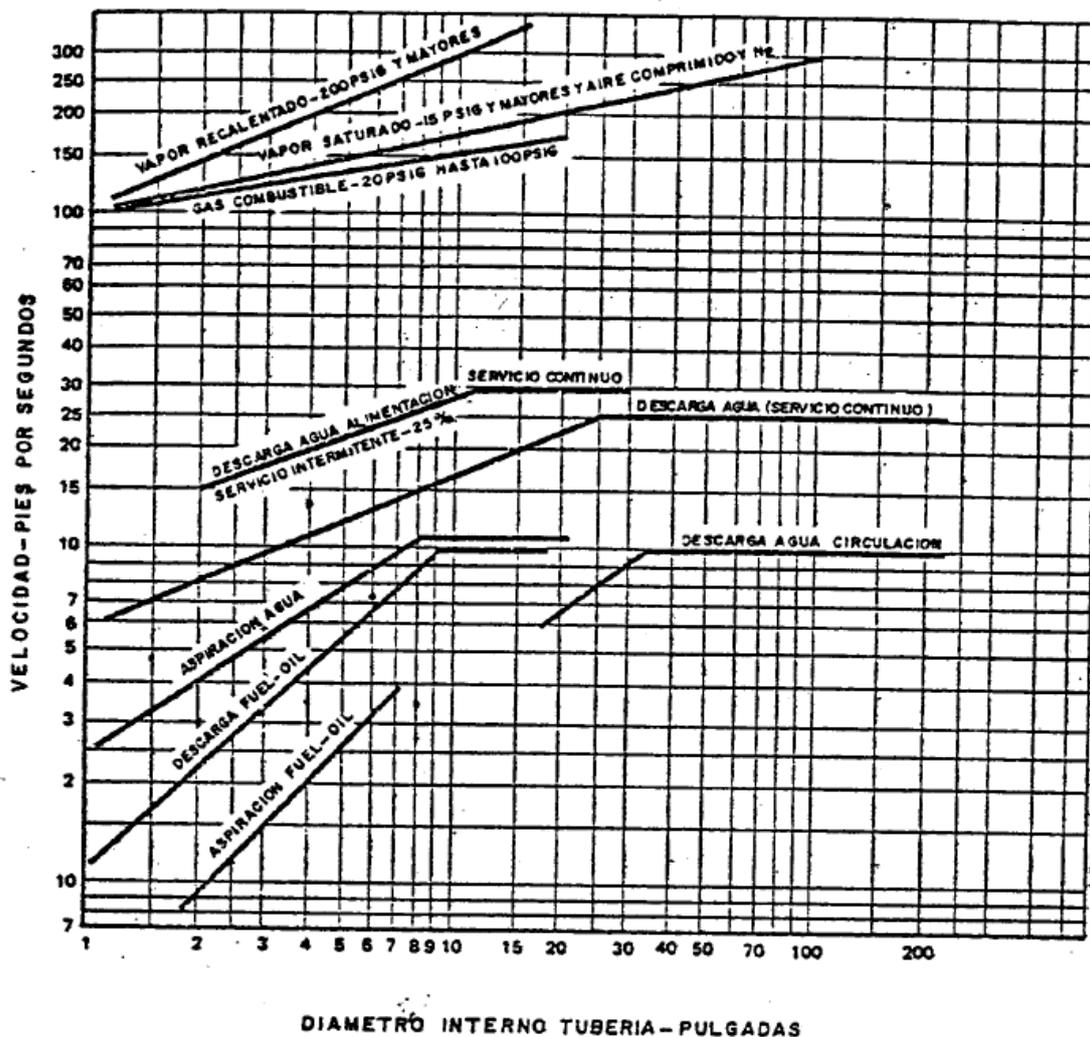


Imagen 4.21 – Velocidades recomendadas

Se trata en este caso de un circuito cerrado que se ajusta a los valores de la curva “Descarga agua (servicio continuo)”. En la siguiente tabla se resumen los valores:

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

<u>DIÁMETRO NOMINAL</u>		<u>VELOCIDAD</u>		<u>DIÁMETRO NOMINAL</u>		<u>VELOCIDAD</u>	
[inch]		[fps]	[m/s]	[inch]		[fps]	[m/s]
1		5.5	1.7	8		15.0	4.6
1 1/4		6.5	2.0	10		16.0	4.9
1 1/2		7.0	2.1	12		17.0	5.2
2		8.0	2.4	14		19.0	5.8
2 1/2		9.0	2.7	16		21.0	6.4
3		9.5	2.9	18		22.0	6.7
4		11.0	3.4	20		23.0	7.0
5		12.0	3.7	24		24.0	7.3
6		13.0	4.0	>24		25.0	7.6

Tabla 4-16 – Valores velocidad límite en tuberías

Mediante estos cálculos se obtienen las siguientes curvas para los trenes A y B, teniendo en cuenta que el tramo B es más desfavorable por ser más largo:

<u>Caudal</u>	<u>BALSA/A/VACÍA</u>		<u>BALSA/B/VACÍA</u>	
	<u>Tren A</u>	<u>Ajuste polinómico</u>	<u>Tren B</u>	<u>Ajuste polinómico</u>
[m ³ /h]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]	[kg/cm ²]
0,00	1,31	1,31	1,31	1,31
200,00	1,32	1,32	1,32	1,32
400,00	1,34	1,34	1,34	1,34
700,00	1,40	1,40	1,40	1,40
1.000,00	1,48	1,48	1,49	1,49
1.300,00	1,60	1,60	1,61	1,61
1.600,00	1,74	1,74	1,76	1,76
1.900,00	1,91	1,91	1,94	1,94
2.200,00	2,11	2,11	2,15	2,15
2.500,00	2,34	2,34	2,39	2,39
2.800,00	2,59	2,59	2,66	2,66
3.100,00	2,88	2,87	2,96	2,96
3.400,00	3,19	3,19	3,29	3,29
3.700,00	3,52	3,53	3,64	3,64
4.000,00	3,90	3,89	4,03	4,03
4.300,00	4,29	4,29	4,45	4,45

Tabla 4-17 – Valores de pérdida de carga en la línea con ajuste

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

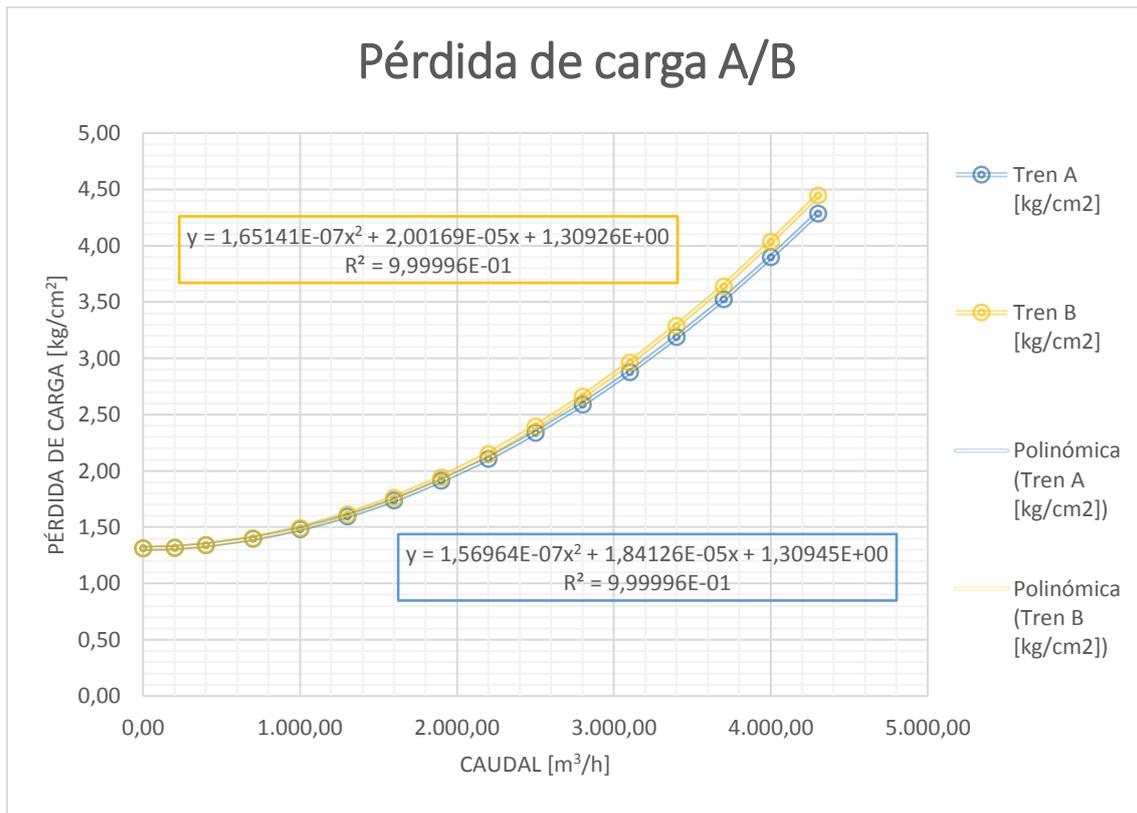


Imagen 4.22 – Pérdida de carga trenes A y B

Con los datos de la tabla se grafican las curvas de cada tren (A y B) y mediante el ajuste polinómico (de 2 grado) se obtienen las siguientes curvas, para el caso cuando la balsa está vacía:

Tren A:

$$TDH = 1,30945 + 1,84126 \cdot 10^{-5} \cdot Q_v + 1,56964 \cdot 10^{-7} \cdot Q_v^2$$

Con $R^2 = 0,999996$

Validez $0 \leq Q_v \leq 4300 [m^3/h]$

Tren B:

$$TDH = 1,30926 + 2,00169 \cdot 10^{-5} \cdot Q_v + 1,65141 \cdot 10^{-7} \cdot Q_v^2$$

Con $R^2 = 0,999996$

Validez $0 \leq Q_v \leq 4300 [m^3/h]$

El término independiente corresponde matemáticamente a la diferencia de altura entre altura hidrostática en aspiración (lámina de balsa) y la altura hidrostática en impulsión (torres), expresada en $[kg/cm^2]$.

Para obtener la curva característica del circuito con la balsa llena, que corresponde al escenario de operación más habitual, solo es necesario corregir el término independiente por la variación de la cota de altura entre balsa vacía y la balsa llena

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

$$TI = \frac{1}{98100} \cdot g \cdot \rho \cdot (H_{out} - H_{in}) = \frac{1}{98100} \cdot 9,81 \cdot 997,6 \cdot (107,500 - 99,100) = 0,84$$

De tal manera que las curvas características de los trenes serán:

Tren A:

$$TDH = 0,84 + 1,84126 \cdot 10^{-5} \cdot Q_v + 1,56964 \cdot 10^{-7} \cdot Q_v^2$$

Tren B:

$$TDH = 0,84 + 2,00169 \cdot 10^{-5} \cdot Q_v + 1,65141 \cdot 10^{-7} \cdot Q_v^2$$

Calculada la curva característica de la bomba y las curvas de los trenes A y B se pueden hallar los puntos de funcionamiento, según las siguientes gráficas:

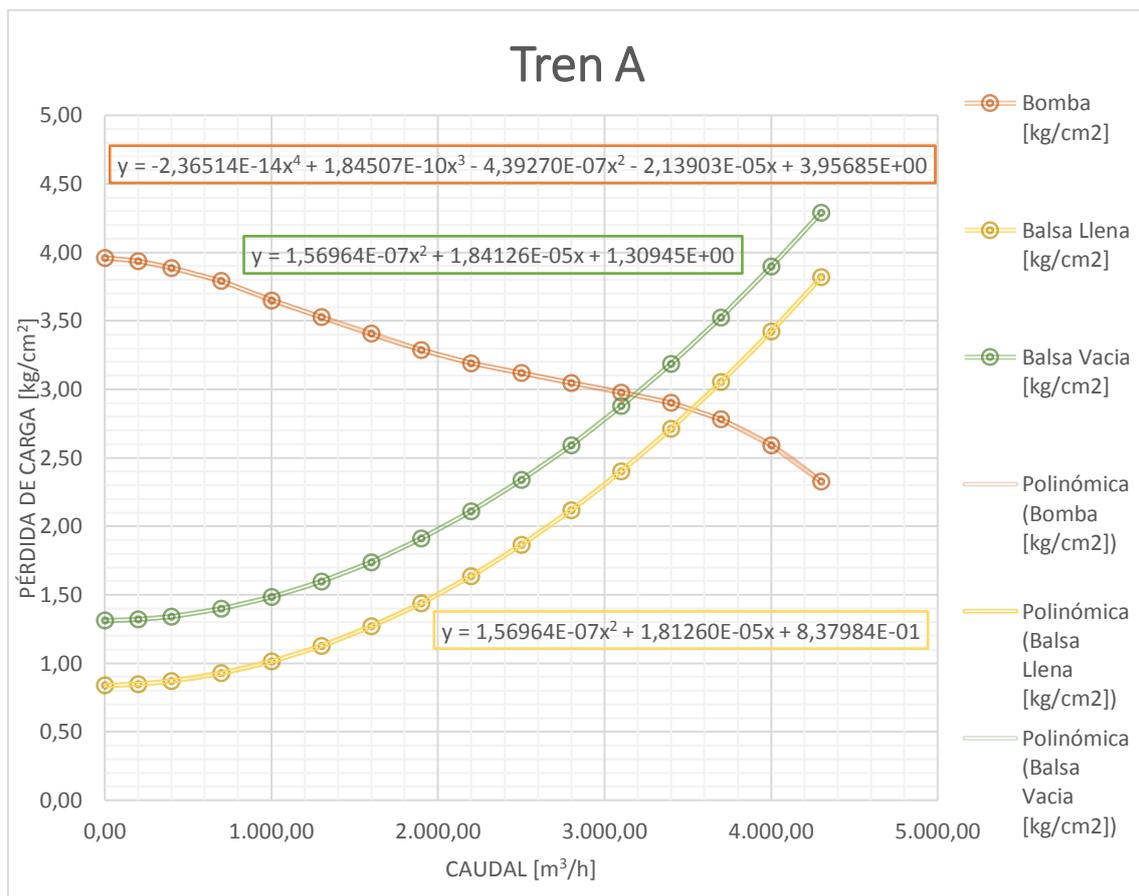


Imagen 4.23 – Curvas características tren A

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

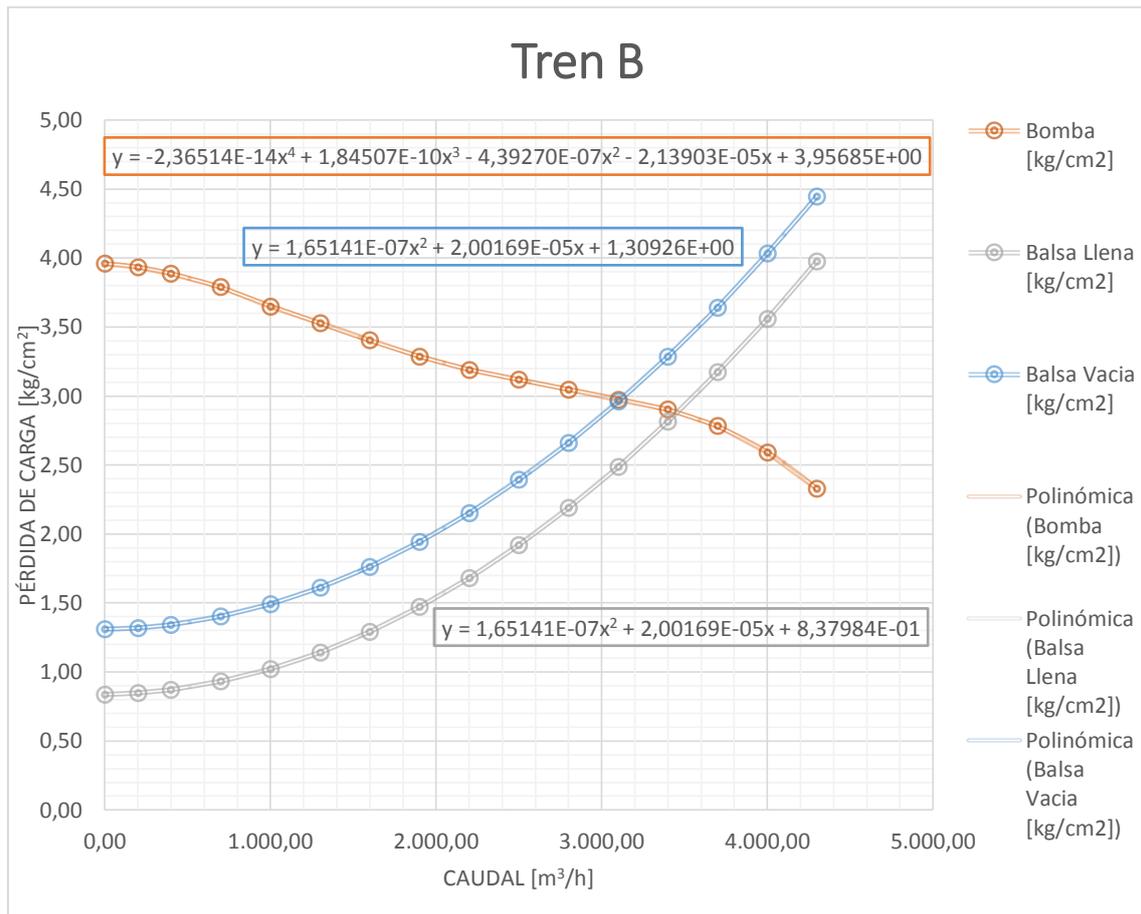


Imagen 4.24 – Curvas características tren B

En la tabla siguiente se indican los valores de la pérdida de carga en las tuberías con la balsa llena y vacía, así como la pérdida de carga que se produce con la bomba:

Caudal [m ³ /h]	TREN A			TREN B	
	Bomba [kg/cm ²]	Balsa Llena [kg/cm ²]	Balsa Vacía [kg/cm ²]	Balsa Llena [kg/cm ²]	Balsa Vacía [kg/cm ²]
0,00	3,96	0,84	1,31	0,84	1,31
200,00	3,93	0,85	1,32	0,85	1,32
400,00	3,89	0,87	1,34	0,87	1,34
700,00	3,79	0,93	1,40	0,93	1,40
1.000,00	3,65	1,01	1,48	1,02	1,49
1.300,00	3,53	1,13	1,60	1,14	1,61
1.600,00	3,41	1,27	1,74	1,29	1,76
1.900,00	3,29	1,44	1,91	1,47	1,94
2.200,00	3,19	1,64	2,11	1,68	2,15
2.500,00	3,12	1,86	2,34	1,92	2,39
2.800,00	3,05	2,12	2,59	2,19	2,66
3.100,00	2,98	2,40	2,88	2,49	2,96

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

3.400,00	2,90	2,71	3,19	2,82	3,29
3.700,00	2,78	3,05	3,52	3,17	3,64
4.000,00	2,59	3,42	3,90	3,56	4,03
4.300,00	2,33	3,82	4,29	3,98	4,45

Tabla 4-18 – Valores de pérdida de carga con la balsa llena/vacía y en la bomba

Los puntos de corte entre la curva característica de la bomba y las curvas de los trenes dan los siguientes resultados:

	<u>BALSA LLENA</u>	<u>BALSA VACÍA</u>
Tren A	$Q_v = 3525 \text{ [m}^3/\text{h]}$	$Q_v = 3185 \text{ [m}^3/\text{h]}$
Tren B	$Q_v = 3455 \text{ [m}^3/\text{h]}$	$Q_v = 3118 \text{ [m}^3/\text{h]}$

Tabla 4-19 – Caudales obtenidos para trenes A y B

Diferenciando los distintos modos de funcionamiento en los que puede trabajar el sistema EJ, los caudales quedan de la siguiente manera:

	<u>OPERACIÓN NORMAL</u>	<u>PARADA PROGRAMADA</u>	<u>LOCA</u>
	Balsa llena	Balsa llena	Balsa vacía*
Tren A	$Q_v = 3525 \text{ [m}^3/\text{h]}$	$Q_v = 3525 \text{ [m}^3/\text{h]}$	$Q_v = 3185 \text{ [m}^3/\text{h]}$
Tren B	$Q_v = 3455 \text{ [m}^3/\text{h]}$	$Q_v = 3455 \text{ [m}^3/\text{h]}$	$Q_v = 3118 \text{ [m}^3/\text{h]}$

Tabla 4-20 – Caudales obtenidos según el modo de funcionamiento

*En LOCA en peor de los casos el caudal será el mínimo, al vaciarse la balsa.

4.6.3 Balances térmicos

Se realizan a continuación los balances térmicos para los dos Sistema EF y EJ. Cabe mencionar que las cargas térmicas son las mismas para los dos sistemas, pero las temperaturas de funcionamiento varían. El Sistema EF al funcionar con el agua del mar trabaja con temperaturas más bajas que el Sistema EJ.

También hay que indicar que el Sistema EF solo funciona en operación normal y parada, pero el sistema EJ puede funcionar en los tres modos de operación.

4.6.3.1 Sistema EF - EG-E01-A/B.

Se trata de un intercambiador de calor de carcasa y tubo. En la siguiente tabla se indican sus características principales:

<u>EJ-E01A/B</u>	
Tipo	Carcasa horizontal, tubos rectos
Cantidad	2 de 100% capacidad cada uno
Carga térmica	23,66 [MW]
Superficie	2.386,21 [m ²]

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Tubos	
Fluido	Agua de mar
Caudal	3.213,81 [m ³ /h]
T entrada	24,56 [°C]
T salida	31,70 [°C]
P de diseño	10,55 [kg/m ²]
T diseño	93,33 [°C]
Carcasa	
Fluido	Agua tratada con inhibidor de corrosión
Caudal	3.270,59 [m ³ /h]
T entrada	39,61 [°C]
T salida	32,40 [°C]
P de diseño	14,06 [kg/m ²]
T diseño	93,33 [°C]

Tabla 4-21 – Características principales cambiadores EG-E01A/B

Estos datos se han proporcionado por el fabricante de los intercambiadores, a continuación se realizan los balances térmicos para cada modo de operación para comprobar las temperaturas de funcionamiento.

A. OPERACIÓN NORMAL

Lado Caliente - Sistema EG

Hipótesis de partida:

- Se supone un valor para la densidad de 1000 [kg/m³] y Cp de 4,19 [kJ/kg·K].
- El caudal del agua en el lado EG en operación normal es de 13390 [gpm] = 3041 [m³/h]
- Se limita la temperatura de salida del intercambiador a los 35 [°C] como temperatura máxima de salida para asegurar un funcionamiento correcto de la planta.
- La carga térmica que hay que evacuar en la operación normal es de 23,66 [MW]

Por tanto la temperatura máxima permitida de entrada al intercambiador, en el lado carcasa, será de:

$$\begin{aligned}
 Q_c &= \dot{m}[kg/s] \cdot Cp[J/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{cin} - T_{cout})[^\circ C] \\
 &= \left(\dot{Q}_c[m^3/h] \cdot \frac{\rho[kg/m^3]}{3600[s/h]} \right) \cdot Cp[kJ/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{cin} - T_{cout})[^\circ C] \\
 &= \left(3041[m^3/h] \cdot \frac{1000[kg/m^3]}{3600[s/h]} \right) \cdot 4,19[kJ/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{cin} - 35)[^\circ C] \\
 &= 23,66 \cdot 10^3 kW
 \end{aligned}$$

De aquí,

$$T_{cin} = 41,68 \text{ } ^\circ C$$

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Lado Frío - Sistema EF

En este caso existe el límite de salida del agua por el lado frío, al retornar el agua al mar la temperatura máxima permitida de vertido es de 32 [°C] en funcionamiento continuo.

Hipótesis de partida:

- Se supone un valor para la densidad de 1000 [kg/m³] y Cp de 4,19 [kJ/kg·K]
- La temperatura de entrada al intercambiador por el lado tubos, proveniente del mar, como máximo será del 24,5 [°C]
- La carga térmica que hay que evacuar en la operación normal es de 23,66 [MW]

Por tanto la temperatura de salida del intercambiador en caso de peores condiciones será de:

Para Tren A:

Hipótesis de partida:

- El caudal en el lado de los tubos es de 2790 [m³/h]

$$\begin{aligned} Q_f &= \dot{m} [kg/s] \cdot Cp [J/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - T_{f_{in}}) [^\circ C] \\ &= \left(\dot{Q}_f [m^3/h] \cdot \frac{\rho [kg/m^3]}{3600 [s/h]} \right) \cdot Cp [kJ/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - T_{f_{in}}) [^\circ C] \\ &= \left(2790 [m^3/h] \cdot \frac{1000 [kg/m^3]}{3600 [s/h]} \right) \cdot 4,19 [kJ/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - 24,5) [^\circ C] \\ &= 23,66 \cdot 10^3 kW \end{aligned}$$

De aquí,

$$T_{f_{out}} = 31,78 \text{ } ^\circ C$$

Se comprueba que la temperatura de salida es menor de 32 [°C].

Para Tren B:

En operación normal solo funcionaria el Tren A.

B. PARADA

Repitiendo los mismos cálculos pero para el caso de parada de la planta se obtienen estos resultados:

Lado Caliente - Sistema EG

Hipótesis de partida:

- Se supone un valor para la densidad de 1000 [kg/m³] y Cp de 4,19 [kJ/kg·K].
- El caudal del agua en el lado EG en operación normal es de 14360 [gpm] = 3261,5 [m³/h].
- Se limita la temperatura de salida del intercambiador a los 48,9 [°C] como temperatura máxima de salida para asegurar un funcionamiento correcto de la planta.
- La carga térmica que hay que evacuar en la operación normal es de 43,53 [MW].

Por tanto la temperatura máxima de entrada al intercambiador, en el lado carcasa, será de:

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

$$\begin{aligned}
 Q_c &= \dot{m}[\text{kg/s}] \cdot C_p[\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}] \cdot (T_{c_{in}} - T_{c_{out}})[^\circ\text{C}] \\
 &= \left(\dot{Q}_c[\text{m}^3/\text{h}] \cdot \frac{\rho[\text{kg/m}^3]}{3600[\text{s/h}]} \right) \cdot C_p[\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}] \cdot (T_{c_{in}} - T_{c_{out}})[^\circ\text{C}] \\
 &= \left(3261,5[\text{m}^3/\text{h}] \cdot \frac{1000[\text{kg/m}^3]}{3600[\text{s/h}]} \right) \cdot 4,19[\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}] \cdot (T_{c_{in}} - 48,9)[^\circ\text{C}] \\
 &= 43,53 \cdot 10^3 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

De aquí,

$$T_{c_{in}} = 60,37 ^\circ\text{C}$$

Lado Frío - Sistema EF

En este caso al tratarse de la parada de la central se permite la salida del agua a mar sea a 38 [°C], ya que las paradas en la central ocurren solo en las recargas de combustible.

Hipótesis de partida:

- Se supone un valor para la densidad de 1000 [kg/m³] y Cp de 4,19 [kJ/kg·K].
- La temperatura de entrada al intercambiador por el lado tubos, proveniente del mar, como máximo será del 24,5 [°C].
- La carga térmica que hay que evacuar en la operación normal es de 43,53 [MW].

Por tanto la temperatura de salida del intercambiador en caso de peores condiciones será de:

Para Tren A:

Hipótesis de partida:

- El caudal en el lado de los tubos es de 2790 m³/h

$$\begin{aligned}
 Q_f &= \dot{m}[\text{kg/s}] \cdot C_p[\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}] \cdot (T_{f_{out}} - T_{f_{in}})[^\circ\text{C}] \\
 &= \left(\dot{Q}_f[\text{m}^3/\text{h}] \cdot \frac{\rho[\text{kg/m}^3]}{3600[\text{s/h}]} \right) \cdot C_p[\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}] \cdot (T_{f_{out}} - T_{f_{in}})[^\circ\text{C}] \\
 &= \left(2790[\text{m}^3/\text{h}] \cdot \frac{1000[\text{kg/m}^3]}{3600[\text{s/h}]} \right) \cdot 4,19[\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}] \cdot (T_{f_{out}} - 35)[^\circ\text{C}] \\
 &= 43,53 \cdot 10^3 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

De aquí,

$$T_{f_{out}} = 37,9 ^\circ\text{C}$$

Para Tren B

Hipótesis de partida:

- En el Tren B se debe evacuar 29,17 [MW]
- El caudal en el lado de los tubos es de 2590 [m³/h]

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

$$\begin{aligned}
 Q_f &= \dot{m} [kg/s] \cdot Cp [J/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - T_{f_{in}}) [^\circ C] \\
 &= \left(\dot{Q}_f [m^3/h] \cdot \frac{\rho [kg/m^3]}{3600 [s/h]} \right) \cdot Cp [J/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - T_{f_{in}}) [^\circ C] \\
 &= \left(2590 [m^3/h] \cdot \frac{1000 [kg/m^3]}{3600 [s/h]} \right) \cdot 4,19 [J/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - 24,5) [^\circ C] \\
 &= 29,17 \cdot 10^3 kW
 \end{aligned}$$

De aquí

$$T_{f_{out}} = 34,17 ^\circ C$$

Se comprueba que la temperatura de salida es menor de 38 [°C].

C. LOCA

En LOCA el Sistema EF no funciona.

Calculo del coeficiente total de transferencia de calor U_c

Para calcular U_c se utiliza la siguiente expresión:

$$Q = A \cdot U_c \cdot \Delta T_{ml}$$

ΔT_{ml} es la temperatura media logarítmica que se calcula como:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Para el intercambiador de calor EG-E01A/B, se tiene que:

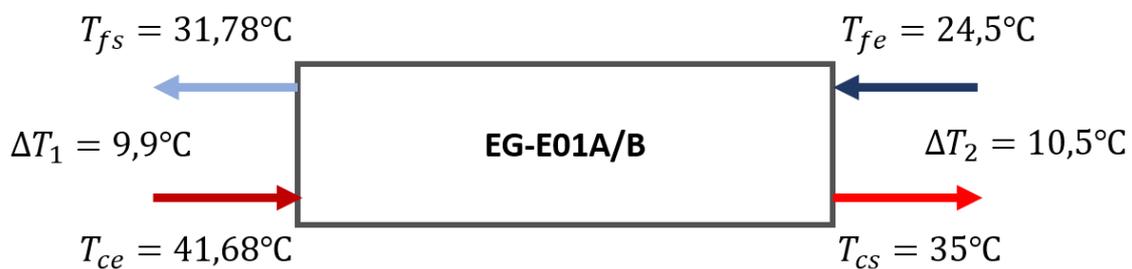


Imagen 4.25 – Intercambiador de calor EG-E01A/B

De aquí se obtiene que:

$$\Delta T_{ml} = \frac{9,9 - 10,5}{\ln\left(\frac{9,9}{10,5}\right)} = 10,19^\circ C$$

El dato del área de intercambio de calor ha sido proporcionado por el fabricante de los intercambiadores.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Sabiendo que el área de intercambio de calor en este intercambiador es de 2386 [m²], el coeficiente de transferencia de calor es igual a:

$$U_c = \frac{23,66 \cdot 10^6 W}{2386,21 m^2 \cdot 10,19^\circ C} = 973,04 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Este valor está en el rango de valor para U_c para el caso de intercambio de calor entre agua-agua, que es de 850-1700 [W/m²·°C] (según se indica en el libro Transferencia de calor y masa, Yunus Cengel, Tema 11).

4.6.3.2 Sistema EJ - EG-E02-A/B

Se trata de un intercambiador de calor de carcasa y tubo. En la siguiente tabla se indican sus características principales:

EJ-E02A/B	
Tipo	Carcasa horizontal, tubos rectos
Cantidad	2 de 100% capacidad cada uno
Carga térmica	23,66 [MW]
Superficie	2.068,00 [m ²]
Tubos	
Fluido	Agua de balsa
Caudal	3.480,00 [m ³ /h]
T entrada	27,80 [°C]
T salida	33,83 [°C]
P de diseño	10,55 [kg/m ²]
T diseño	93,33 [°C]
Carcasa	
Fluido	Agua tratada con inhibidor de corrosión
Caudal	3.041,20 [m ³ /h]
T entrada	41,76 [°C]
T salida	34,80 [°C]
P de diseño	14,06 [kg/m ²]
T diseño	93,33 [°C]

Tabla 4-22 – Características principales cambiadores EG-E02A/B

Estos datos se han proporcionado por el fabricante de los intercambiadores, a continuación se realizan los balances térmicos para cada modo de operación para comprobar las temperaturas de funcionamiento.

A. OPERACIÓN NORMAL

Lado Caliente - Sistema EG

Hipótesis de partida:

- Se supone un valor para la densidad de 1000 [kg/m³] y Cp de 4,19 [kJ/kg·K].
- El caudal del agua en el lado EG en operación normal es de 13390 [gpm] = 3041 [m³/h]

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

- Se limita la temperatura de salida del intercambiador a los 35 [°C] como temperatura máxima de salida para asegurar un funcionamiento correcto de la planta
- La carga térmica que hay que evacuar en la operación normal es de 23,66 [MW]

Por tanto la temperatura máxima permitida de entrada al intercambiador, en el lado carcasa, será de:

$$\begin{aligned}
 Q_c &= \dot{m}[kg/s] \cdot Cp[J/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{c_{in}} - T_{c_{out}})[^\circ C] \\
 &= \left(\dot{Q}_c[m^3/h] \cdot \frac{\rho[kg/m^3]}{3600[s/h]} \right) \cdot Cp[kJ/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{c_{in}} - T_{c_{out}})[^\circ C] \\
 &= \left(3041[m^3/h] \cdot \frac{1000[kg/m^3]}{3600[s/h]} \right) \cdot 4,19[kJ/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{c_{in}} - 35)[^\circ C] \\
 &= 23,66 \cdot 10^3 kW
 \end{aligned}$$

De aquí,

$$T_{c_{in}} = 41,68 \text{ } ^\circ C$$

Lado Frío - Sistema EJ

Hipótesis de partida:

- Se supone un valor para la densidad de 1000 [kg/m³] y Cp de 4,19 [kJ/kg·K]
- La temperatura de entrada al intercambiador por el lado tubos, proveniente de la balsa, como máximo será del 27,8 [°C]
- La carga térmica que hay que evacuar en la operación normal es de 23,66 [MW]

Por tanto la temperatura de salida del intercambiador en caso de peores condiciones será de:

Para Tren A:

Hipótesis de partida:

- El caudal en el lado de los tubos es de 3525 [m³/h]

$$\begin{aligned}
 Q_f &= \dot{m}[kg/s] \cdot Cp[J/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - T_{f_{in}})[^\circ C] \\
 &= \left(\dot{Q}_f[m^3/h] \cdot \frac{\rho[kg/m^3]}{3600[s/h]} \right) \cdot Cp[kJ/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - T_{f_{in}})[^\circ C] \\
 &= \left(3525[m^3/h] \cdot \frac{1000[kg/m^3]}{3600[s/h]} \right) \cdot 4,19[kJ/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - 27,8)[^\circ C] \\
 &= 23,66 \cdot 10^3 kW
 \end{aligned}$$

De aquí,

$$T_{f_{out}} = 33,56 \text{ } ^\circ C$$

Para Tren B:

En operación normal solo funcionaria el Tren A.

B. PARADA

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Repitiendo los mismos cálculos pero para el caso de parada de la planta se obtienen estos resultados:

Lado Caliente - Sistema EG

Hipótesis de partida:

- Se supone un valor para la densidad de 1000 [kg/m³] y Cp de 4,19 [kJ/kg·K].
- El caudal del agua en el lado EG en operación normal es de 14360 [gpm] = 3261,5 [m³/h].
- Se limita la temperatura de salida del intercambiador a los 48,9 [°C] como temperatura máxima de salida para asegurar un funcionamiento correcto de la planta.
- La carga térmica que hay que evacuar en la operación normal es de 43,53 [MW].

Por tanto la temperatura máxima de entrada al intercambiador, en el lado carcasa, será de:

$$\begin{aligned}
 Q_c &= \dot{m}[kg/s] \cdot Cp[J/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{c_{in}} - T_{c_{out}})[^\circ C] \\
 &= \left(\dot{Q}_c[m^3/h] \cdot \frac{\rho[kg/m^3]}{3600[s/h]} \right) \cdot Cp[kJ/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{c_{in}} - T_{c_{out}})[^\circ C] \\
 &= \left(3261,5[m^3/h] \cdot \frac{1000[kg/m^3]}{3600[s/h]} \right) \cdot 4,19[kJ/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{c_{in}} - 48,9)[^\circ C] \\
 &= 43,53 \cdot 10^3 kW
 \end{aligned}$$

De aquí,

$$T_{c_{in}} = 60,37 \text{ } ^\circ C$$

Lado Frío - Sistema EJ

Hipótesis de partida:

- Se supone un valor para la densidad de 1000 [kg/m³] y Cp de 4,19 [kJ/kg·K].
- La temperatura de entrada al intercambiador por el lado tubos, proveniente de la balsa, como máximo es del 35 [°C].
- La carga térmica que hay que evacuar en la operación normal es de 43,53 [MW].

Por tanto la temperatura de salida del intercambiador en caso de peores condiciones será de:

Para Tren A:

Hipótesis de partida:

- El caudal en el lado de los tubos es de 3525 m³/h

$$\begin{aligned}
 Q_f &= \dot{m}[kg/s] \cdot Cp[J/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - T_{f_{in}})[^\circ C] \\
 &= \left(\dot{Q}_f[m^3/h] \cdot \frac{\rho[kg/m^3]}{3600[s/h]} \right) \cdot Cp[kJ/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - T_{f_{in}})[^\circ C] \\
 &= \left(3525[m^3/h] \cdot \frac{1000[kg/m^3]}{3600[s/h]} \right) \cdot 4,19[kJ/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - 35)[^\circ C] \\
 &= 43,53 \cdot 10^3 kW
 \end{aligned}$$

De aquí,

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

$$T_{f_{out}} = 45,61 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para Tren B

Hipótesis de partida:

- En el Tren B se debe evacuar 29,17 [MW]
- El caudal en el lado de los tubos es de 3455 [m³/h]

$$\begin{aligned} Q_f &= \dot{m}[\text{kg/s}] \cdot Cp[\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}] \cdot (T_{f_{out}} - T_{f_{in}})[^\circ\text{C}] \\ &= \left(\dot{Q}_f[\text{m}^3/\text{h}] \cdot \frac{\rho[\text{kg/m}^3]}{3600[\text{s/h}]} \right) \cdot Cp[\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}] \cdot (T_{f_{out}} - T_{f_{in}})[^\circ\text{C}] \\ &= \left(3455[\text{m}^3/\text{h}] \cdot \frac{1000[\text{kg/m}^3]}{3600[\text{s/h}]} \right) \cdot 4,19[\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}] \cdot (T_{f_{out}} - 35)[^\circ\text{C}] \\ &= 29,17 \cdot 10^3 \text{ kW} \end{aligned}$$

De aquí

$$T_{f_{out}} = 42,25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

C. LOCA

Lado Caliente - Sistema EG

Hipótesis de partida:

- Se supone un valor para la densidad de 1000 [kg/m³] y Cp de 4,19 [kJ/kg·K].
- El caudal del agua en el lado EG en operación normal es de 10400 [gpm] = 2362 [m³/h]
- Se limita la temperatura de salida del intercambiador a los 48,9 [°C] como temperatura máxima de salida para asegurar un funcionamiento correcto de la planta
- La carga térmica que hay que evacuar en la operación normal es de 42 [MW]

Por tanto la temperatura máxima de entrada al intercambiador, en el lado carcasa, será de:

$$\begin{aligned} Q_c &= \dot{m}[\text{kg/s}] \cdot Cp[\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}] \cdot (T_{c_{in}} - T_{c_{out}})[^\circ\text{C}] \\ &= \left(\dot{Q}_c[\text{m}^3/\text{h}] \cdot \frac{\rho[\text{kg/m}^3]}{3600[\text{s/h}]} \right) \cdot Cp[\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}] \cdot (T_{c_{in}} - T_{c_{out}})[^\circ\text{C}] \\ &= \left(2362[\text{m}^3/\text{h}] \cdot \frac{1000[\text{kg/m}^3]}{3600[\text{s/h}]} \right) \cdot 4,19[\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}] \cdot (T_{c_{in}} - 48,9)[^\circ\text{C}] \\ &= 42 \cdot 10^3 \text{ kW} \end{aligned}$$

De aquí,

$$T_{c_{in}} = 64,18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Lado Frío - Sistema EJ

Hipótesis de partida:

- Se supone un valor para la densidad de 1000 [kg/m³] y Cp de 4,19 [kJ/kg·K].
- La temperatura de entrada al intercambiador por el lado tubos, proveniente de la balsa, como máximo es del 35 [°C]

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

- La carga térmica que hay que evacuar en la operación normal es de 42 [MW]

Por tanto la temperatura de salida del intercambiador en caso de peores condiciones será de:

Para Tren A:

Hipótesis de partida:

El caudal en el lado de los tubos es de 3185 [m³/h]. Este será el caudal en caso de vaciarse la balsa:

$$\begin{aligned} Q_f &= \dot{m} [kg/s] \cdot Cp [J/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - T_{f_{in}}) [^\circ C] \\ &= \left(\dot{Q}_f [m^3/h] \cdot \frac{\rho [kg/m^3]}{3600 [s/h]} \right) \cdot Cp [kJ/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - T_{f_{in}}) [^\circ C] \\ &= \left(3184,75 [m^3/h] \cdot \frac{1000 [kg/m^3]}{3600 [s/h]} \right) \cdot 4,19 [kJ/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - 35) [^\circ C] \\ &= 42 \cdot 10^3 kW \end{aligned}$$

De aquí

$$T_{f_{out}} = 46,33 \text{ } ^\circ C$$

Para Tren B:

Hipótesis de partida:

- En el Tren B se debe evacuar 42 [MW]

El caudal en el lado de los tubos es de 3118 [m³/h]. Este será el caudal en caso de vaciarse la balsa:

$$\begin{aligned} Q_f &= \dot{m} [kg/s] \cdot Cp [J/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - T_{f_{in}}) [^\circ C] \\ &= \left(\dot{Q}_f [m^3/h] \cdot \frac{\rho [kg/m^3]}{3600 [s/h]} \right) \cdot Cp [kJ/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - T_{f_{in}}) [^\circ C] \\ &= \left(3118 [m^3/h] \cdot \frac{1000 [kg/m^3]}{3600 [s/h]} \right) \cdot 4,19 [kJ/kg \cdot ^\circ C] \cdot (T_{f_{out}} - 35) [^\circ C] \\ &= 42 \cdot 10^3 kW \end{aligned}$$

De aquí,

$$T_{f_{out}} = 46,57 \text{ } ^\circ C$$

Calculo del coeficiente total de transferencia de calor U_c

Para calcular U_c se utiliza la siguiente expresión:

$$Q = A \cdot U_c \cdot \Delta T_{ml}$$

ΔT_{ml} es la temperatura media logarítmica que se calcula como:

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Para el intercambiador de calor EG-E01A/B, se tiene que:

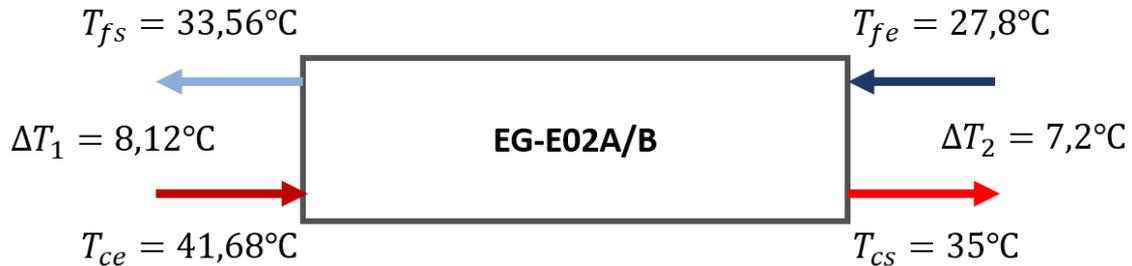


Imagen 4.26 – Intercambiador de calor EG-E02A/B

De aquí se obtiene que:

$$\Delta T_{ml} = \frac{8,12 - 7,2}{\ln\left(\frac{8,12}{7,2}\right)} = 7,65^\circ\text{C}$$

Sabiendo que el área de intercambio de calor en este intercambiador es de 2386 [m²], el coeficiente de transferencia de calor es igual a:

$$U_c = \frac{23,66 \cdot 10^6 \text{ W}}{2068 \text{ m}^2 \cdot 7,65^\circ\text{C}} = 1496 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

El dato del área de intercambio de calor ha sido proporcionado por el fabricante de los intercambiadores.

Este valor es coherente con el rango de valores de U_c para el caso de intercambio de calor entre agua-agua, que es de 850-1700 [W/m²·°C] (según se indica en el libro Transferencia de calor y masa, Yunus Cengel, Tema 11).

Comparando los dos valor de U_c obtenidos, se observa que son bastante diferentes, esto se debe a que el intercambiador EG-E01A/B del sistema EF funciona con el agua del mar, que no es tan buena conductora del calor como el agua normal.

4.6.4 Caudal de evaporación en las torres de refrigeración

Consumo de agua por operación de torres

Se establecen los siguientes consumos de agua (evaporación + arrastre) para los siguientes modos de operación:

A. Stand-by

Se contemplan ligeras pérdidas en las torres por recirculación del agua para el tratamiento químico. A efectos prácticos, se considera un porcentaje equivalente al de arrastre (según la hoja de datos de la torre el arrastre es del 0,01%) que se produce por la recirculación:

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

- El caudal de recirculación es de 625 [m³/h]

$$Consumo_{stand-by} = 625 \frac{m^3}{(h \cdot tren)} \cdot 0,0001 = 0,06 \frac{m^3}{(h \cdot tren)}$$

En el funcionamiento normal de la central, el sistema EJ estará parado (en stand-by), las pérdidas serán de 0,12 [m³/h].

B. Operación Normal

En operación normal y en caso de requerirse que el sistema EJ entre en funcionamiento, uno de los trenes estará trabajando y otro estará parado. Además cada uno de los dos trenes dispone de 4 ventiladores, de los cuales 3 estarán funcionando y 1 estará parado.

Para operación normal se establecen los siguientes valores:

Hipótesis de partida:

- Para estos cálculos se escoge el caudal máximo con el que podrían funcionar las dos torres y que se establece por el fabricante, que es de 3850 [m³/h]
- La evaporación en la torre establecida por el fabricante es del 0,89%, se indica en la hoja de datos
- El arrastre del agua en la torre por el movimiento del aire al realizarse el enfriamiento del agua es del 0,01%, establecido por el fabricante y se indica en la hoja de datos

Torre en disipación:

Las pérdidas que se producen en la torre son debidas a la evaporación del agua debido al enfriamiento y al arrastre que se produce por la corriente del aire.

- Evaporación:

La evaporación que se produce en la torre debido al proceso de enfriamiento del agua proveniente de los intercambiadores EG-E02A/B:

- Para un ventilador

$$Consumo_{Evaporación\ 1\ ventilador} = (3850 \frac{m^3}{h} / 4\ ud) \cdot 0,0089 = 8,57\ m^3 / (h \cdot ud)$$

- Y para 3 ventiladores funcionando

$$Consumo_{Evaporación} = 3\ uds \cdot 8,57\ m^3 / (h \cdot ud) = 25,7\ \frac{m^3}{h}$$

- Arrastre:

Arrastre que se produce en el flujo del agua:

- Para un ventilador

$$Consumo_{Arrastre\ 1\ ventilador} = (3850 \frac{m^3}{h} / 4\ ud) \cdot 0,0001 = 0,096\ m^3 / (h \cdot ud)$$

- Y para 3 ventiladores funcionando

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

$$\text{Consumo}_{\text{Arrastre}} = 3 \text{ uds} \cdot 0,096 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{ud}) = 0,29 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Torre detenida:

Para el caso de un ventilador detenido se considera el consumo igual al caso de Stand-by de 0,06 [m³/h].

En total el consumo de agua en operación normal supone:

$$\begin{aligned} \text{Consumo} &= 3 \text{ ventiladores funcionando} + 1 \text{ ventilador en Stand - by} \\ &= 25,7 + 0,29 + 0,06 = 26,05 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \end{aligned}$$

El aporte de agua necesario para cubrir las pérdidas - sin contar purga y pérdidas por fugas o evaporación superficial de balsa - es de 26,05 [m³/h].

Según los requisitos establecidos se debe asegurar un funcionamiento continuo del sistema EJ durante 30 días. Por ello el volumen de la balsa para almacenar el agua será de:

$$\text{Volumen} = \text{Consumo} \cdot 24 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \cdot 30 \text{ días} = 26,05 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 24 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \cdot 30 \text{ días} = 18756 \text{ m}^3$$

Se sobredimensiona el volumen de la balsa en un 10% para asegurarnos que almacenará suficiente agua, por ello el volumen mínimo para compensar la evaporación y el arrastre será de:

$$\text{Volumen} = 18756 \text{ m}^3 \cdot 10\% = 20631 \approx 20650 \text{ m}^3$$

C. Parada normal

La parada normal es dinámica, siendo el consumo variable en el tiempo. Como consumo máximo se contempla, como aproximación, un aporte máximo proporcional a la potencia disipada respecto a operación normal:

$$26,05 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{43,53 \text{ MW} + 29,16 \text{ MW}}{23,66 \text{ MW}} = 80,03 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

En el escenario de Parada Normal están disipando calor ambos trenes. Y no es necesario un aporte de agua durante 30 días por lo que la parada normal no se contempla dentro de los requisitos de aportación y nivel de balsa.

D. LOCA

El LOCA es dinámico, siendo el consumo variable en el tiempo. La cantidad total corresponde al volumen termodinámico de la balsa.

4.6.5 Dimensionamiento de la balsa

Evaporación de la Balsa

Se supone un valor de evaporación medio de 10,5 [mm/día]. Por ello, debido a la evaporación de la balsa que se va a producir se necesita un aporte adicional de agua de:

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

$$\begin{aligned} \text{Evaporación balsa} &= \text{Tasa evaporación} \cdot \text{Superficie} \cdot \text{N}^{\circ} \text{ de días} \\ &= 10,5 \frac{\text{mm}}{\text{día}} \cdot 1000 \frac{\text{m}}{\text{mm}} \cdot (2971 + 3002 + 580) \text{m}^2 \cdot 30 \text{días} = 2064,2 \text{m}^3 \end{aligned}$$

Al igual que antes se sobredimensiona este volumen en un 10%, resultando ser la evaporación de la balsa:

$$\text{Evaporación balsa} = 2064,2 \text{m}^3 \cdot 1,1 = 2271 \text{m}^3 \approx 2300 \text{m}^3$$

Conclusiones

Se resumen en la tabla siguiente los datos calculados:

<u>PÉRDIDAS</u>	<u>CONSUMO DE AGUA</u>	<u>COMENTARIOS</u>
Consumo por evaporación y arrastre en las torres	20650 [m ³ /h]	Supuesto un aumento del 10%
Pérdidas por evaporación y arrastre en la balsa	2300 [m ³ /h]	Supuesto un aumento del 10%
Consumo total de agua	23650 [m³/h]	Suma de las pérdidas por evaporación y arrastre en la balsa y torres

Tabla 4-23 – Capacidad de almacenamiento de la balsa

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

5 PROGRAMACIÓN

5.1 PLANIFICACIÓN DE LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO

Planificación

Para la realización del proyecto completo, es decir desde la parte de estudios previos hasta la instalación y puesta en marcha de los equipos se consideran las siguientes etapas:

- **ADJUDICACIÓN DEL PROYECTO**

El paso previo a la adjudicación es la preparación de la oferta, donde se presenta al cliente los aspectos más importantes de la empresa, para mostrar la solvencia y la capacidad suficiente para realizar el proyecto.

- **TRABAJOS PREVIOS**

Tras la adjudicación del proyecto la etapa siguiente son los estudios previos. El siguiente paso es la aprobación de los resultados por parte del cliente.

- **INGENIERÍA**

En esta etapa se realiza la ingeniería de básica. Se analizan las diferentes alternativas para la ubicación óptima de los equipos de los que se compone el sistema. A continuación se realizan los cálculos necesarios para realizar el dimensionamiento de los equipos tales como:

- Torres de Refrigeración
- Balsa de almacenamiento
- Intercambiadores de calor
- Bombas
- Válvulas
- Tuberías

Tras la aprobación por el cliente de los cálculos realizados se procede con la ingeniería de detalle y el diseño y aprobación de:

- Obra Civil
- Instalaciones Eléctricas
- Instrumentación y Control

Realizadas estas tareas el siguiente paso es la preparación de las hojas de datos de los elementos de los que se compone el sistema para solicitar las ofertas a diferentes empresas de suministro de bienes y servicios.

También en esta etapa se realizan los planos de detalle de la instalación.

- **GESTIÓN DE COMPRAS**

Al realizar la petición de oferta a las diferentes empresas de suministro el siguiente paso es analizar los datos proporcionados y elegir aquellas ofertas que presenten la mejor combinación de precio y alcance de suministro.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

- **ACOPIOS**

A continuación se realiza el proceso de compra de los equipos y materiales para la construcción. En este proceso es necesario llevar un control del proceso de fabricación y realizar pruebas en la recepción de los bienes.

- **EJECUCIÓN**

El último paso es la realización de trabajos para la instalación del sistema y su puesta en marcha. También se debe realizar la supervisión de obra y montaje.

Recursos

Para la realización de los trabajos descritos en la parte de Planificación, será necesario disponer de los siguientes perfiles:

- Ingenieros Nucleares – Al realizarse los trabajos en una central nuclear es necesario disponer de ingenieros especializados en temas de ingeniería nuclear
- Ingenieros Mecánicos – Para el diseño de equipos y accesorios
- Ingenieros Civiles – Para las obras de construcción
- Ingenieros Eléctricos – Realizan el diseño de instalaciones eléctricas
- Ingenieros de Instrumentación y Control – Realizan la parte de control de la instalación
- Project Managers – encargados de la supervisión del proyecto

La planificación de este proyecto se adjunta en el **Anexo V – Planificación**.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

6 ASPECTOS ECONÓMICOS

6.1 PRESUPUESTO

En la tabla siguiente se representa el resumen del presupuesto para este proyecto. En él se incluyen las partidas de los siguientes trabajos:

- Obra Civil
- Tubería y accesorios finales
- Equipos
- Electricidad
- Instrumentación y Control

RESUMEN FINAL DE COSTES

#	Descripción	Coste [€]
1.	Ingeniería & Gestión Proyecto	5.750.000,00
1.1	Ingeniería Básica y Detalle	1.500.000,00
1.2	Coordinación y Gestión de Proyecto	2.000.000,00
1.3	Garantía de Calidad	1.100.000,00
1.4	Dirección de Puesta en Marcha	1.150.000,00
2.	OBRA CIVIL	4.775.800,75
2.1	BALSA AGUA	1.614.577,47
2.2	GALERIAS ENTERRADAS	2.149.805,30
2.3	CIMENTACIONES	690.717,83
2.4	EDIFICIOS (INTERCAMBIADORES , ELECTRICO)	320.700,16
3.	TUBERIAS , VALVULAS , ACCESORIOS (SUMINISTRO)	8.279.548,90
3.1	SISTEMA EJ	6.911.520,99
3.2	SISTEMA EG	1.368.027,91
4.	TUBERIAS, VALVULAS, ACCES. (PREF & MONTAJE)	3.614.006,78
4.1	SISTEMA EJ	2.760.106,54
4.2	SISTEMA EG	853.900,24
5.	EQUIPOS (SUMINISTRO Y MONTAJE)	11.547.520,00
5.1	INTERCAMBIADORES	2.070.000,00
5.2	TORRES & TRATAMIENTO QUÍMICO	2.690.000,00
5.3	TANQUES EXPANSIÓN	16.000,00
5.4	BOMBAS	6.370.000,00
5.5	MONTAJE GENERAL DE EQUIPOS MECÁNICOS	401.520,00
6.	ELECTRICIDAD (SUMINISTRO Y MONTAJE)	1.877.353,66

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

6.1	CABLEADO & BANDEJAS	694.022,52
6.2	EQUIPOS	1.183.331,14
7.	INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL (SUM. & MONTAJE)	1.724.700,00
7.1	SUMINISTRO	1.324.700,00
7.2	MONTAJE	400.000,00
TOTALES		37.568.930,09

Tabla 6-1 – Resumen Presupuesto

El presupuesto detallado se adjunta en el **Anexo VI – Presupuesto**

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

7 CONCLUSIONES

Este trabajo corresponde a un diseño básico de la instalación que realiza la refrigeración de unos equipos determinados.

Se debe remarcar que el objetivo de este trabajo ha sido el desarrollo de la parte correspondiente al diseño de los equipos. El resto de los trabajos necesarios para la realización de este trabajo, como la obra civil, trabajos de instalaciones eléctricas, instrumentación y control sólo se han descrito de manera general.

En la etapa posterior a este trabajo, que sería el diseño detallado, se calcularía con mayor exactitud toda la instalación con los datos proporcionados por los fabricantes de los equipos. Así como el resto de los trabajos requeridos.

A continuación se añaden algunos documentos complementarios para este trabajo, que son los siguientes:

- Anexo I – Normativa Aplicable

En este anexo se recoge un listado de normas tanto nacionales como internacionales que se deben aplicar en diseños de sistemas nuevos o modificaciones en cualquier central nuclear.

- Anexo II – Hojas de Cálculo

Se añaden las hojas Excel utilizadas para realizar algunos de los cálculos indicados en el apartado **4.6 CÁLCULOS**

- Anexo III – Planos

Estos son los planos que se adjuntan a este trabajo:

- Plano 01 – Implementación Sistema EJ
- Plano 02 – Distribución bombas principales

- Anexo IV – Hojas de Datos Equipos Principales

Se muestran unas hojas de datos típicas que se utilizan para definir los equipos de la instalación que se deben rellenar antes de la petición de oferta de estos equipos.

- Anexo V – Planificación

Se adjunta una planificación aproximada del proceso de la realización del nuevo Sistema EJ. Para ello se ha utilizado el programa MS Project. Este documento corresponde al apartado **5.**

PROGRAMACIÓN

- Anexo VI – Presupuesto

También se añade un presupuesto aproximado del coste de la nueva instalación. En la hoja de cálculo se puede ver con mayor detalle el desglose de las partidas. Este documento corresponde al apartado **6. PRESUPUESTO**

- Anexo VII – Manuales de mantenimiento

Se añaden los manuales de mantenimiento de los siguientes equipos:

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

- Intercambiadores de calor EG-E02-A/B
- Torres de Refrigeración EJ-E01/2/3/4-A/B

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

8 BIBLIOGRAFÍA

En este apartado se incluyen las fuentes utilizadas para realizar este trabajo.

Información general:

Base de datos de IDOM Consultoría, Ingeniería y Arquitectura, SAU.

Información general sobre las centrales nucleares:

<http://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/121361-cuales-son-los-distintos-componentes-de-una-central-nuclear>

<https://catedras.facet.unt.edu.ar/centraleselectricas/wp-content/uploads/sites/19/2014/10/Apuntes-de-CENTRALES-NUCLEARES-2.pdf>

<https://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2011/05/sistemas-de-refrigeracion-en-reactores-nucleares/>

<https://www.sne.es/images/stories/recursos/publicaciones/Varios/LibroCBCTN-ed2.pdf>

https://www.ufpe.br/den/images/documentos/curso_prof_baron/tema04.pdf

<http://www.ucsusa.org/clean-energy/energy-water-use/water-energy-electricity-nuclear#.WUFJH9w3Vpg>

<http://www.aeoi.org.ir/portal/file/?62709/different-type-of-reactors-.pdf>

<https://nuclear.duke-energy.com/2012/03/27/pressurized-water-reactors-pwr-and-boiling-water-reactors-bwr>

<http://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/121361-cuales-son-los-distintos-componentes-de-una-central-nuclear>

http://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/7_energa_nuclear.html

Información específica sobre la refrigeración de las centrales nucleares:

<https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/for-educators/04.pdf>

https://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-06-engineering-of-nuclear-systems-fall-2010/lectures-and-readings/MIT22_06F10_lec06a.pdf

http://www.ucsusa.org/sites/default/files/legacy/assets/documents/nuclear_power/pwr-intro.pdf

<http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/cooling-power-plants.aspx>

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Información sobre los sistemas de salvaguardias tecnológicos

<http://www.foronuclear.org/es/100957-faqas-sobre-energia/capitulo-12/115560-171-ique-son-y-para-que-sirven-las-salvaguardias-tecnologicas>

Pdf “Manual de tecnología nuclear para periodistas”

Información sobre las torres de refrigeración:

http://www.comercialkench.com/boletin_torres1.php

http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10540_Torres_refrigeracion_GT4_07_05eca613.pdf

https://www.msssi.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/agenBiologicos/pdfs/4_leg.pdf

<http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/Torre.htm>

<https://www.youtube.com/watch?v=hNcMy3XRXY>

<https://spanish.alibaba.com/product-detail/grad-frp-cross-flow-cooling-tower-287622489.html>

Efecto Pitting en las tuberías:

https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/pfcm12_4_3.html

Pérdida de carga en las tuberías:

Apuntes de la asignatura de Mecánica de Fluidos

https://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaci%C3%B3n_de_Darcy-Weisbach

http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%202.Conducciones%20forzadas/tutorial_03.htm

Balances térmicos en los intercambiadores

Apuntes de la asignatura de Termodinámica.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

9 ANEXOS

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Anexo I

NORMATIVA APLICABLE

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Anexo II

HOJAS DE CÁLCULO

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Anexo III

PLANOS

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Anexo IV

HOJAS DE DATOS EQUIPOS PRINCIPALES

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Anexo V

PLANIFICACIÓN

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Anexo VI

PRESUPUESTO

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.

Anexo VII

MANUALES DE MANTENIMIENTO

Mejora del Sistema de Refrigeración de una Central Nuclear.