

Sistema de refrigeración del sistema de radiofrecuencia de IFMIF-EVEDA

G. D. Pérez Pichel

El proyecto IFMIF-EVEDA consiste en un acelerador prototipo que se instalará en Rokkasho (Japón). A través del Ciemat, responsable del desarrollo de un conjunto importante de sistemas y componentes, recae sobre Empresarios Agrupados la responsabilidad del diseño detallado del sistema de refrigeración del Sistema de Radiofrecuencia de Potencia (Sistema RF) que alimenta al acelerador.

El sistema de refrigeración de RF constituye el circuito cerrado primario que suministra agua des-ionizada satisfaciendo ciertos requisitos de caudal, presión, temperatura y calidad, para la refrigeración de todos los equipos del sistema de radiofrecuencia que requieran agua para la disipación del calor generado durante su operación.

COOLING SYSTEM FOR THE IFMIF-EVEDA RADIOFREQUENCY SYSTEM

The IFMIF-EVEDA project consists on an accelerator prototype that will be installed at Rokkasho (Japan). Through CIEMAT, that is responsible of the development of many systems and components, Empresarios Agrupados get the responsibility of the detailed design of the cooling system for the radiofrequency system (RF system) that must feed the accelerator.

The RF water cooling system is the water primary circuit that provides the required water flow (with a certain temperature, pressure and water quality) and also dissipates the necessary thermal power of all the radiofrequency system equipment.



GERMÁN DAVID PÉREZ PICHEL

es doctor ingeniero industrial del ICAI; ingeniero mecánico de Empresarios Agrupados. Tiene experiencia en análisis de sistemas y componentes para fusión y fisión nuclear.

1. INTRODUCCIÓN, ALCANCE Y OBJETIVOS

El proyecto IFMIF-EVEDA consiste en un acelerador prototipo que se instalará en Rokkasho (Japón). A través del Ciemat, responsable del desarrollo de un conjunto importante de sistemas y componentes, recae sobre Empresarios Agrupados la responsabilidad del diseño detallado del sistema de refrigeración del Sistema de Radiofrecuencia de Potencia (Sistema RF) que alimenta al acelerador.

El sistema de refrigeración de RF constituye el circuito cerrado primario que suministra agua bajo unas precisas y controladas condiciones de temperatura, caudal, presión y conductividad, con el fin de disipar convenientemente la potencia térmica generada por todos los equipos del sistema de radiofrecuencia: nueve módulos de radiofrecuencia, 13 fuentes de alimentación de alta tensión HVPS para dichos módulos y un grupo de fuentes de alimentación de baja tensión LVPS. Se habla por lo tanto de: equipos a re-

frigerar (equipos del Sistema de Radiofrecuencia que deben ser refrigerados por el sistema a diseñar); y equipos del sistema (equipos del sistema de refrigeración necesarios para satisfacer los requisitos de refrigeración de los equipos a refrigerar).

Este sistema de refrigeración consiste en un circuito cerrado con agua des-ionizada bajo unos requisitos de pureza que deben ser mantenidos con el paso del tiempo a lo largo de la operación de la instalación, lo que exigirá una planta de purificación y tratamiento. Además, se distinguen dos límites del sistema que imponen el resto de requisitos: por una parte se encuentra el intercambiador de calor que separará el circuito primario cerrado objeto de estudio en este diseño, del circuito abierto secundario responsable de transmitir todo el calor evacuado al ambiente a través de una torre de refrigeración (sistema responsabilidad de JAEA, en Japón); y por otra parte, las conexiones hidráulicas de entrada y salida de cada componente a refrigerar.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

2.1. Requisitos de los equipos a refrigerar

El sistema de radiofrecuencia consiste principalmente en [1]:

- Nueve módulos RF [2]: cada módulo contiene dos cadenas idénticas destinadas a transmitir la potencia RF necesaria para la aceleración de las partículas en la instalación. Cada cadena tiene diferentes componentes internos con necesidades de refrigeración, estando distribuidas en: ocho cadenas de 200 kW y diez de 105 kW (potencia RF transmitida). El principal requisito de este sistema viene impuesto por el conjunto de tetrodos responsable de las dos últimas etapas de amplificación de potencia. Este componente exige unas cuidadas condiciones de conductividad y presión de entrada del agua de refrigeración. Teniendo en cuenta esto y la generación de calor en el

conjunto de los módulos, se tienen los siguientes requisitos:

- El agua debe mantenerse des-ionizada con una resistividad aproximadamente de 500 kOhm.cm, debiendo ser siempre su valor superior a 100 kOhm.cm.
- Presión máxima de suministro: 5 barg*.
- Pérdida de carga prevista en cada módulo: 4 bar.
- Mínimo caudal de las 18 cadenas: 4396 l/min.
- Potencia térmica a disipar de las 18 cadenas: 2358 kW.
- 13 fuentes de alimentación HVPS (*High Voltage Power Supply*) de 400kW para los módulos RF, a refrigerar en paralelo. Los requisitos impuestos son:
 - Potencia térmica total a disipar en el total de las 13 fuentes: 200 kW.
 - Mínimo caudal del total de las 13 fuentes: 1170 l/min.
- Un grupo de fuentes de alimentación de baja tensión LVPS (*Low Voltage Power Supply*) que no pertenecen al sistema RF, pero que deben ser refrigeradas compartiendo su sistema de refrigeración dada la situación de las fuentes en la nave del acelerador. Los requisitos impuestos son:
 - Potencia térmica total a disipar: 30 kW.
 - Mínimo caudal: 100 l/min.

Teniendo en cuenta toda esta información, y considerando que la temperatura óptima del agua a la llegada de los equipos está entre 25°C y 30°C, se aplica un cierto factor de seguridad (5% para la potencia térmica y 7% para el caudal) para finalmente llegar a la conclusión de que el sistema de refrigeración a diseñar deberá suministrar agua en paralelo a cada uno de los equipos citados en las siguientes condiciones:

- Potencia térmica total a disipar: 2717 kW.
- Caudal total a suministrar: 364 m³/h.

2.2. Descripción general

Los principales equipos del sistema de refrigeración estarán contenidos en un pequeño edificio dedicado en dos terceras partes exclusivamente a este sistema (recuadro "b" en la Figura 1). A través de una zanja, el colector principal llega al edificio del acelerador, donde se encuentran los equipos a refrigerar (Figura 1).

El sistema está constituido por los siguientes equipos:

*Se denotan las presiones manométricas como barg, siendo las absolutas bara.

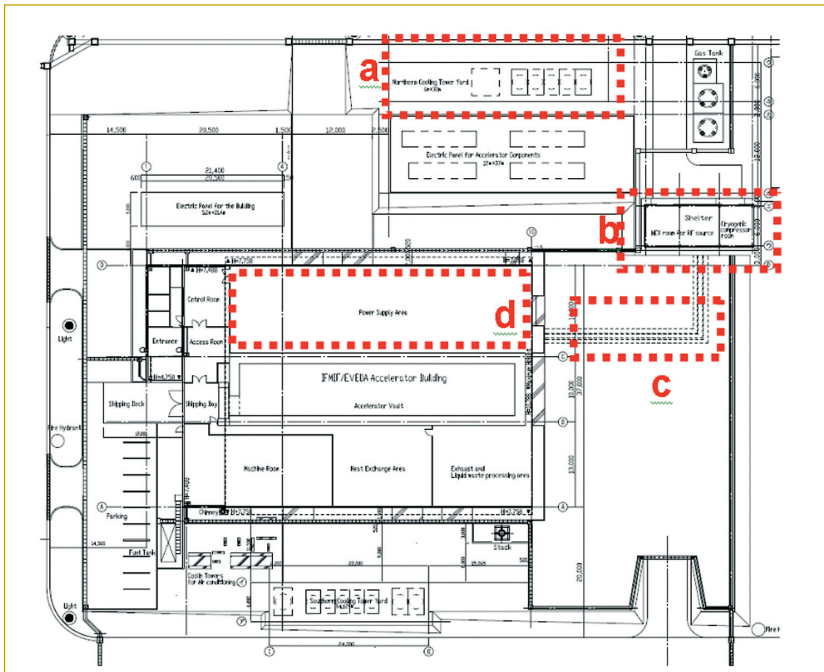


Figura 1. Planta edificios.

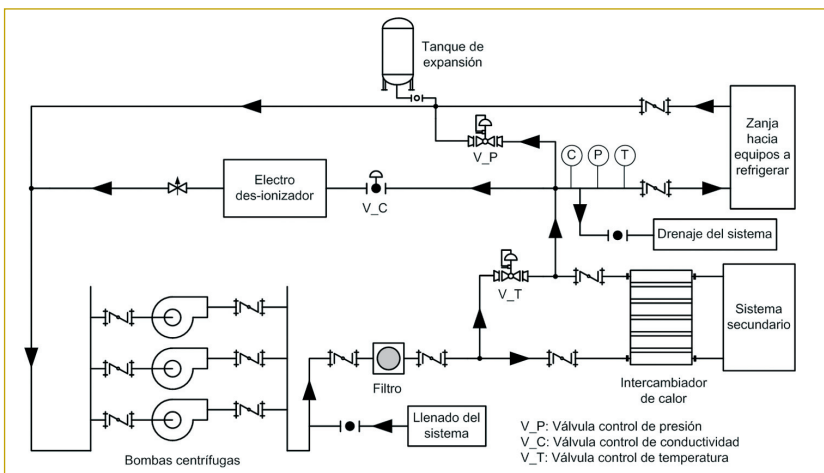


Figura 2. Esquema en shelter.

- Tres bombas centrífugas: dispuestas con una redundancia del 50% en el caso de máximo caudal demandado, lo que implica que de las tres, como mucho habrá dos en marcha simultáneamente.
- Un tanque de expansión: encargado de fijar una presión de admisión adecuada a las bombas. Estará dimensionado para además ser capaz de admitir el volumen de agua dilatado debido al calentamiento de la misma a lo largo del sistema.
- Un filtro: situado a la impulsión de las bombas para evitar un exceso de caída de presión en la admisión. Aunque los requisitos de calidad de agua exigidos implican que no habrá partículas que deban ser filtradas, conviene situar este filtro fundamentalmente para periodos

de puesta en marcha, operaciones de mantenimiento, contaminación accidental del caudal de agua, etc.

- Un electrodo des-ionizador: este componente será el encargado de mantener bajo control los requisitos de pureza del agua, vigilando siempre los niveles de conductividad. Su tecnología permitirá un mantenimiento mínimo.
- Un intercambiador de calor: será el responsable de la transmisión de calor del sistema primario al sistema secundario.
- Válvulas de control: serán tres en función del parámetro a controlar en el colector principal: presión, temperatura y finalmente conductividad.
- Un PLC: el sistema de refrigeración contará con su propio PLC para el

control del funcionamiento del conjunto del sistema ya sea durante operación normal o durante mantenimiento.

El agua es impulsada por una o dos bombas (en función de la demanda) en operación a velocidad constante, dirigiéndose esta hacia el intercambiador de calor previo paso por el filtro. Del intercambiador saldrá el agua a una temperatura entre 25°C y 30°C hacia los equipos a refrigerar, controlándose esta temperatura mediante una válvula de by-pass al intercambiador (Figura 2).

Además de la temperatura del agua enviada a los componentes, es fundamental controlar la presión, pues ésta no debe ser muy inferior a 5 barg a la entrada de los tetrodos (dada la importante pérdida de carga de este componente), ni demasiado alta, para lo que se incluye una válvula limitadora de presión a la entrada de cada módulo RF. Esta válvula limitadora deberá recibir agua a suficiente presión para operar adecuadamente, aunque evitando un valor excesivo para así a su vez evitar un sobredimensionamiento excesivo de las bombas. Para lograr el control de dicha presión se sitúa una válvula controlada de by-pass a todos los componentes a refrigerar, de modo que abrirá más o menos buscando la presión adecuada en el colector principal a la salida del edificio. Así, se demuestra en el Apartado 3 que para garantizar presión suficiente, la válvula controla para mantener en el colector principal una presión de 6,5 barg.

En cuanto al caudal mínimo a suministrar, una vez calculada la pérdida de carga estimada según el caudal demandado, no se requiere un control determinado del caudal, pues este será aportado mediante una correcta elección de la bomba, y un correcto calibrado de válvulas en cada equipo a refrigerar.

También resulta de interés observar que todos los equipos a refrigerar estarán conectados hidráulicamente en paralelo mediante un colector de suficiente diámetro (10") como para que la caída en el mismo sea pequeña. En cualquier caso, si todos los consumos de agua estuvieran cerrados, típicamente por motivos de mantenimiento, el circuito hidráulico quedaría cerrado y no circularía agua por el colector principal. Ante la posible conveniencia de forzar la circulación de agua para por ejemplo limpiar el colector, se instalará también una última válvula de by-pass al final del colector, que podrá abrirse en caso de que fuera necesario.

Dada la gran pérdida de carga en

los componentes y dada la baja presión a la que deben ser alimentados, queda muy poco margen de presión en el colector de retorno, la cual por otra parte no debe ser demasiado pequeña para evitar problemas de cavitación en las bombas. Precisamente en el colector de retorno se sitúa el tanque de expansión que recogerá el volumen de agua sobrante por expansión térmica, pero que además realizará la delicada labor de mantenimiento de la presión adecuada en el retorno del sistema, habiéndose estimado que como mucho deba haber 1,9 bara.

De los tres parámetros fundamentales a controlar: presión, temperatura y conductividad del agua hacia los equipos a refrigerar, queda aclarado con lo dicho el procedimiento de control de las dos primeras variables. En cuanto a la conductividad, es necesario integrar en el sistema un equipo de des-ionización que se ponga en marcha cuando haya detectado unos valores de conductividad fuera del margen establecido como prudente (resistividad siempre por encima de 100kOhm.cm.).

Existen dos posibles tecnologías a utilizar como equipo de des-ionización: resinas de intercambio iónico, o un sistema de electro des-ionización. La primera opción citada es la más común en los sistemas actuales de purificación de agua, aunque ha sido descartada dado que resulta necesario un frecuente mantenimiento para la sustitución de resinas. En cuanto al electro des-ionizador, se trata de un equipo más caro desde el punto de vista de la inversión inicial, y requiere una alimentación eléctrica considerable. Sin embargo, su robustez y su prácticamente nulo mantenimiento hacen de esta opción la más idónea para el sistema de refrigeración. Así, se decide acoplar el electro des-ionizador en paralelo a la válvula de control de presión, siendo controlado mediante una válvula de todo o nada que se abrirá cuando el medidor de conductividad detecte un valor excesivo (Figura 2).

Por último, cabe destacar la ausencia de equipos para el procedimiento de llenado del sistema. Así, está previsto que se realice el aporte externamente por JAEA a través de una entrada justo antes del filtro. Una línea de descarga se incluiría también en el punto más bajo del sistema (colector en la zona de la zanja).

2.3. Modos de operación

IFMIF-EVEDA es un proyecto experimental pensado para una vida ope-

rativa de solo tres años con el fin de comprobar y aprender todo lo relativo al acelerador prototipo que se usará en la futura instalación IFMIF para ensayos de materiales útiles en el campo de la fusión nuclear.

Esta circunstancia condiciona el diseño de multitud de sistemas, incluido el sistema de refrigeración ya que la demanda de refrigeración de los equipos será variable, creciendo progresivamente a medida que se van instalando y ensayando los equipos necesarios hasta completar toda la instalación del acelerador. En definitiva, el sistema de refrigeración deberá tener capacidad para refrigerar un mínimo de componentes (en cuyo caso se necesitaría solo una de las tres bombas) así como el conjunto final total (en cuyo caso se necesitarían dos de las tres bombas, quedando una de repuesto), pudiéndose distinguir básicamente dos modos de operación:

- Operación con baja demanda de refrigeración: se considera este modo de operación cuando solo se necesita poner una bomba en marcha ya que el número de equipos a refrigerar demanda un caudal suficientemente pequeño como para que una sola bomba pueda satisfacerlo.
- Operación con alta demanda de refrigeración: este será el modo final deseado para operación en el que toda la instalación estará en marcha, aunque también incluiría aquellos casos en los que ya hay suficientes equipos instalados como para que las dos bombas tengan que ponerse en marcha.

Como es lógico, el conjunto del sistema deberá estar dimensionado para la correcta operación en caso de demanda máxima de refrigeración, en cuya situación el diseño del sistema debería ser tal que la válvula de control de presión estuviera solo abierta lo justo como para que pasara un caudal mínimo para permitir un cierto control, es decir, mandando a los equipos a refrigerar casi todo el caudal impulsado por las bombas. Esto mismo ocurrirá cuando con una sola bomba, existan suficientes equipos instalados.

Por el contrario, cuando se opere bajo la mínima demanda de refrigeración o con dos bombas pero con un número insuficiente de equipos instalados, la válvula de control de presión deberá estar suficientemente abierta para mantener la presión del colector, desviando mucha agua y operando por lo tanto de manera ineficiente. Esto se podría haber evitado mediante una bomba de velocidad

variable, aunque su alto coste y sus exigencias de mantenimiento descartan esta posibilidad dada la corta vida esperada de la instalación.

3. ANÁLISIS Y CÁLCULOS

3.1. Predimensionamiento

Una correcta selección de los equipos del sistema hace necesario estimar previamente las condiciones de

operación del mismo. Para ello, conocidos los requisitos de los equipos a refrigerar, y con una estimación del trazado de tuberías del sistema, se evalúan las pérdidas de carga totales así como el caudal total que las bombas deben impulsar. Esto permite calcular la bomba necesaria y su correspondiente curva característica (figura 3). Así, para cada bomba:

$$P(kW) = r \cdot g \cdot \text{Flow} \cdot TDH / \eta_{TOTAL} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 200 / 3600 \cdot 80 / 0,7 = 62300W = 62,3KW$$

Sin embargo, dicho estudio preliminar no es suficiente, pues debe garantizarse que el agua llegará con el adecuado caudal, una mínima presión y una aceptable temperatura a cada uno de los componentes a refrigerar. Son

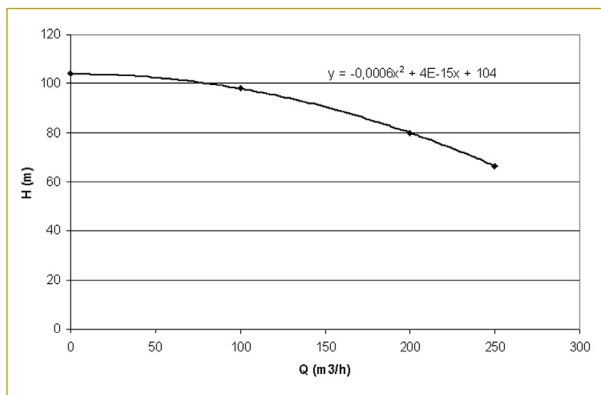


Figura 3. Curva de la bomba.

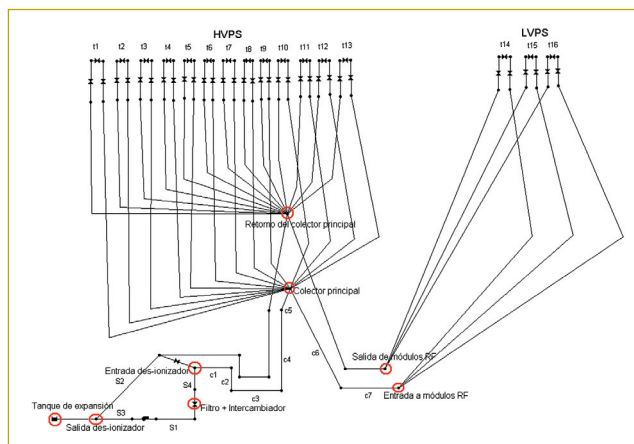


Figura 4. Model equilibrado.

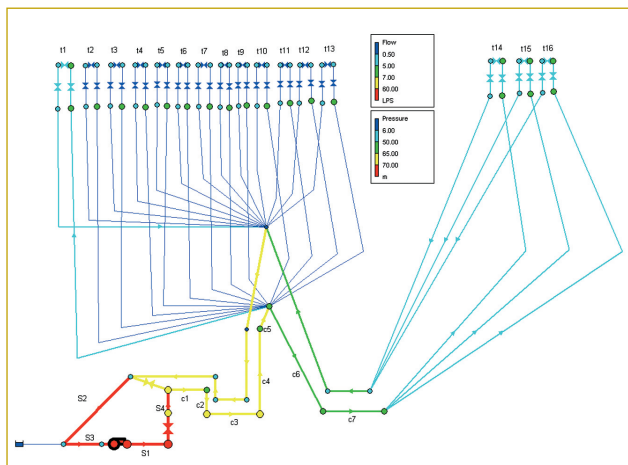


Figura 5. Resultado. Caso 1.

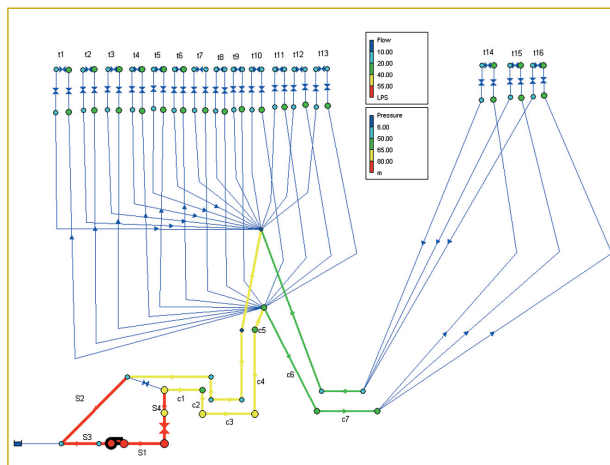


Figura 6. Resultado. Caso 2.

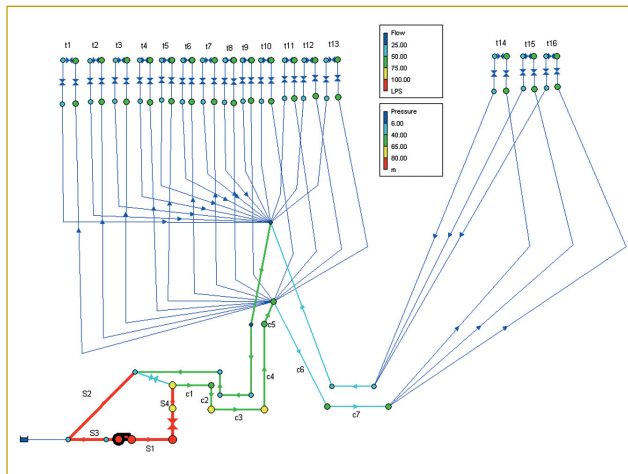


Figura 7. Resultado. Caso 3.

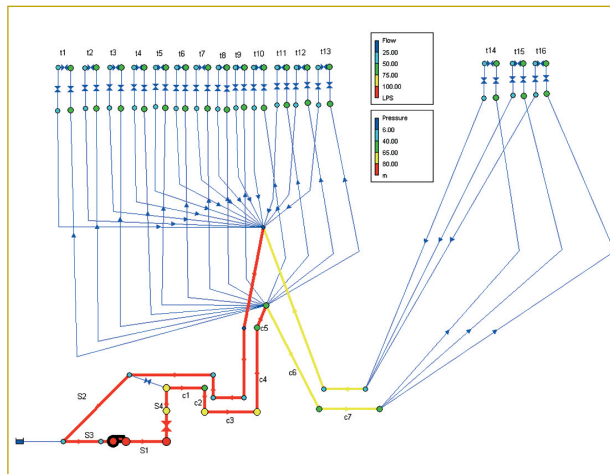


Figura 8. Resultado. Caso 4.

necesarios por lo tanto un análisis de equilibrado hidráulico que demuestre que la instalación alcanzará los caudales y presiones requeridos, así como un análisis térmico que permita obtener la temperatura del agua en cada región del sistema.

3.2. Equilibrado hidráulico

El sistema es modelado mediante el programa EPANET v.2.0. [3] (Figura 4), especialmente indicado para la simulación y equilibrado de complejas redes hidráulicas, lo que permite incluir el modelado de la válvula de control de presión y válvulas de control de caudal. Además, se incluye la curva característica de cada bomba escogida y se calculan las pérdidas de carga en cada tramo de tubería, dando como resultado el caudal, presión y velocidad del fluido en cada punto.

Dados los distintos modos de operación que existirán en el sistema (alto o bajo caudal demandado), cuatro son los casos de estudio elegidos, obteniéndose los resultados mostrados en las figuras 5 a 8 (caudal en litros/segundo y presión en m.c.a):

- Caso 1: caudal mínimo con una bomba en marcha: 3 LVPS + 1 HVPS + 1 RF (cadenas: 1x105kW).
- Caso 2: caudal máximo con una bomba en marcha: 3 LVPS + 6 HVPS + 5 RF (cadenas: 10x105kW).
- Caso 3: caudal mínimo con dos bombas en marcha: 3 LVPS + 8 HVPS + 5 RF (cadenas: 10x105kW) + 1 RF module (cadenas: 2x200kW).
- Caso 4: caudal máximo con dos bombas en marcha: 3 LVPS + 13 HVPS + 5 RF (cadenas: 10x105kW) + 4 RF modules (cadenas: 8x200kW).

3.3. Análisis térmico

Dado el requisito de temperatura impuesto por los equipos a refrigerar, y

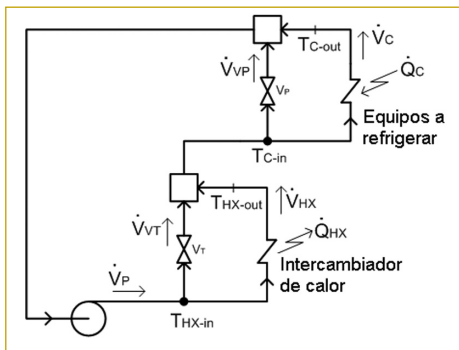


Figura 9. Esquema térmico.

teniendo en cuenta la potencia térmica que los mismos depositarían en el agua según las estimaciones indicadas en el Apartado 2.1, se plantea el modelo térmico del sistema expuesto en la Figura 9. A partir de los cua-

tro casos analizados en el análisis del equilibrado antes mostrado, y atendiendo a las condiciones ambientales que el lado secundario del intercambiador de calor podrá encontrarse, se muestran en las tablas

AMBIENTE	DÍA FRÍO			
Caso de estudio	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
T-HX-out (°C)	10	10	10	10
T-C-in (°C)	25	25	25	25
V-P (l/s)	69,8	69,8	129,48	129,48
V-C (l/s)	7,01	47,9	61,8	101,9
Q-C (kW)	167	1340	1742	3000
T-HX-in (°C)	25,57	29,59	28,21	30,54
T-C-out (°C)	30,7	31,7	31,74	32,043
V-VT (l/s)	67,23	53,43	106,605	94,54
V-HX (l/s)	2,565	16,36	22,87	34,936
V-VP (l/s)	62,79	21,9	67,68	27,58

Tabla 1. Resultado térmico en ambiente frío.

AMBIENTE	DÍA MEDIO			
Caso de estudio	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
T-HX-out (°C)	25	25	25	25
T-C-in (°C)	25	25	25	25
V-P (l/s)	64,49	64,49	111,58	111,58
V-C (l/s)	7,01	47,9	61,8	101,9
Q-C (kW)	167	1340	1742	3000
T-HX-in (°C)	25,62	29,97	28,73	31,43
T-C-out (°C)	30,7	31,69	31,74	32,043
V-VT (l/s)	0	0	0	0
V-HX (l/s)	64,49	64,49	111,58	111,58
V-VP (l/s)	57,49	16,6	49,78	9,68

Tabla 2. Resultado térmico en ambiente medio.

AMBIENTE	DÍA CÁLIDO			
Caso de estudio	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
T-HX-out (°C)	31	31	31	31
T-C-in (°C)	31	31	31	31
V-P (l/s)	64,49	64,49	111,58	111,58
V-C (l/s)	7,01	47,9	61,8	101,9
Q-C (kW)	167	1340	1742	3000
T-HX-in (°C)	31,62	35,97	34,73	37,43
T-C-out (°C)	36,7	37,7	37,74	38,04
V-VT (l/s)	0	0	0	0
V-HX (l/s)	64,49	64,49	111,58	111,58
V-VP (l/s)	57,48	16,59	49,78	9,68

Tabla 3. Resultado térmico en ambiente cálido.

	LADO CALIENTE	LADO FRÍO
Temperatura de entrada	37,3 °C	27 °C
Temperatura de salida	31 °C	33 °C
Caudal	112 kg/s	119 kg/s
Calor intercambiado	3000 kW	

Tabla 4. Condiciones de diseño del intercambiador de placas.

1 a 3 los parámetros fundamentales que caracterizan el funcionamiento del sistema.

4. SELECCIÓN DE EQUIPOS DEL SISTEMA

A partir de los análisis anteriores, y buscando el comportamiento del sistema descrito, se llega a la siguiente selección de equipos:

- Bombas centrífugas horizontales: tres bombas (50%) con una potencia nominal estimada cada una de 65 kW, y un punto de diseño de: 200m³/h y 80mca de TDH. El caudal nominal seleccionado está elegido teniendo en cuenta el margen necesario en la válvula de control de presión (siempre circulará algo de agua en ese by-pass) y el caudal que se desviaría hacia el electro des-ionizador cuando sea necesario.
- Intercambiador de calor de placas (condiciones de diseño en Tabla 4): dimensionado para transmitir hasta 3000kW manteniendo las condiciones térmicas requeridas. Cabe mencionar por una parte que en caso de baja temperatura ambiental, el agua podría salir demasiado fría hacia los componentes a refrigerar, en cuyo caso se abriría la válvula de control de temperatura hasta ajustar a 25°C la salida. Por otra parte, en caso de que haya muy pocos equipos a refrigerar, el intercambiador podría llegar a estar sobredimensionado hasta en un 3000%, sin tener ello ningún inconveniente.
- Filtro: se ha elegido un filtro simple de tipo cesta situado a la descarga de las bombas. Se estima una pérdida de carga del agua a su paso por el filtro de 0,8 bar en condiciones normales.
- Electro des-ionizador: la alimentación del electro des-ionizador deberá realizarse a una presión superior a los 2 ó 3 barg, lo que indica que dada su situación en el sistema esto no supondrá un problema. Se ha estimado además que 5 m³/h son suficientes para mantener un

buen control de la conductividad del agua.

- Tanque de expansión [4]: se trata de un tanque con membrana presurizada mediante nitrógeno, cilíndrico y dispuesto horizontalmente. Su presión de diseño es de 0,8 barg, con 50°C de temperatura de diseño y 2000 litros de capacidad.
- Válvula de control de presión: válvula de operación automática responsable de mantener los 6.5 barg del colector principal para garantizar la presión mínima en los componentes a refrigerar. En caso de fallo, se cerraría para seguir suministrando caudal suficiente a los equipos.
- Válvula de control de temperatura: válvula de operación automática responsable de mantener al menos 25°C de temperatura en el colector. También cerraría en caso de fallo.
- Colector: de acero inoxidable, con un diámetro de 10".

5. CONCLUSIONES

El trabajo aquí presentado resume los puntos más importantes abordados para el desarrollo del diseño del sistema de refrigeración de los equipos que constituyen el sistema de radiofrecuencia del acelerador del proyecto IFMIF-EVEDA. Las particularidades de dichos componentes han impuesto una serie de exigentes restricciones sobre el sistema de refrigeración que han terminado por moldear la solución final.

El diseño se ha enfrentado a condicionantes tales como: carácter experimental del proyecto con solo tres años de vida prevista, la instalación irá creciendo con el paso del tiempo teniendo que estar el sistema de refrigeración disponible desde el inicio, y finalmente los tetrodos de las fuentes RF tienen grandes pérdidas de carga e imponen precisas condiciones de presión, caudal, temperatura y conductividad de agua.

El sistema propuesto, a la vista de los mencionados condicionantes, cumple con todos los requisitos.

Para ello, ha sido necesario un detallado análisis de equilibrado hidráulico y un cuidadoso estudio térmico considerando diferentes condiciones esperadas en el lado del secundario (circuito abierto al que se vuelca el calor del primario diseñado), atendiendo también a los modos de operación en función de las bombas en marcha.

Finalmente, se han definido los equipos del sistema de refrigeración suficientemente bien como para iniciar una próxima fase de ingeniería de detalle previa a la fase final de construcción.

6. AGRADECIMIENTOS

El autor del artículo agradece la intensa colaboración del Ciemat a través de Purificación Méndez y Moisés Weber, así como de los distintos compañeros de Empresarios Agrupados que participaron en el proyecto: Alfonso Junquera Delgado, David Martínez Pardo, Carlos Nieto Sainz, Diana Iglesia Guinea y Marcial Pinar Ramos.

7. REFERENCIAS

- [1] Méndez, P., "Prescripciones técnicas del sistema de refrigeración por agua para el sistema de radiofrecuencia del acelerador IFMIF EVEDA", Laboratorio Nacional de Fusión, CIEMAT, Mayo 2011.
- [2] "IFMIF EVEDA RF active components characteristics for power supply design", Thales Electron Devices. January 22nd, 2009.
- [3] Rossman, L. A., "EPANET 2 Users manual", Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, September 2000.
- [4] "Diseño y cálculo de sistemas de expansión", Spanish procedure and instruction UNE100155, AENOR, 2004. ■