



CÁLCULOS AVANZADOS DE TERMOHIDRÁULICA EN UN CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN DE AGUA A PRESIÓN PARA UN REACTOR DE FUSIÓN

La metodología general de cálculos avanzados de termohidráulica definida en este artículo ha sido desarrollada para, a partir de un diseño preliminar de un circuito de refrigeración de agua en un reactor de fusión poder asegurar la justificación y optimización del diseño de los distintos subsistemas con el objetivo final de alcanzar el diseño final del sistema.

INTRODUCCIÓN

Dentro del desarrollo de las energías alternativas, durante los últimos años ha cobrado especial importancia la producción de electricidad por medio de la fusión nuclear. De entre la gran cantidad de reactores experimentales proyectados, el reactor de confinamiento magnético tipo Tokamak es un firme candidato para convertirse en el primer reactor de fusión nuclear.

El Tokamak Cooling Water System (TCWS) es el circuito primario de refrigeración de este tipo de reactores cuyo objetivo es eliminar la energía generada por el plasma y transferirla al sistema secundario de enfriamiento (Figura 1).

Los principales cálculos termohidráulicos desarrollados para los distintos subsistemas del TCWS se describen a continuación:

ANÁLISIS TERMOHIDRÁULICOS DE ESTADO ESTACIONARIO

Este análisis incluye el cálculo de las caídas de presión y distribución de caudales para definir adecuadamente las condiciones de diseño y el dimensionamiento de las líneas de proceso, válvulas y equipos de bombeo requeridos para el sistema TCWS.

Para este análisis se desarrolla un modelo de cada subsistema del TCWS, para el que puede utilizarse un código de cálculo hidráulico y térmico, por ejemplo, AFT-Fathom o AFT-Arrow para el caso de fluidos compresibles.

ANÁLISIS TERMOHIDRÁULICOS DE TRANSITORIOS

La metodología utilizada se basa en los métodos y prácticas establecidos en el Informe de Seguridad del OIEA sobre análisis de accidentes para centrales nucleares (Análisis de acci-

PALOMA ANTONIO REYES

Responsable de Operaciones y directora de proyectos del Área de Proyectos Avanzados e I+D.

EMPRESARIOS AGRUPADOS AIE.

Ingeniera industrial por la Universidad Carlos III de Madrid.

ROQUE LUIS PEREZAGUA LÓPEZ

Director de Calidad de Proyectos.

EMPRESARIOS AGRUPADOS AIE.

Ingeniero de montes por la Universidad Politécnica de Madrid.

RAMÓN PÉREZ VARA

Jefe de sección Cálculos Termohidráulicos y Simulación.

EMPRESARIOS AGRUPADOS AIE.

Ingeniero aeronáutico por la Universidad Politécnica de Madrid.

ANDREA CIAMPICHETTI

Responsable del sistema de agua de enfriamiento (CWS).

ITER ORGANIZATION.

Ingeniero nuclear por el Politecnico di Torino (Italia).

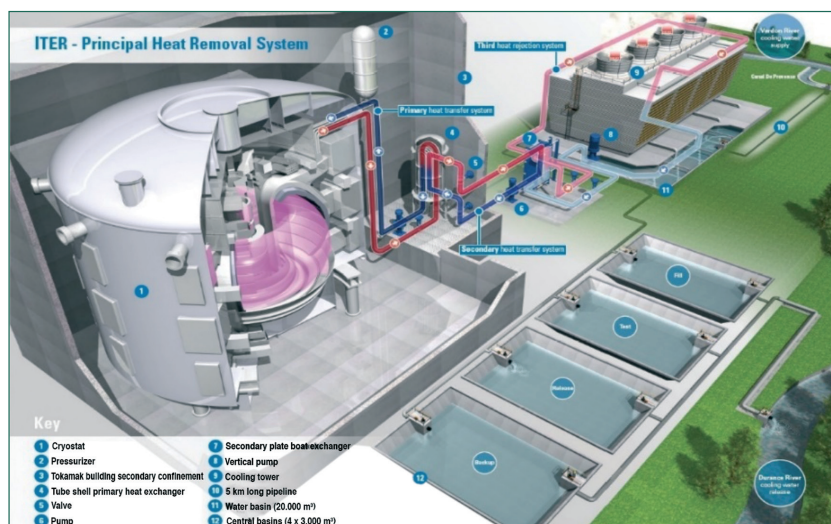


Figura 1. ITER- Sistemas principales de refrigeración.

ADVANCED THERMO-HYDRAULIC CALCULATIONS FOR A PRESSURISED WATER COOLING CIRCUIT FOR A FUSION REACTOR

The general methodology of advanced thermo-hydraulic calculations defined in this article has been developed, based on preliminary design of a water cooling circuit in a fusion reactor, to continue with the design process to ensure the justification and optimization of the design of the different subsystems with the ultimate purpose of achieving the final design of the system.



dentes para CCNN, Serie de Informes de Seguridad Núm. 23, OIEA, 2002).

La base de los datos de partida utilizados para la preparación del modelo de análisis transitorios es la misma para los análisis estacionarios y análisis de golpe de ariete. Esto asegura que la configuración topográfica y los datos de los equipos utilizados en los tres procesos de cálculo sean los mismos para los tres.

En principio, el código utilizado para construir los modelos y ejecutar los transitorios es RELAP5/Mod. 3.3. No obstante, se analiza la conveniencia de usar también otros códigos, por ejemplo, EcosimPro, para simular mejor ciertos fenómenos.

Desarrollos específicos para el análisis de transitorios en el procedimiento de drenaje y secado

Aunque en principio RELAP5 parece ser un código termohidráulico apropiado para analizar sistemas similares al sistema de drenaje y secado de ITER, debido a la naturaleza de estos procesos, se revisan los resultados de los experimentos y la literatura existentes para identificar si el desarrollo de modelos adicionales utilizando otros códigos es conveniente.

Tras esta evaluación, se desarrolla una librería específica para EcosimPro con los componentes de modelado que se requieren para simular los equipos en este tipo de sistemas: compresores, cambiadores de calor gas/agua y gas/gas, cambiadores de calor con condensación, separadores de ciclón, separadores de niebla, así como los componentes o

sistemas a secar y un modelo térmico del reactor.

La librería de componentes desarrollada permite construir un modelo del sistema de secado del ITER y simular la secuencia completa de operaciones de soplado, secado, calentamiento y enfriamiento en uno o varios de los lazos de refrigeración.

El proceso de secado es totalmente transitorio, los flujos de gas, las presiones y las temperaturas cambian continuamente durante el proceso. El análisis de la operación de estado estacionario del DYS (Drying system) es por tanto de ayuda limitada, sirviendo para respaldar el diseño del sistema y el dimensionamiento de los componentes. En consecuencia, el desarrollo de un modelo transitorio del sistema es necesario para verificar el diseño del DYS y permitir la optimización del proceso de drenaje y secado (Figura 2).

CÁLCULOS DE DIMENSIONADO DE COMPONENTES

La metodología de trabajo a seguir para el dimensionamiento de estos componentes se basa en los resultados que se obtengan de los análisis termohidráulicos del estado estacionario y transitorios asociados para cada uno de los subsistemas.

El dimensionamiento de los componentes de cada subsistema se realiza con programas de análisis de flujo en tuberías, y el análisis transitorio, cuando sea necesario, con RELAP. Los cálculos simples, fáciles de replicar y automatizar, como la potencia térmica, TDH, capacidades del tanque, etc., se realizan manualmente.

Dimensionamiento de componentes principales

Los componentes principales que pueden considerarse para el desarrollo específico en este cálculo son los siguientes: bombas, intercambiadores de calor, calentadores y compresores.

• Bombas

Los valores de diseño (TDH, velocidad, etc.) se pueden obtener modelando el subsistema con programas específicos de cálculo estacionario y, en algunos casos, mediante cálculos manuales simples. Es una práctica común agregar a estos valores un margen basado en la experiencia y las buenas prácticas de ingeniería.

• Intercambiadores de calor

Desde un punto de vista termohidráulico, el intercambiador óptimo es el que cumple con los requisitos de transferencia de calor con el menor volumen posible que cumpla con los requisitos en pérdida de carga y área de transferencia.

Teniendo en cuenta los datos de proceso obtenidos de los modelos de los análisis anteriores y realizando cálculos utilizando una herramienta adecuada específica, como puede ser *HTRI Xchanger Suite 7.0*, se dimensionan los intercambiadores de calor requeridos al proporcionar los datos solicitados, como los coeficientes de transferencia de calor, la configuración, las dimensiones generales, el peso, etc.

• Calentadores y compresores

Su dimensionamiento se realiza teniendo en cuenta los datos de proceso obtenidos con el modelado del sistema y realizando cálculos manuales simples. El diseñador dimensiona los calentadores eléctricos/compresores requeridos al proporcionar los parámetros requeridos para el equipo. A los valores de diseño se les añade su correspondiente margen de diseño.

• Separador ciclónico y Demister

Estos componentes están incluidos dentro del subsistema de secado. Son dispositivos de estado estacionario que se utilizan para eliminar cualquier gota potencial de agua contenida en el nitrógeno utilizado para secar los componentes en el recipiente. Es común colocar uno y luego el otro para separar las gotas grandes en una y las gotas pequeñas en la otra, y así mejorar la eficiencia de la separación. La selección del tipo y la configuración de ambos componentes depende bá-

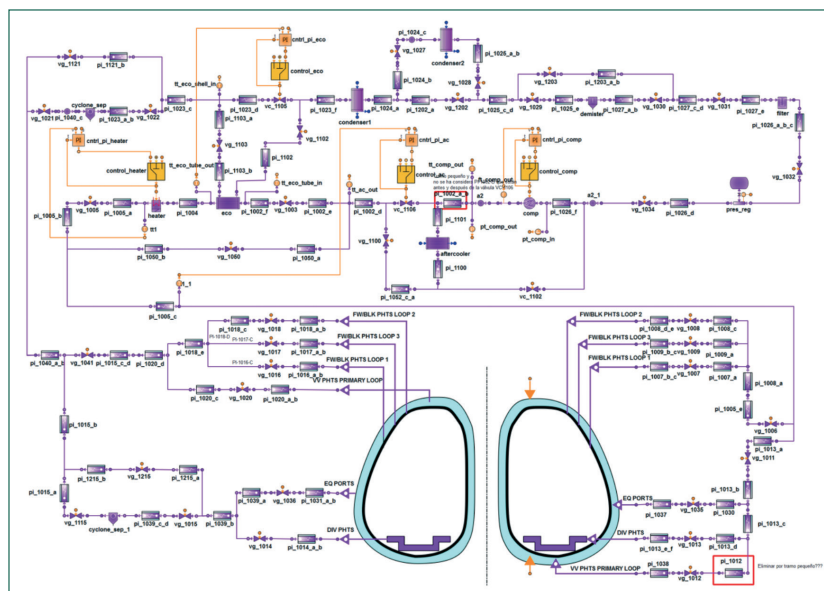


Figura 2. Modelo EcosimPro del sistema de secado ITER (DYS).

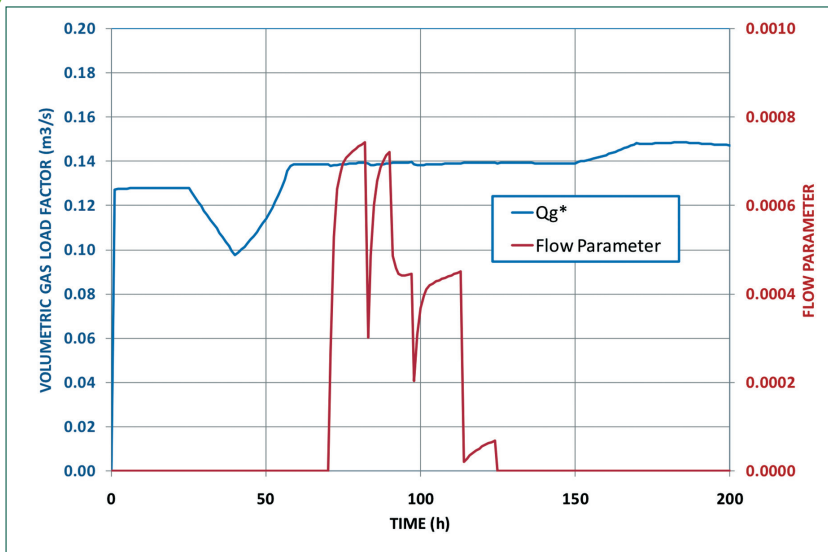


Figura 3. Ejemplo- parámetros de flujo de un Demister.

sicamente de tres parámetros principales: la eficiencia de la separación, la caída de presión en el componente y su capacidad (Figura 3).

ANÁLISIS DE GOLPES DE ARIETE

El fenómeno del golpe de ariete se ha analizado exhaustivamente en centrales nucleares en los reactores de fisión de ambas tecnologías: *Pressurizer Water Reactor* (PWR) y *Boiling Water Reactor* (BWR). Esta experiencia ha sido publicada en el Manual de golpes de ariete de EPRI para ingenieros y operadores de plantas nucleares, EPRI TR-106438, 1996.

Los golpes de ariete en centrales nucleares pueden clasificarse en dos categorías básicas: normal (previsto) o severo (no previsto)

Un evento normal o previsto de golpe de ariete se define como uno

que se espera que ocurra durante la operación normal del sistema y no debe causar daños funcionales ni estructurales. Un evento severo o imprevisto está más allá de las consideraciones del diseño original y puede provocar daños funcionales y estructurales que acarreen la pérdida del sistema.

Los transitorios típicos de golpe de ariete son los causados por el arranque y disparo de bomba, el funcionamiento de la válvula de control o aislamiento, el cierre de la válvula de control, las operaciones de la válvula de seguridad y alivio, y el llenado de sistemas normalmente vacíos. Estos golpes de ariete previstos generalmente ocurren en un entorno de flujo monofásico. Sus efectos se pueden determinar fácilmente mediante el uso de técnicas de análisis de golpe de ariete convencionales

verificadas mediante mediciones experimentales y de campo.

Sin embargo, hay otros eventos de golpes de ariete de los que resultan cargas severas. Estos eventos son más complejos de analizar porque generalmente ocurren en un entorno de flujo bifásico transitorio. Pueden tener un impacto importante en la operación de la planta y, a menudo, causar daños significativos a los soportes de tubería y a los componentes de la tubería.

Los mecanismos específicos que pueden llevar a un golpe de ariete severo se han identificado en el documento mencionado anteriormente y en el documento EPRI Diagnóstico del Golpe de ariete Inducido por Condensación, NUREG / CR-5220-Vol. 1 y 2, 1988.

Se realizan por tanto dos procesos de selección de casos a analizar: uno para los golpes de ariete normales y otro para los severos.

Los casos de golpe de ariete en líquidos se estudian utilizando un programa para cálculo de golpe de ariete en fase líquida, *AFT-Impulse*.

Los casos que pueden ocurrir en las líneas de descarga de válvulas de alivio y seguridad cuando se opera con vapor o gas y en las líneas de venteo, así como los casos en condiciones bifásicas, que puede ocurrir en las salidas de las válvulas de alivio que descargan agua caliente se analizan utilizando RELAP5 MOD3.3.

Para los casos severos se establece un conjunto de condiciones necesarias para cada tipo de golpe de ariete, y cada sistema se verifica en relación con estas condiciones y también contra la experiencia operativa de sistemas similares en plantas nucleares.

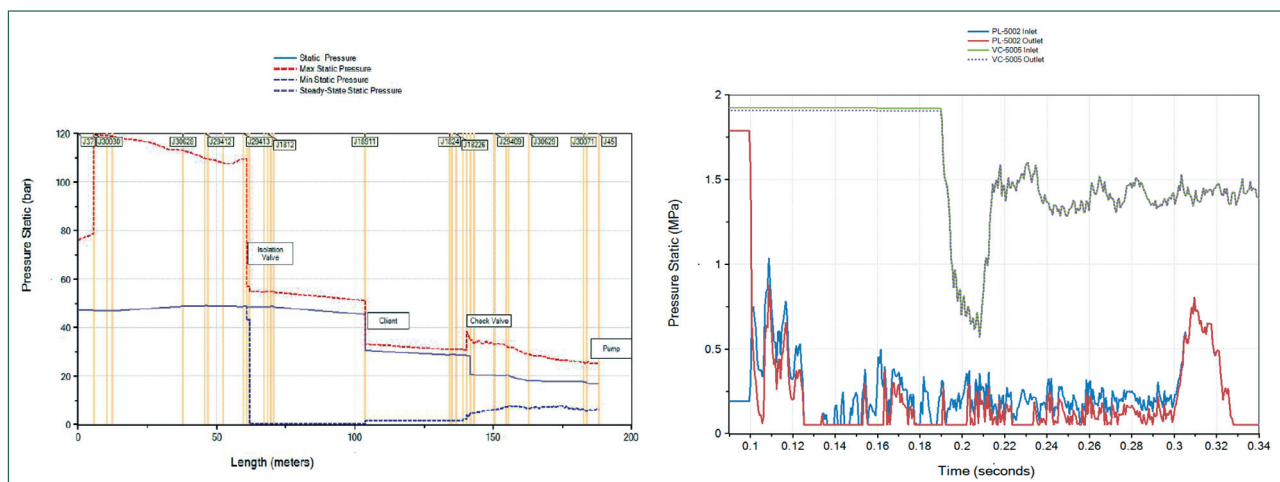


Figura 4. Izquierda: Ejemplo-Curva de presión vs longitud resultado del AFT-Impulse . Derecha: Ejemplo-Curva de presión vs tiempo resultado del AFT-Impulse.



Inicialmente, se intenta evitar la aparición de golpes de ariete severos mediante modificaciones de diseño y definiendo procedimientos operativos. No obstante, si a pesar de estos esfuerzos todavía se considera que existe un riesgo significativo de golpe de ariete severo, se puede realizar un análisis específico utilizando RELAP5 MOD3.3 con el que se poder predecir presiones y cargas.

Entre los resultados de estos análisis (historiales de tiempo de variables habituales como presión, flujo másico, calidad de vapor, fracción de huecos, velocidades ...) se obtienen funciones temporales de fuerzas que sirven como dato de partida para el posterior análisis estructural (Figura 4).

DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA SOBREPRESIÓN

Se instalan dispositivos de alivio de presión para garantizar que un sistema de proceso o cualquiera de sus componentes no estén sujetos a presiones que excedan la presión acumulada máxima permitida.

Para cada uno de los subsistemas del TWCS se realiza un análisis de los diferentes modos de operación para verificar que la protección de sobrepresión de todos los componentes sea apropiada. Para ello, los sistemas se dividen en secciones homogéneas dependiendo de su ubicación y código de diseño, centrándose especialmente en las secciones aislables. La temperatura y la presión de diseño se identifican para cada una de las secciones en las que se divide el sistema, y posteriormente se evalúa la presión de operación máxima de cada sección considerando todas las causas

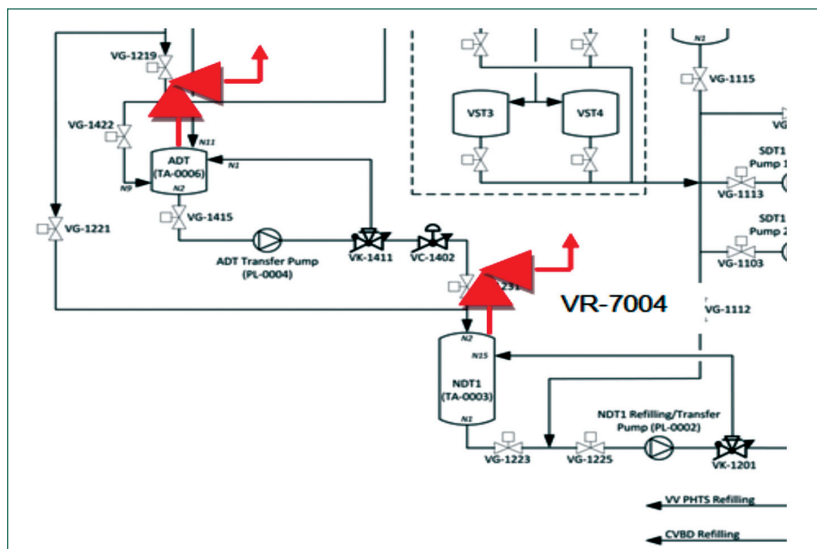


Figura 5. Ejemplo-localización de válvulas de alivio de presión en un subsistema del TCWS.

razonables que podrían causar sobrepresión.

En todos los casos se verifica que la presión de diseño de la sección analizada sea mayor que la presión máxima de operación o que un dispositivo de alivio de presión esté previsto. De lo contrario, se indica la necesidad de incluir válvulas adicionales.

Todos los dispositivos de alivio de presión (ya sean existentes o identificados como nuevos) se dimensionan adecuadamente con respecto a la presión establecida y la capacidad de descarga. Esto incluye el dimensionamiento de las líneas de descarga y la evaluación de las cargas dinámicas asociadas sobre la tubería de descarga. Para determinar el peor escenario de sobrepresión, se consideran los resultados de los análisis transitorios (previamente mencionados) desarrollados para los eventos internos (Figura 5).

CONCLUSIONES

La metodología general de cálculo aquí definida ha sido desarrollada para, a partir de un diseño preliminar de un circuito de refrigeración de agua en un reactor de fusión (en concreto, el TCWS de ITER), continuar con el proceso de diseño hasta llegar al estado del diseño final mediante la consolidación de nuevos requisitos y datos de partida para el diseño. Los cálculos de estado estacionario, transitorio, de golpe de ariete o de sobrepresión se desarrollan a partir de datos de modelos existentes, o cuando esto no es posible, de datos obtenidos del desarrollo de nuevos cálculos o modelos detallados que reflejen los requerimientos finales. Estos cálculos avanzados se utilizan por tanto con el objetivo de alcanzar el diseño final del sistema. ■

Portal de Empleo

de la Sociedad Nuclear Española

Ofertas de empleo,
prácticas y formación

apúntate a nuestro boletín digital en:

www.sne.es/boletin-digital-empleo

y si eres una empresa envía tus ofertas al correo:

empleo@sne.es