

Herramientas de simulación: desarrollo y aplicación a proyectos nucleares

E. Huélamo, R. Pérez Vara, Á. Argüello y M. García

Se presentan algunos modelos de simulación de sistemas o equipos de plantas nucleares confeccionados con EcosimPro, herramienta de simulación creada por Empresarios Agrupados. Se desarrolló como motor general de simulación, como herramienta de resolución de sistemas de ecuaciones algebraico-diferenciales, haciendo abstracción de qué quieren representar esos sistemas, e independientemente de ellos. Al motor de cálculo hay que añadir las librerías de componentes necesarios y adecuados a la disciplina objeto de simulación, con el fin de construir los modelos deseados. Desde las primeras versiones de Ecosim ya se construyeron modelos de sistemas de plantas de producción de energía fósiles y nucleares.

In this paper we present some simulation models of system and equipment from nuclear power plants, builded-up with EcosimPro, a simulation tool created by Empresarios Agrupados. It was developed as a general simulation engine, as a tool devoted to the resolution of DAE's (ordinary differential and algebraic equations sets), doing abstraction of what physical system they represent. Component libraries must be added to the calculation engine, as needed by the discipline object of simulation, in order to be able of building up models. From first ECOSIM version there were already builded models applied to thermal and nuclear power plants.

INTRODUCCIÓN

Ecosim es una herramienta de simulación que surge en la década de los 90 bajo un contrato (1989) de la Agencia Espacial Europea para que Empresarios Agrupados prepare un paquete para la simulación de sistemas de control y soporte de vida en naves tripuladas. Su primera versión fue desarrollada bajo sistema operativo UNIX. La genialidad de la concepción de Ecosim es la de haberlo desarrollado como motor general de simulación, como herramienta de resolución de sistemas de ecuaciones algebraico-diferenciales, haciendo abstracción de qué quieren representar esos sistemas. Por aquella época herramientas como ACSL, EASY-5, ..., constituían los últimos y más actuales desarrollos en el campo de la simulación y cabe decir que Ecosim las igualó cuando no superó absolutamente. Claro que al motor de cálculo, había que acompañar las librerías de componentes

necesarios, adecuados a la disciplina, a la materia objeto de la simulación, con el fin de construir los modelos deseados.

Posteriormente -finales de los 90- se decidió sustituir las plataformas tipo *Workstation* por ordenadores personales, UNIX por Windows, lo que hacía la herramienta accesible a públicos menos especializados en el campo de la informática y más en el campo de la simulación. Surge así EcosimPro.

Ya desde las primeras versiones en UNIX se realizaron aplicaciones y se construyeron modelos aplicados a plantas de producción de energía y concretamente a plantas nucleares.

En el espacio de un artículo es imposible describir todos los modelos realizados con Ecosim/EcosimPro aplicados a plantas nucleares. A continuación se describen algunos de ellos que resultan muy ilustrativos tanto acerca de la potencia de la herramienta, como del trabajo de desarrollo que subyace detrás de ellos.



EUSEBIO HUÉLAMO MARTÍNEZ

es ingeniero aeronáutico (ETSIA de Madrid) desde 1973. Desde 1974 trabaja en Empresarios Agrupados, actualmente jefe de la Sección de Aplicaciones Termohidráulicas del Departamento Mecánico. Es profesor asociado del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Comillas.



RAMÓN PÉREZ VARA

es ingeniero aeronáutico (ETSIA de Madrid), trabaja desde 1978 en Empresarios Agrupados, actualmente dentro del Departamento Mecánico, en cálculos termohidráulicos y desarrollo de programas de simulación aplicados a plantas de producción de energía, sistemas de propulsión aero-espaciales y circuitos de refrigeración bifásicos para aplicaciones espaciales.



ÁNGEL ARGÜELLO TARA

es ingeniero industrial con la especialidad de Técnicas Energéticas por la ETSII de Madrid (1985-1991). Entre 1991 y 1992 fue becario en el Instituto de Fusión Nuclear (DENIM). Comenzó en Empresarios Agrupados con una colaboración en 1992 como ingeniero de proyectos. Desde 2005 es jefe de Proyecto Mecánico de CCNN Almaraz-Trillo, cargo que desempeña en la actualidad.



MARÍA GARCÍA GONZÁLEZ

es ingeniero de minas especialidad en "Energía y combustibles" (2006) por la ETSIM de Madrid. Desde 2007 trabaja en Empresarios Agrupados, actualmente para el Departamento Mecánico en la Sección de Aplicaciones Termohidráulicas. Ha realizado trabajos usando códigos Relap5, Gothic, EcosimPro para análisis de golpes de ariete, cálculo de descargas de masa y energía por rotura y cálculo de condiciones ambientales.

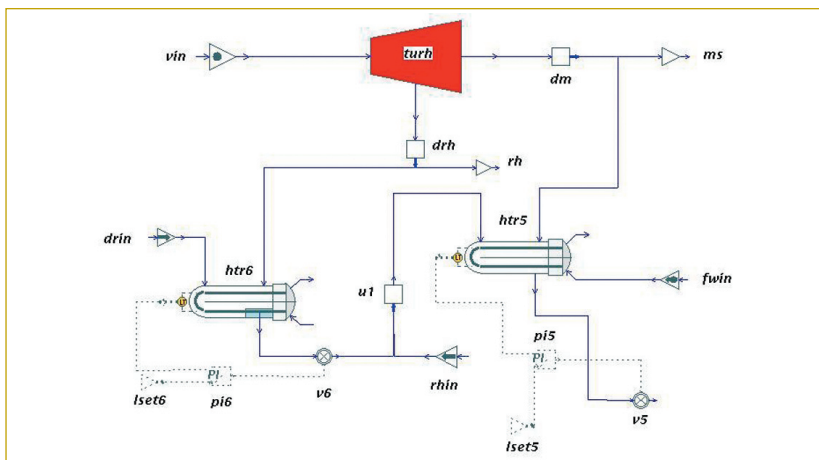


Figura 1. Modelo de cadena de calentadores.

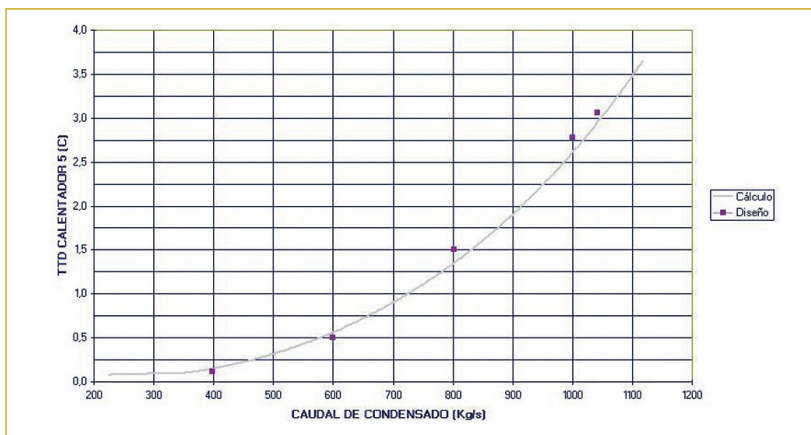


Figura 2. Validación: resultado de cálculo frente a datos de fabricante

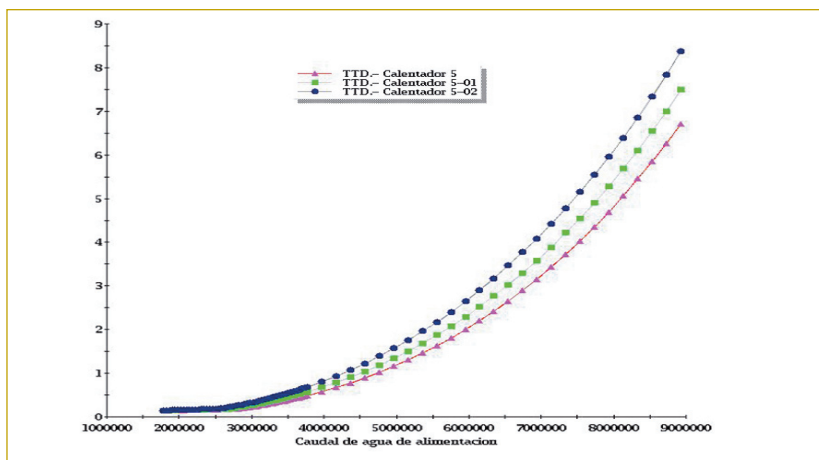


Figura 3. Resultados de cálculo fuera del punto de diseño.

ALGUNOS CASOS DE APLICACIÓN DE ECOSIM/ECOSIMPRO

Análisis del comportamiento termohidráulico de calentadores de agua de alimentación

El problema:

- Una planta nuclear plantea la posibilidad de un aumento de potencia.
- Surge la necesidad de evaluar qué equipos pueden servir y cuáles habrá que cambiar.

- No se dispone de datos para el comportamiento termohidráulico de los calentadores de agua de alimentación a cargas superiores a la de válvulas completamente abiertas.
- ¿Servirán las curvas originales de fabricante sin más que realizar una extrapolación?

El modelo: representado, para los calentadores de alta presión en la Figura 1

La validación: ver ejemplo en la Figura 2

Los resultados: ver ejemplo en la Figura 3

Conclusiones para este modelo:

- Se consiguen unos modelos validados que simulan con bastante aproximación el comportamiento termodinámico de los calentadores de agua de alimentación.
- Pueden, por tanto, obtenerse con dichos modelos los valores de TTD y DCA para cargas superiores y disposiciones diferentes a las originalmente previstas, utilizables para otros cálculos con el propio programa o con cualquier otro de balance térmico.
- Pueden emplearse estos modelos para comprobar el efecto del taponamiento de tubos sobre las curvas de TTD y DCA de los calentadores.

Modelo del nuevo sistema de control de agua de alimentación de la C.N. Almaraz. Análisis de masa aportada a los generadores de vapor

El objeto de este trabajo fue la confección de un modelo de cálculo del sistema de condensado y agua de alimentación que contemplase con todo lujo de detalles el nuevo sistema de control instalado en la central, que fuese fácilmente modificable e inteligible, fácilmente puesto al día con la situación real de planta y que permitiese realizar en tiempos razonables análisis fiables de comportamiento del conjunto lógico-hidráulico en situaciones o maniobras consideradas de interés.

Validación: Fue necesario validar las librerías particulares usadas para el desarrollo de los modelos concretos para la central nuclear de Almaraz y se hizo una validación doble, mediante el estudio de componentes individuales (*separated effect problems*) y de modelos construidos mediante la conexión de dichos componentes (*integral test problems*). (Figura 4).

El modelo comienza -sentido del flujo- en el pozo caliente del condensador, condición de contorno de presión, y finaliza en las tuberías de salida -vapor principal- de los generadores de vapor, asimismo modeladas como condiciones de contorno, éstas de flujo másico. Los lados de carcasa de los calentadores 5A y 5B y la recirculación larga de las bombas de agua de alimentación también están modelados como condiciones de contorno de presión.

Equipos principales incluidos detalladamente:

- Bombas de condensado, de drenaje de calentadores y de agua de alimentación.

- Válvulas de control de agua de alimentación, tanto la de operación normal como la de *by-pass*.

Equipos principales incluidos de forma simplificada:

- Generadores de vapor, como tanques en los que se puede establecer como condición de contorno la presión en la superficie libre, siendo dato la curva que relaciona el nivel con el inventario de agua.

Equipos principales incluidos para simular su comportamiento desde el punto de vista hidráulico:

- Calentadores de agua de alimentación y tubería asociada.

Modelo de control: compuesto por varios submodelos, en los que están contemplados todos los elementos que intervienen en el sistema de control. Como ejemplo, en las Figuras 5 y 6 se muestra un esquema de control y su modelo EcosimPro.

Configuración de experimentos y método de análisis:

Para realizar los “experimentos”, así denominados en Ecosim/EcosimPro, se siguió el siguiente procedimiento:

- 1) Algunos parámetros generales de operación normal (presión en aspiración de bombas de condensado, temperaturas y caudales de drenaje de calentadores, presión en generadores de vapor y demanda de vapor principal) se imponen como condiciones de contorno a un primer modelo, en el que todos los controles y equipos se suponen funcionando correctamente, con el fin de obtener, para determinada carga, una situación estacionaria, funcionamiento en régimen permanente. El resultado de este análisis se guarda en un fichero que, en el paso siguiente, se usará como fichero de *restart*.
- 2) Dependiendo de la carga, se modifica el modelo correspondiente para “desconectar” el control que actúa sobre el equipo cuyo fallo quiera estudiarse, imponiendo en el fichero de “experimento” el modo de operación de dicho equipo.
- 3) Se “desconectan” las señales que generan las medidas de caudales de vapor principal; manualmente, se da una información a los elementos que la necesitan suponiendo que los medidores de caudal, en situación de rotura, por gran diferencia de presión, deben dar señal -falsa- de caudal de vapor máximo.
- 4) Se rueda el caso correspondiente tomando como condiciones iniciales las del fichero *restart* a que se

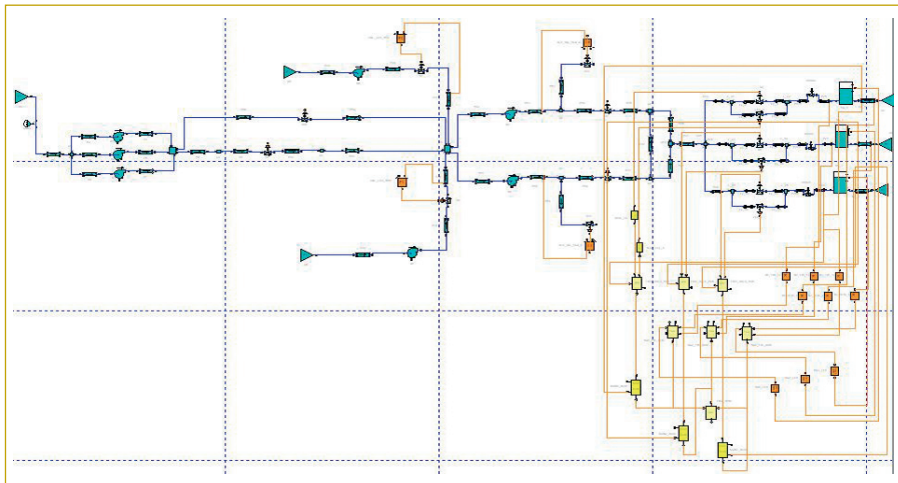


Figura 4. Modelo hidráulico y de control.

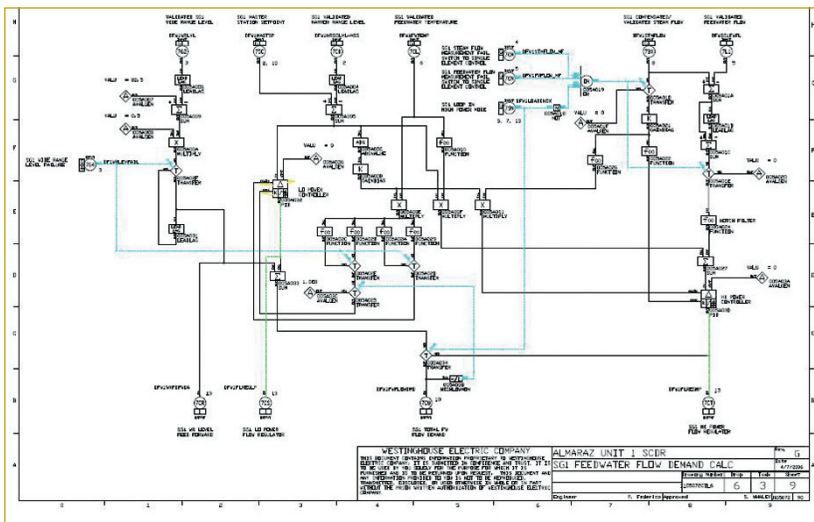


Figura 5. Esquemático de control.

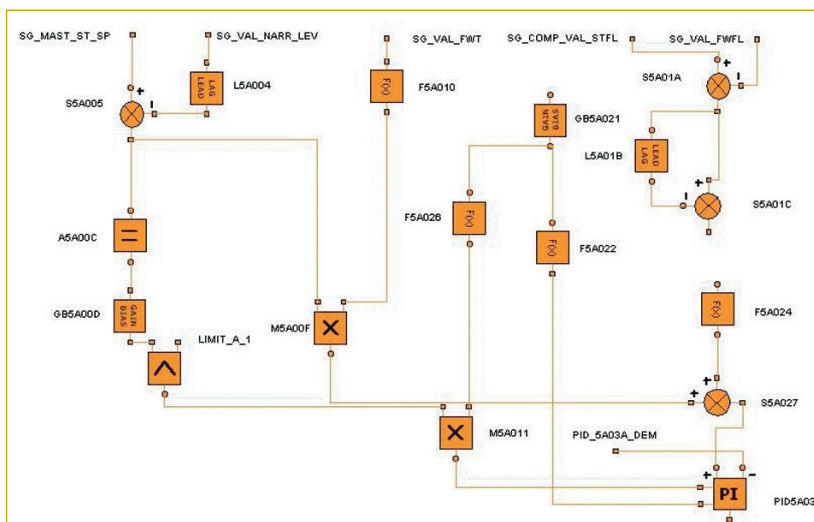


Figura 6. Modelo EcosimPro del esquema anterior.

hace referencia más atrás, imponiendo los valores de descarga de masa por la rotura en función del tiempo proporcionados por Westinghouse y con el resto de las hipótesis establecidas.

Casos estudiados y resultados obtenidos

El recuadro siguiente muestra una relación de algunos de los casos analizados, para rotura tipo D, en línea de vapor principal:

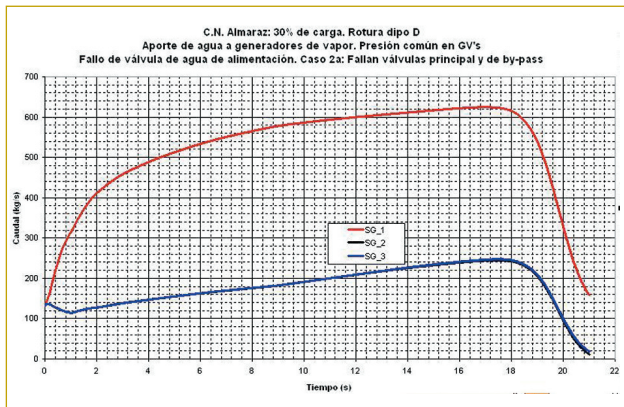


Figura 7. Caudal máxica aportado.

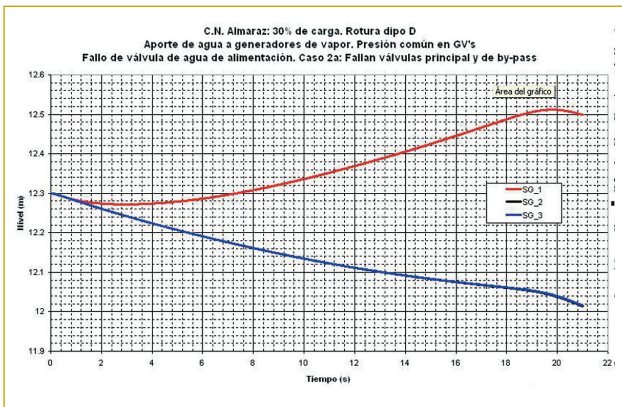


Figura 8. Nivel en GV.

- Fallo de una turbobomba (0 y 30% de potencia).
- Fallo de las dos turbobombas (30% de potencia).
- Fallo de válvula de *by-pass* (iniciado con el accidente) (0 y 30% de potencia).
- Fallo de válvula de *by-pass* (previo al accidente) (0 y 30% de potencia).
- Fallo de válvula principal (iniciado con el accidente) (0 y 30% de potencia).
- Fallo de válvula principal (previo al accidente) (0 y 30% de potencia).
- Fallos de válvulas principal y de *by-pass* (iniciados con el accidente) (0 y 30% de potencia).
- Fallos de válvulas principal y de *by-pass* (previos al accidente) (0 y 30% de potencia).

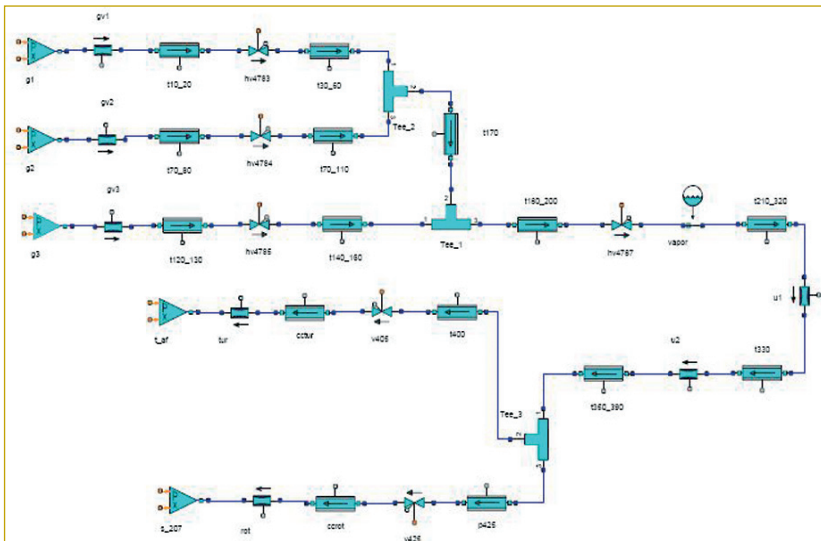


Figura 9. Modelo para evaluación de rotura hipotética en tubería de 3".

Las Figuras 7 y 8 muestran algunos de los resultados que, comparados con los obtenidos por otros métodos, presentan una muy aceptable coincidencia.

Otros transitorios de planta de C.N. Almaraz: Rotura de tubería de 3".

Es muy interesante este caso porque en él se hace una comparación entre los resultados de EcosimPro y los obtenidos con un modelo de Relap. Se trataba de determinar las descargas de masa y energía ante una hipotética rotura de una tubería de 3" de vapor

auxiliar. En la Figura 9 se muestra el modelo de EcosimPro.

Algunos resultados obtenidos se muestran en las Figuras 10, 11, 12 y 13.

C.N. TRILLO. EVOLUCIÓN DE LA PRESIÓN DE OPERACIÓN DEL CONDENSADOR

OBJETIVOS DEL ESTUDIO:

- Establecer valores límite para la operación con dos o tres bombas de

agua de circulación, así como criterios para el arranque o parada de alguna de ellas antes de la realización de otras maniobras.

- Determinar los tiempos de reacción necesarios para –una vez alcanzada la alarma por alta presión en el condensador– evitar alcanzar la presión de disparo.
- Se usó Ecosim-Pro con la librería Thermal_Balance, en la cual se incluyeron como componentes dinámicos:

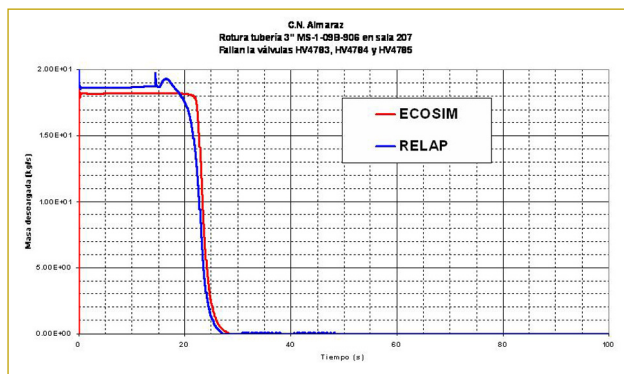


Figura 10. Caudal descargado.

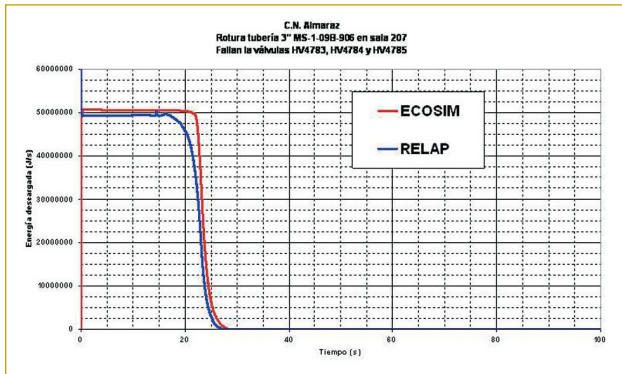


Figura 11. Flujo energético.

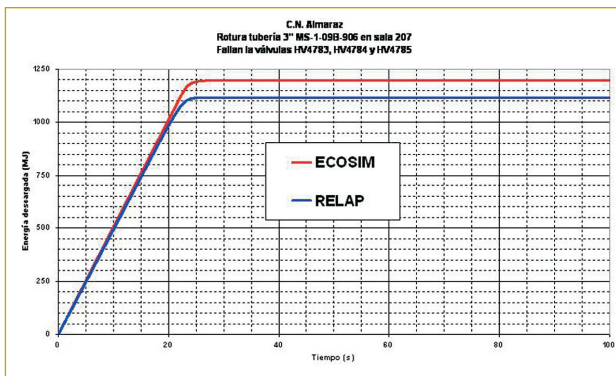


Figura 12. Energía total descargada.

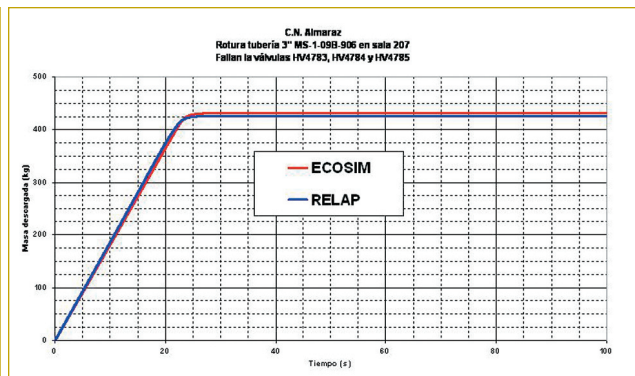


Figura 13. Masa total descargada.

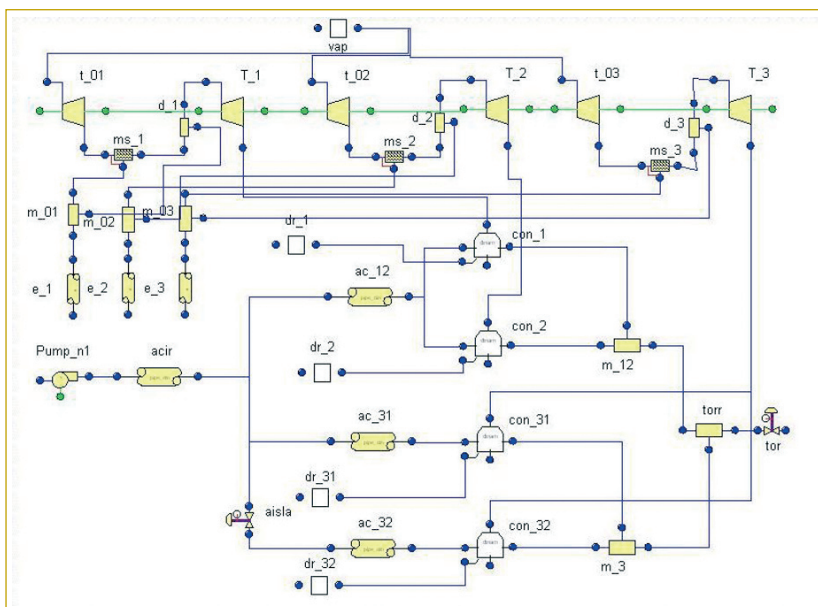


Figura 14. Esquema del modelo

- Condensador
- Tuberías
- Válvulas

manteniéndose como componentes estacionarios el resto de los involucrados en la simulación.

La Figura 14 muestra el esquema del modelo. En él se contempla la turbina desde la salida de la penúltima extracción de humedad. Ello obliga a modelar, adicionalmente, el último de los separadores de humedad internos de la turbina y permite suavizar el efecto de simetría. Es decir, se deja libre el reparto de caudales entre los tres cuerpos de la turbina en función de las presiones de escape de cada uno de ellos.

Las condiciones de contorno impuestas fueron (100% de carga):

- Entalpía del vapor a la entrada en turbina correspondiente a la entalpía de salida del penúltimo separador de humedad. (Obtenido de las líneas de extracción de Siemens).
- Caudal total de vapor que entra en esa posición (obtenido del balance térmico de Siemens).
- Caudal y entalpía de los drenajes de entrada al condensador (obtenidos del balance de Siemens).
- Hipótesis adicionales:
 - El caudal total de los drenajes se distribuye a partes iguales entre los tres cuerpos del condensador.
 - Se mantiene fijo el caudal total a los calentadores RH11/12/13-B001 de la extracción A1 de baja presión (balance térmico de Siemens).
 - Presión en cuerpo de calentadores 1 igual al final de las tres tuberías de extracción.

COMPARACIÓN ENTRE MODELO Y REALIDAD:

- Se hicieron unas pasadas previas para estimar la respuesta del modelo en relación con las medidas de planta.
- En ellas se supuso que no había tubos taponados y se ajustó el modelo a una temperatura de agua de circulación, a la entrada del condensador, de 25°C.

SISTEMÁTICA DEL CÁLCULO:

- 1) Obtención de un estacionario para la temperatura de agua de circulación y el número de bombas objeto de cada uno de los casos particulares, en la hipótesis de que está todo abierto.
- 2) A partir de ese estado se consigue otro estacionario, taponando lentamente tubos, hasta el número correspondiente al caso de que se trate y, a partir de esta situación, se realiza la maniobra de aislamiento de un semicuerpo y se estudia detenidamente el proceso evolutivo de las distintas variables termohidráulicas involucradas.

CASOS ANALIZADOS:

- Se analizaron todas las combinaciones posibles entre:
 - Dos o tres bombas de agua de circulación en funcionamiento.
 - Temperaturas del agua fría de 15, 20, 25, 28, 30, 32 y 35°C.
 - Número de tubos taponados en el semi-cuerpo que no se aísla entre 0 y 6600 (de 300 en 300).

Algunos resultados se muestran en las Figuras 15, 16 y 17.

Modelos simplificados de componentes singulares

La simulación de equipos, subsistemas, modos de operación o situaciones transitorias de centrales nucleares, puede ser muy compleja si se pretende reproducir con fidelidad todos los componentes y procesos que intervienen; sin embargo, es posible simplificar los modelos para que permitan extraer, de manera fiable, las conclusiones necesarias en cada caso. Esto puede conseguirse por medio de componentes creados específicamente para cubrir estas necesidades.

Se presentan dos ejemplos de desarrollo de modelos que simulan equipos de centrales nucleares, como pueden ser generadores de vapor o desaireadores, por medio de componentes que, simplificando la formulación de algunos de los fenómenos físicos del equipo, reproducen aquéllos que son más determinantes

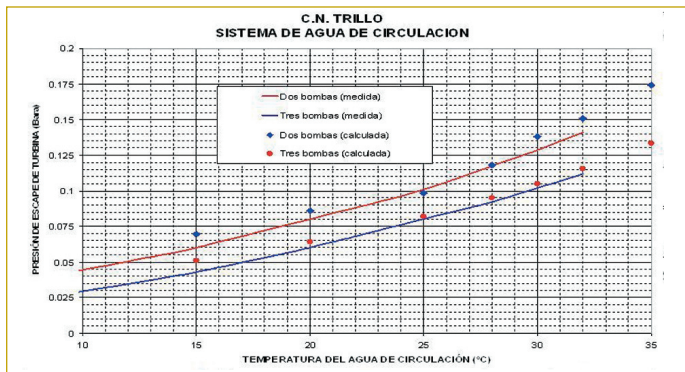


Figura 15. Validación del modelo.

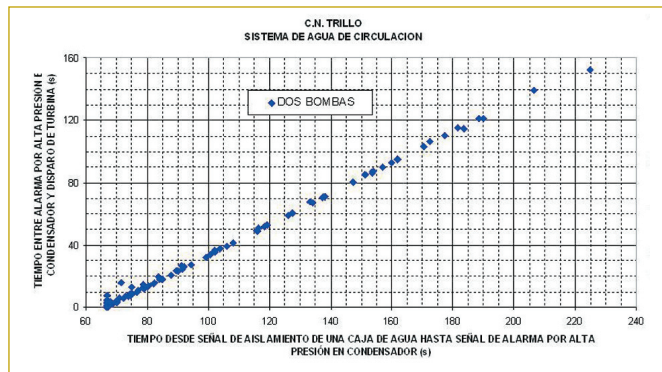


Figura 16. Comportamiento con dos bombas de agua de circulación operando.

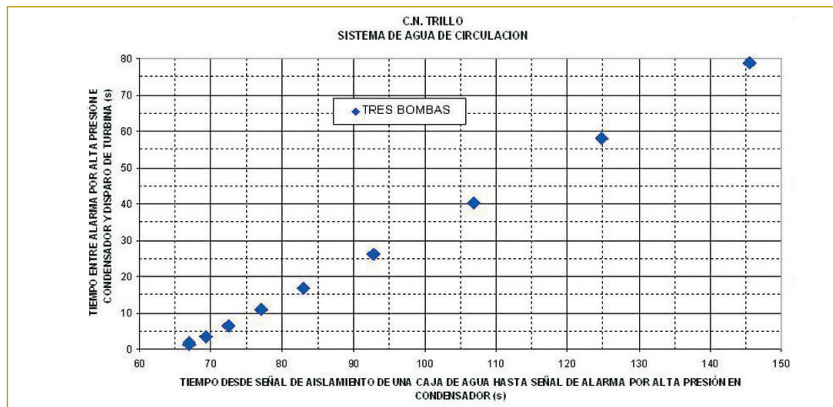


Figura 17. Comportamiento con tres bombas de agua de circulación operando.

en su comportamiento y que son los que han de ser tenidos en cuenta para cumplir con el objetivo de los transitorios que se desean estudiar.

Respecto al generador de vapor (Figura 18), si no hay necesidad de realizar un análisis exhaustivo de los fenómenos que tienen lugar dentro del mismo, se puede hacer un modelo del que, sin contemplar "microscópicamente" todos los mecanismos de transferencia de calor, ni el comportamiento detallado (fracción de huecos, ebullición nucleada, ...) del proceso, se puedan extraer las conclusiones necesarias con un modelo más sencillo en el que la dinámica del primario sólo se tenga en cuenta por medio de una tabla de calor añadido y la dinámica del secundario se simplifique.

Las relaciones termohidráulicas y parámetros tenidos en cuenta para la realización del modelo son las correspondientes a conservación de masa y energía. Se plantean las ecuaciones necesarias para resolver el sistema y calcular las incógnitas buscadas (continuidad, balance energético, presiones y distribución de fases, nivel).

En lo que respecta al segundo ejemplo, ver Figura 19, ocurre en ocasiones que es conveniente tener en cuenta el aire existente en el espacio vacío de un depósito en el cual, a su vez, hay una mezcla de agua vapor, todo ello en equilibrio. Este es el caso del componente que simula un tanque bifásico con cámara de aire.

Aprovechando una de las ventajas fundamentales de EcosimPro, la facilidad de reutilización, y partiendo del modelo anteriormente expuesto, unas pocas modificaciones relacionadas con las corrientes de entrada y salida del tanque sirven para completar el modelo del componente.

Estas corrientes adicionales son la de entrada de agua (w_{stm_in}), líquida, vapor o bifásica; la corriente de entrada de mezcla aire-vapor ($w_{stm_air_in}$) en la que son conocidas las fracciones máxicas de cada uno de los componentes; la corriente de salida de mezcla aire-vapor ($w_{stm_air_out}$), cuya composición resulta de los cálculos realizados dentro del propio componente y la corriente de salida de agua en fase líquida (w_{liq_out}). Hipótesis simplificadoras que permiten la formulación de este modelo son temperatura y presión uniformes y modelo homogéneo.

CONCLUSIONES

Con los ejemplos hasta aquí expuestos se ha querido ilustrar, siquiera sea someramente, la labor de investigación, desarrollo e innovación que Empresarios Agrupados viene realizando a lo largo de los últimos años en el campo de la simulación aplicada a la energía nuclear, aprovechando el potencial de la herramienta EcosimPro que, en estos momentos constituye una aplicación en la que están presentes las

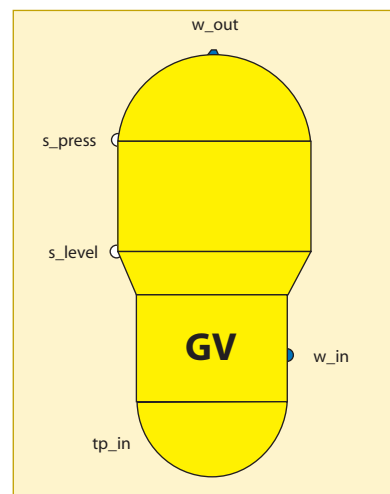


Figura 18. Esquema de Generador de Vapor simplificado.

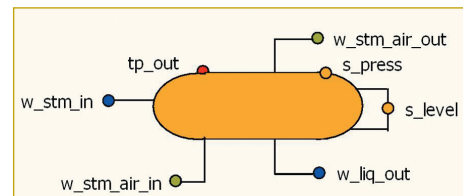


Figura 19. Modelo de tanque bifásico con cámara de aire.

últimas novedades en el estado del arte del campo de la simulación propiamente dicha, los métodos numéricos de cálculo, las comunicaciones entre procesos y la interfaz hombre máquina para hacer atractiva y facilitar la tarea a la hora de crear modelos de simulación de sistemas de Planta.

Ni que decir tiene que la labor continua con el mismo o mayor empeño que el que hasta ahora se ha puesto en este paquete de simulación, mundialmente reconocido y usado en campos y empresas tan dispares como la Agencia Espacial Europea, el CERN, los procesos (simulación de planta azucarera) la energía (tanto nuclear como térmica o solar) y, en resumen, allá donde se precise una herramienta versátil y fiable para resolver en plazo y con recursos razonables un problema de simulación. ■