

APLICACIONES DE SIMULACIÓN MULTIDISCIPLINAR CON ECOSIMPRO

Empresarios Agrupados ha desarrollado las herramientas comerciales de simulación multidisciplinar de sistemas EcosimPro/Proosis (www.ecosimpro.com) para múltiples aplicaciones en los sectores de Energía, Aeronáutica y Espacio, entre otros, como resultado de la experiencia ganada en el desarrollo de análisis termohidráulicos para centrales nucleares.

Se presentan aquí las principales características de EcosimPro/PROOSIS, así como algunas de las aplicaciones más relevantes en energía; en particular balance térmico y eficiencia de plantas con un caso de aplicación, así como criogenia y tritio en grandes instalaciones científicas y de fusión.

INTRODUCCIÓN

EcosimPro/Proosis permite modelar y simular cualquier sistema basado en ecuaciones algebraico-diferenciales y eventos discretos. Dispone de un lenguaje potente y sencillo de modelado orientado a objetos, y permite su conexión a otros programas usando diferentes estándares.

Incluye potentes resolvers de ecuaciones algebraico-diferenciales, tanto de paso fijo como de paso variable, resolvers de ecuaciones no-lineales, detección precisa de eventos, así como una interfaz de usuario muy potente y atractiva. El usuario se limita a modelar los procesos y la herramienta se ocupa de adaptarlos de forma óptima para su resolución. También incorpora algoritmos internos de derivación simbólica, reordenación de ecuaciones, detección de algebraicas ocultas, etc., que producen modelos matemáticos muy optimizados para su resolución, y todo ello de una manera intuitiva y transparente para el usuario.

EcosimPro constituye hoy en día la herramienta oficial de la ESA (Agencia Espacial Europea) en la propulsión química, control térmico mediante LHP (Loop Heat Pipes), sistemas de potencia, y sistemas de control ambiental y soporte de vida en naves espaciales tripuladas, incluyendo reacciones químicas/electroquímicas, procesos biológicos, y sistemas ecológicos.

Igualmente, Proosis, evolución de EcosimPro, representa el estado del arte en modelado de prestaciones (performance) de turbinas de gas aeronáuticas y sistemas de avión: el

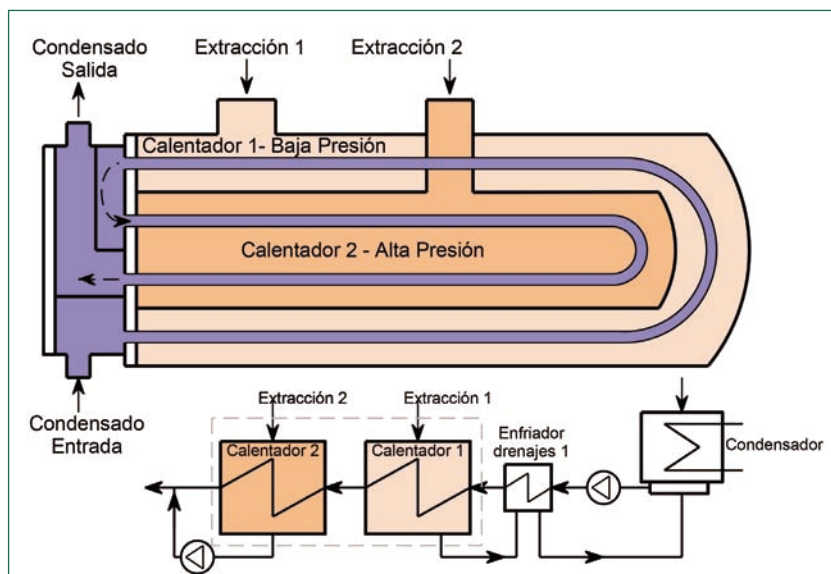


Figura 1. Calentador duplex combinando los calentadores 1 y 2.

RAMÓN PÉREZ VARA

Departamento Mecánico.
EMPRESARIOS AGRUPADOS
Ingeniero aeronáutico (ETSIA de Madrid)..

ANA VELEIRO BLANCO

Área de Informática y Simulación.
EMPRESARIOS AGRUPADOS.
Ingeniero industrial (Automática y Electrónica) por la ETSII de Vigo.

JENIFER SERNA PÉREZ

Área de Informática y Simulación.
EMPRESARIOS AGRUPADOS.
Es ingeniero químico por la Universidad de Valladolid.

ALMUDENA RUEDA FERREIRO

Área de Informática y Simulación.
EMPRESARIOS AGRUPADOS.
Es Doctor en Ingeniería de Procesos y Sistemas e ingeniero químico por la Universidad de Valladolid.

MULTIDISCIPLINARY SIMULATION APPLICATIONS WITH ECOSIMPRO

Empresarios Agrupados has developed the commercial multidisciplinary system simulation tools EcosimPro/PROOSIS (www.ecosimpro.com) for many different applications in Energy, Aeronautics and Space sectors, among others, as a result of our past experience in the development of thermal-hydraulic simulations for Nuclear Power Plants

Hereafter are shown the main characteristics of EcosimPro/PROOSIS and the most relevant applications for Energy Sector, particularly for Thermal Balance and Plant Efficiency including a study case, and for Cryogenics and Tritium in Scientific Installations and Fusion Facilities



sistema neumático (control ambiental-ECS y sangrado de aire), hidráulico (alimentación de combustible y aceite), ciclos de vapor (refrigeración, *bottoming cycles*, etc.) y sus interacciones térmicas (*thermal management*). Igualmente se facilita la simulación conjunta con el motor, lo que viene utilizándose en industrias como Airbus, Grupo Safran, etc

BALANCE TÉRMICO Y EFICIENCIA DE PLANTA

Descripción del problema

En la central nuclear de Trillo las cifras de producción de electricidad indicaban que había ocurrido una pequeña pérdida de eficiencia en el secundario de la central. Los equipos sospechosos de la pérdida de eficiencia eran los calentadores dúplex de dos de los tres trenes de condensado de la planta.

El calentador dúplex es un equipo que combina los calentadores 1 y 2 de baja presión en un único módulo permitiendo ahorrar espacio (Figura 1). Mientras que la cadena 3 continuaba operando en unas operaciones similares a las existentes antes de la recarga, los puntos de operación de las cadenas de baja, números 1 y 2, habían sufrido desviaciones en sus puntos de operación (respecto los de la cadena 3) que se muestran en la Figura 2.

Las principales desviaciones para los puntos de operación de las cadenas de baja números 1 y 2 con respecto a la cadena de baja número 3 se describen a continuación, referidas a los calentadores dúplex:

1. Los flujos máscicos de drenaje del lado de alta presión de las cadenas de baja 1 y 2 habían disminuido con respecto al de la cadena 3 (15.6 % en cadena 1 y 12.5 % en cadena 2).
2. Las temperaturas de vapor en el lado de baja presión en las cadenas de baja números 1 y 2 habían experimentado un aumento muy significativo respecto a la temperatura en el lado de baja presión de la cadena de baja número 3 (7.8°C en cadena 1 y 6.5°C en cadena 2).
3. Las temperaturas de vapor en el lado de alta presión también mostraban una clara asimetría en sentido contrario a la anterior (en las cadenas 1 y 2 era 1,8°C menor que en la cadena 3).
4. Las temperaturas del condensado a la salida de los calentadores en las cadenas 1 y 2 eran más

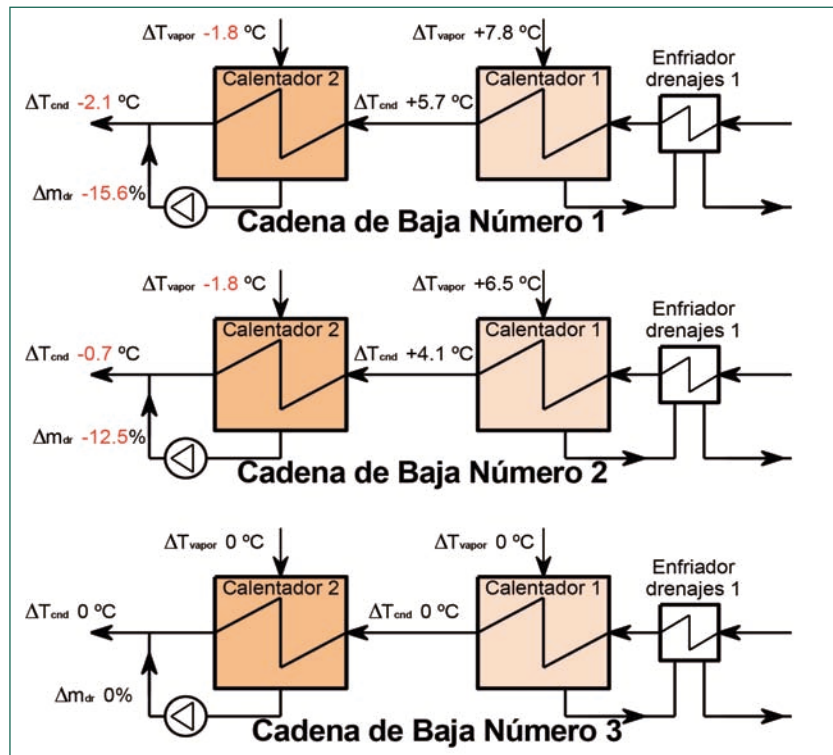


Figura 2. Desviaciones punto de operación cadenas de baja 1 y 2 respecto cadena 3.

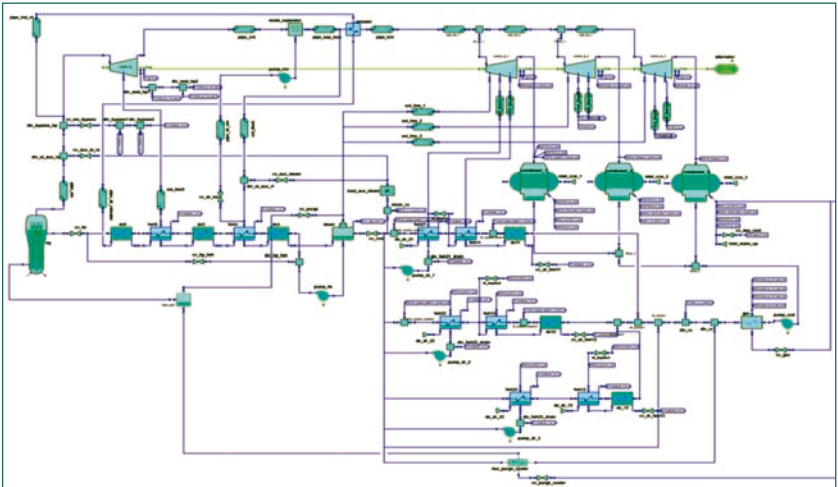


Figura 3. Modelo del balance energético de C.N. Trillo en EcosimPro.

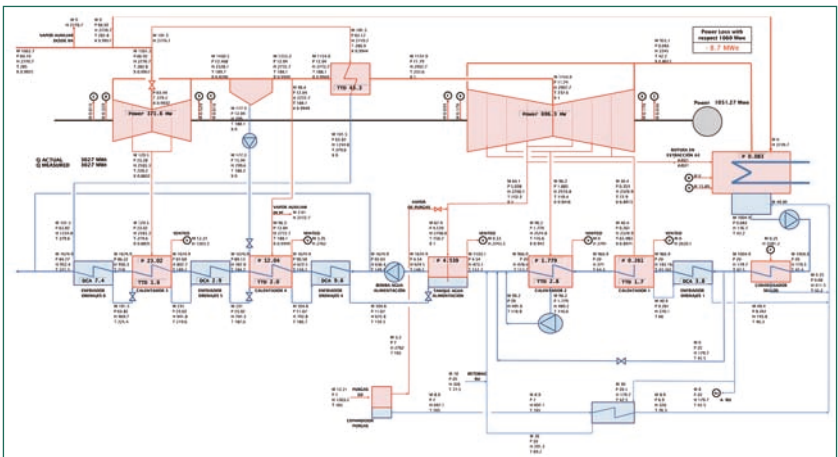


Figura 4. Diagrama del estado global de la planta de la interfaz Excel.



bajas que en la cadena (2.1°C en la cadena 1 y 0.7 °C en la cadena 2).

5. Las temperaturas de condensado a la salida del lado de baja presión también mostraban una asimetría contraria (5.7°C más caliente en la cadena 1 que en la cadena 3, y 4.1°C más caliente en la cadena 2 que en la cadena 3).

Aun sabiendo que los equipos probablemente causantes de la pérdida de rendimiento eran los calentadores dúplex de las cadenas 1 y 2, había que averiguar el fallo para su confirmación durante la recarga.

Modelo detallado del balance de planta

Con el fin de diagnosticar el fallo se decidió desarrollar un modelo de balance energético de la planta capaz de simular degradaciones y fallos de equipos, en operación estacionaria. Dicho modelo permitió simular diferentes escenarios con alto grado de aproximación a la respuesta real del ciclo, tanto en condiciones de operación nominal como en casos de funcionamiento degradado debidos al desgaste o malfuncionamiento de los equipos.

Se postularon diversas degradaciones y averías de los equipos y para cada degradación o fallo se aplicó un algoritmo que minimizase la desviación entre las variables medidas en planta y las calculadas cambiando el nivel de la degradación o el tamaño del fallo supuesto. Lógicamente, la causa más probable de la degradación sería aquella que más redujese la desviación entre las variables medidas y las calculadas por el modelo, una vez aplicado el algoritmo de optimización.

En la Figura 3 se muestra el esquemático del modelo de EcosimPro que representa las 3 cadenas de baja (3 turbinas de baja, 3 cuerpos del condensador, y 3 cadenas de calentamiento de baja). Para permitir la utilización del modelo por personal de proceso sin conocimientos de la herramienta de simulación, se construyó con Excel una interfaz de usuario (Figura 4).

Algoritmo de optimización

La resolución de un problema de optimización requiere la definición de la función de coste cuyo valor se desea minimizar. En este estudio la función de coste se definió como la suma cuadrática de los errores entre las variables medidas y calculadas en la zona de las cadenas de baja.

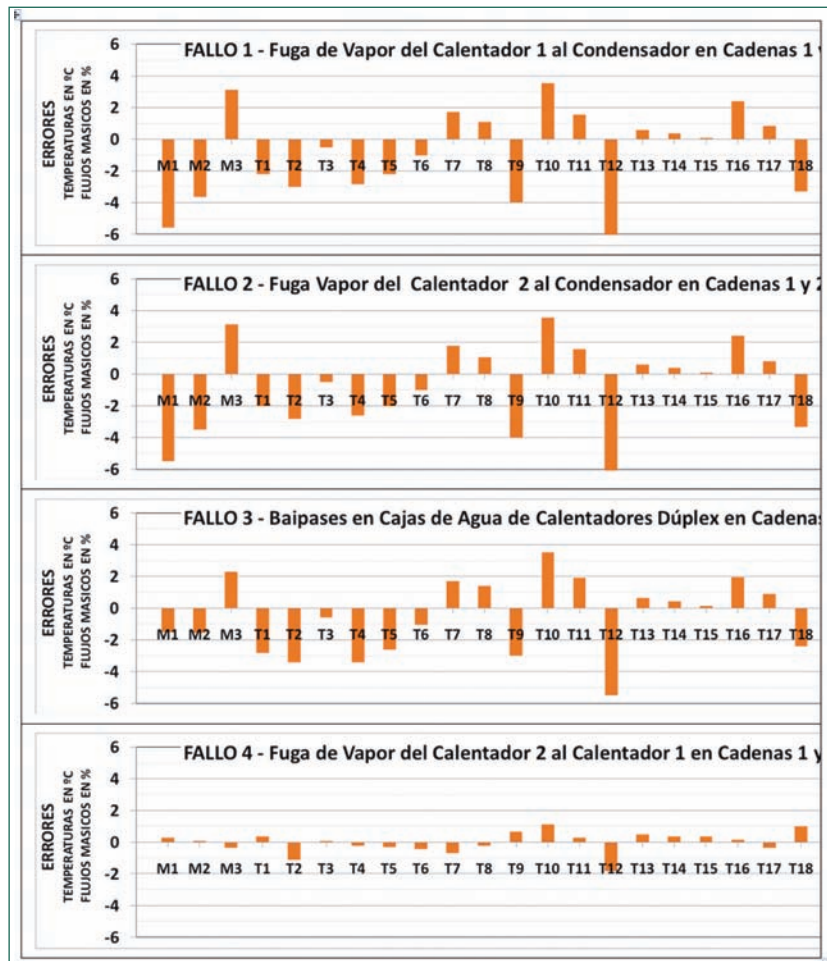


Figura 5. Desviaciones entre variables medidas y calculadas para los cuatro fallos postulados.

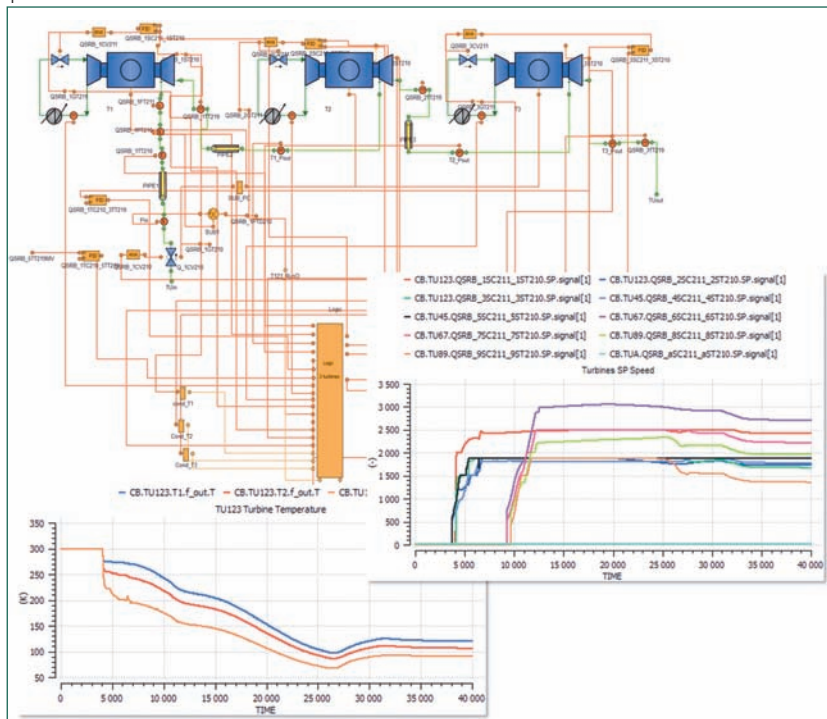


Figura 6. Coldbox de unidad de refrigeración del LHC en EcosimPro, gráficas de set-point de turbinas y evolución de temperaturas durante el cooldown del sistema.



Como el fallo estaba situado en las cadenas de baja, las variables consideradas en la función de coste fueron exclusivamente aquellas que describían el estado de las cadenas de calentamiento de baja presión.

En cuanto a las variables cuyo valor se calculaba con el algoritmo de optimización para minimizar el valor de la función de coste, se incluyeron aquellas que definían el tamaño o el alcance del fallo. Ahora bien, dado el tipo de avería que se desea analizar, la presión real a la entrada de la última etapa de la turbina de baja y el valor de la caída de presión en las líneas de extracción de los calentadores podían tener una gran influencia sobre los resultados. A fin de estimar las presiones reales en la entrada de la última etapa de la turbina de baja, y la caída de presión en las líneas de extracción del lado de baja de los calentadores dúplex de la forma más precisa posible, se decidió incluir el factor de flujo del último escalón de la turbina de baja y un multiplicador de las caídas de presión en las líneas de extracción al lado de baja de los calentadores dúplex en las variables del problema de optimización.

Resultados

En la Figura 5 se proporcionan diagramas de barras con la desviación entre variables medidas y calculadas para los cuatro fallos postulados en los calentadores dúplex después de optimizar el tamaño del fallo. Puede verse claramente, que el fallo número 4, fugas de vapor en los calentadores dúplex de las cadenas 1 y 2 desde el lado de alta presión (calentador 2) al lado de baja presión (calentador 1) es el que proporciona el mejor ajuste a las mediciones en planta.

Posteriormente se procedió a inspeccionar el equipo durante la parada para la recarga. En una primera inspección no se encontró ningún área de fuga entre los lados de alta presión y baja presión de los calentadores dúplex de las cadenas 1 y 2. No obstante, los resultados del análisis eran tan concluyentes que se realizó otra prueba que puso de manifiesto la fuga.

CRIOGENIA EN LAS GRANDES INSTALACIONES CIENTÍFICAS

La simulación de sistemas criogénicos y de su control se basa en una librería desarrollada inicialmente por CERN (European Organization

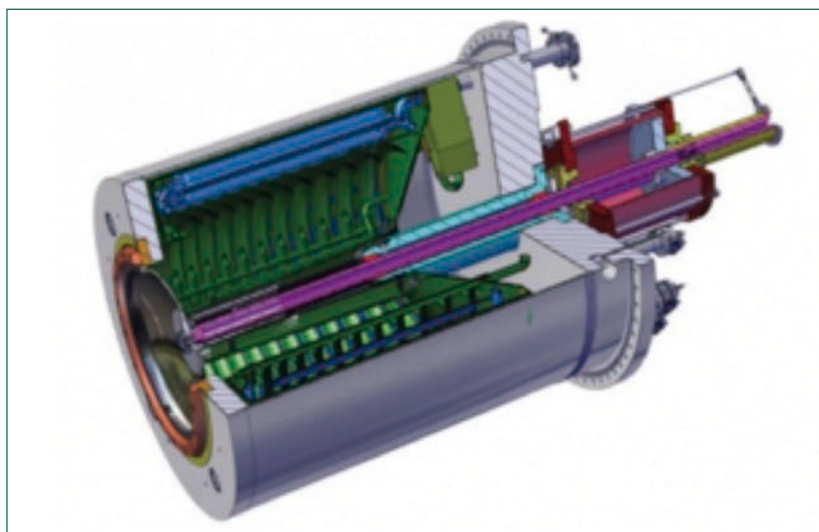


Figura 7. Bomba criogénica.

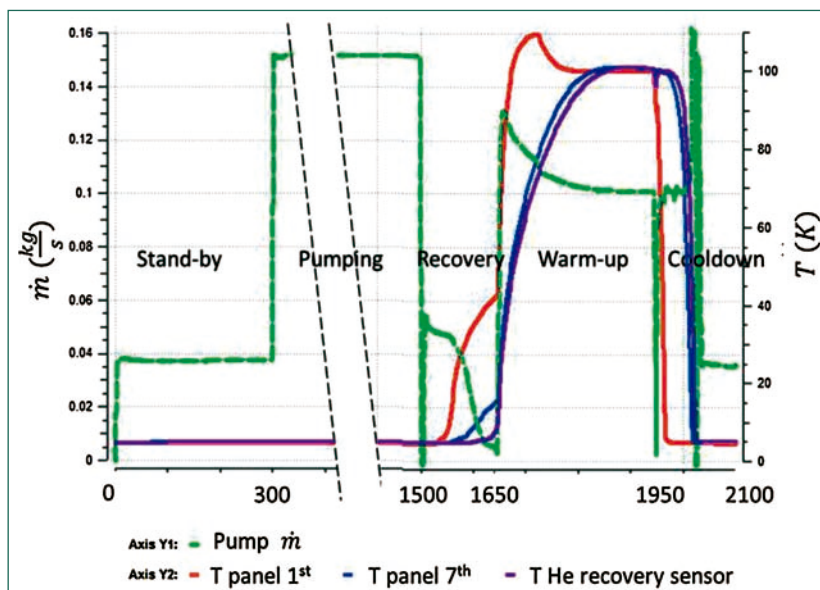


Figura 8. Regeneración a 100K de bomba criogénica.

for Nuclear Research) en EcosimPro y ha sido validada con datos experimentales de sus instalaciones. Estos sistemas son los encargados de suministrar helio a muy baja temperatura para garantizar la superconductividad de los imanes en aceleradores de partículas y reactores experimentales de fusión como ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor).

La simulación dinámica de la planta criogénica es clave para analizar el comportamiento del sistema fuera del punto de funcionamiento nominal y diseñar su sistema de control. Adicionalmente permite realizar un comisionado virtual de la planta para detectar problemas con antelación y reducir el tiempo total de comisionado. Algunos de los escenarios simulados son el

arranque y enfriamiento de los refrigeradores o situaciones especiales como la parada de las turbinas y el posterior arranque del sistema frío. En la Figura 6 se muestra el arranque de una de las unidades de refrigeración del LHC (CERN) desde temperatura ambiente hasta su punto de operación a 4.5K.

La planta criogénica de ITER está formada por tres refrigeradores (He) funcionando en paralelo y suministrará helio a los imanes de ITER, los escudos térmicos y las bombas criogénicas. El amplio rango de escenarios de operación del Tokamak y el hecho de que los refrigeradores tengan que trabajar con cargas pulsadas son las características principales del sistema que lo hacen especialmente complejo.

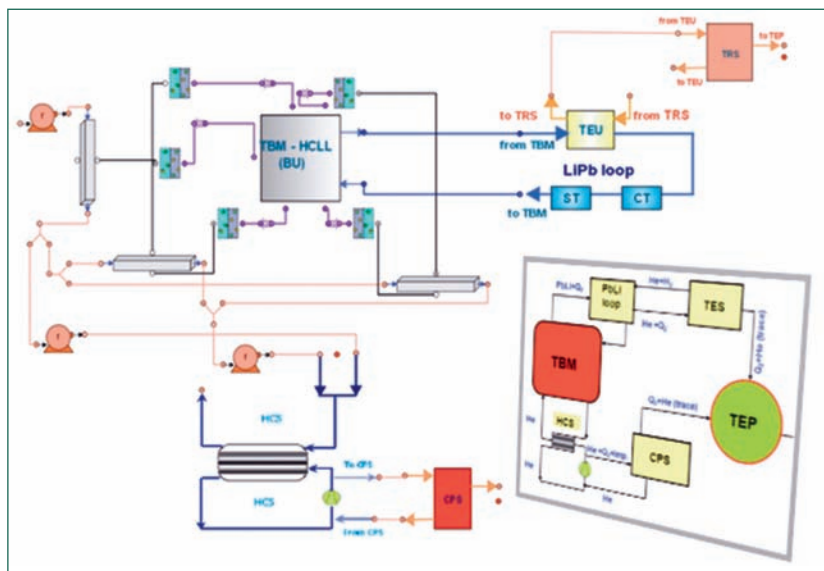


Figura 9. Modelo en EcosimPro y diagrama del sistema HCLL-TBS.

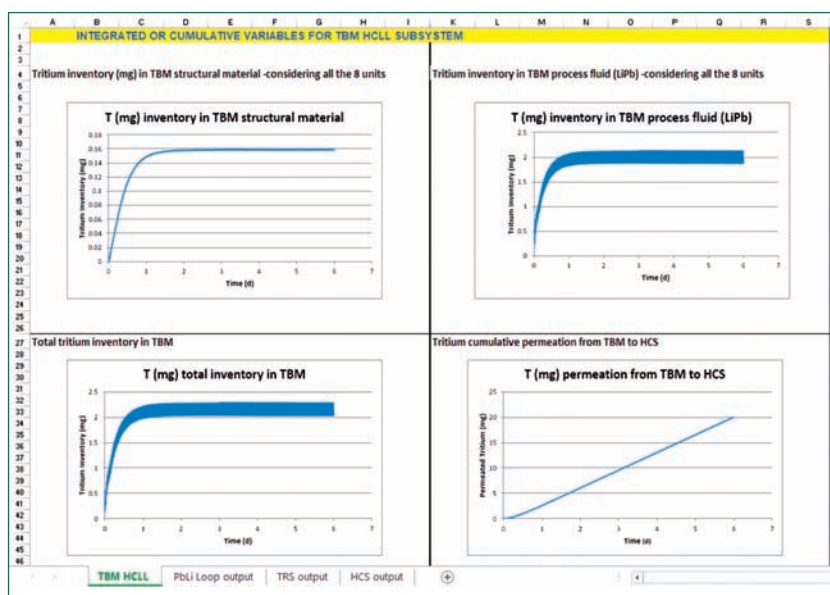


Figura 10. Pantalla Excel con algunos resultados de simulación de HCLL-TBS.

Se han desarrollado modelos de diversas partes del sistema de criogenia de ITER, entre los que se ha realizado un prototipo del *Front-End Cryogenic Distribution System* (FECDS) que incluye la coldbox auxiliar (ACB) de las bombas criogénicas, las líneas de distribución del refrigerante desde la ACB hasta las Cold Valve Box (CVB), una CVB con su control y una de las bombas criogénicas del toroide.

Las bombas criogénicas se usan en aplicaciones de alto vacío y consisten en una superficie interna (paneles criogénicos) enfriada a bajas temperaturas donde los gases y vapores se condensan. Estas bombas trabajan en un ciclo continuo de enfriamiento-bombeo-ca-

lentamiento moviéndose en un rango de temperaturas que van desde los 4.5K durante bombeo hasta los 470K alcanzados durante uno de los escenarios de regeneración (Figura 7).

El modelo ha permitido verificar la pérdida de carga, flujos máscos y dimensionamiento de válvulas del diseño preliminar del sistema, así como los tiempos para un ciclo de regeneración a 100K. En la Figura 8 se muestra la evolución del flujo de He suministrado por la CVB durante las distintas fases del ciclo de regeneración a 100K y las temperaturas en el primer y último panel criogénico de la bomba durante el ciclo, así como los tiempos para cada fase.

TRITIO EN PLANTAS DE FUSIÓN

EcosimPro cuenta con aplicaciones que permiten simular la generación, transporte y recuperación de tritio así como los fenómenos de transferencia en estos procesos, de gran importancia en el control del inventario de tritio, habiéndose desarrollado diversos modelos.

Los TBS (*Test Blanket Systems*) son los sistemas centrados en la generación de tritio y su extracción para introducirlo como combustible en la cámara de reacción. Se han desarrollado modelos de, los diseños europeos de TBS: HCLL (*Helium Cooled Lead Lithium*, Figura 9) y HCPB (*Helium Cooled Pebble Bed*), en colaboración con el Ciemat para F4E (*Fusion for Energy*).

La planta de tritio tiene como objetivo recuperar el tritio que abandona la cámara de reacción mediante diferentes sistemas de procesamiento de los gases de combustión. Se cuenta con componentes para este tipo de procesos, a través de los sistemas de extracción, destilación y adsorción final para su almacenamiento.

Hay una evolución continua de los modelos con las decisiones de diseño cambiantes en los proyectos de demostración de la tecnología de fusión. Las referencias para configuraciones y parámetros de entrada, se extraen de ITER y DEMO.

Los componentes de las librerías dedicadas a transporte de tritio se han sometido a varias fases de validación:

- Verificación inicial frente a la herramienta de referencia en simulación de transporte de tritio; TMAP (*Tritium Migration Analysis Program*), casos teóricos con solución analítica que se consideraron de interés, y validación frente a casos experimentales de los experimentos de Libretto 4 (*Liquid BREeder Experiment with Tritium Transport Option*)
- Con los componentes anteriormente desarrollados se crearon modelos más complejos de sistemas con aplicación real en la generación y extracción de tritio. Una de las tareas principales consistió en verificar las ecuaciones utilizadas y explicar los comportamientos obtenidos, con el apoyo de los expertos en transporte de tritio (F4E y Ciemat)

También se incluyó la creación de una interfaz Excel que da acceso a los datos de entrada principales y resultados de simulación para facilitar su uso (Figura 10). ■