

MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS EN ECOSIMPRO DEL FOCO FRÍO DE UNA CENTRAL NUCLEAR BASADO EN UN EMBALSE DE ENFRIAMIENTO

Ángel Argüello Tara, Eusebio Huéllamo Martínez, Alfonso Méndez –Vigo Vega de Seoane
Empresarios Agrupados, A.I.E.
Magallanes, 3 28015 Madrid
aat@empre.es

Resumen

El foco frío de cualquier Central de Producción de Energía Eléctrica es elemento primordial del ciclo termodinámico a partir del cual es posible el aprovechamiento de parte de la energía térmica producida en forma de energía eléctrica exportable. La capacidad evacuadora de calor de dicho foco frío repercute directamente sobre el rendimiento del ciclo y por consiguiente sobre el rendimiento energético de toda la instalación. Uno de los focos fríos más típicos en instalaciones grandes es el embalse de enfriamiento por circulación natural. En este trabajo se han aprovechado las capacidades de ECOSIMPRO para modelizar y analizar el foco frío de una Central Nuclear basado en un embalse de enfriamiento de grandes dimensiones.

Palabras Clave: Simulación, EcosimPro, Foco Frío, Embalse de Enfriamiento.

1 INTRODUCCIÓN

Elemento primordial de cualquier ciclo térmico de una Central de producción de energía eléctrica es el foco frío, gracias al cual es posible realizar el ciclo termodinámico que permite el aprovechamiento de una parte importante de la energía generada en un foco caliente (caldera, reactor nuclear, etc) convirtiéndola en energía mecánica (turbinas) y finalmente en energía eléctrica exportable (alternador). La misión principal de un foco frío debe ser el enfriar a su punto de mínima energía aprovechable, el medio de transporte energético del ciclo (típicamente agua). El punto de interacción entre el ciclo de la central y el foco frío suele ser el condensador principal. El foco frío, en cualquier situación operativa, debe garantizar una capacidad evacuadora de calor suficiente para asegurar unos rendimientos de acuerdo con el diseño de la instalación.

De entre los focos fríos típicos en las instalaciones de producción de energía eléctrica a gran escala se encuentran las torres de refrigeración (mecánicas o naturales), aerocondensadores y el aprovechamiento

de recursos naturales como pueden ser el mar, ríos caudalosos o grandes embalses naturales y artificiales.

En los emplazamientos donde se pueda asegurar un suministro constante de agua razonablemente fría es norma común refrigerar la central con dichos recursos de bajo coste económico. En el caso particular de las Centrales Nucleares de producción de energía eléctrica es también típico enfriar gracias a grandes masas de agua, bien de procedencia natural, bien almacenadas a propósito mediante embalses artificiales.

La modelización del comportamiento térmico del foco frío es fundamental para el diseño de la instalación. El análisis de un foco frío ya operativo permite acometer cambios operativos o modificaciones en determinados equipos con el objetivo de optimizar el rendimiento general de la instalación. Para el caso de un embalse usado como foco frío, la determinación de su comportamiento no es tarea fácil debido a las diferentes interacciones entre los elementos que intervienen: condensador, ambiente exterior, aportes y descargas de agua; todas ellas con una componente transitoria importante.

2 OBJETIVO

El objetivo del presente proyecto es la modelización de un foco frío ya operativo, en base a un embalse de enfriamiento de una Central de producción eléctrica de origen nuclear. La modelización incluirá también la respuesta del ciclo de la central ante el comportamiento del foco frío.

Una vez demostrada la validez de dicha modelización se analizarán posibles soluciones técnicas para mejorar la eficiencia del foco frío desde el punto de vista de rendimiento de la instalación.

3 LIBRERÍA DE COMPONENTES THERMAL-BALANCE

La librería de Componentes Thermal-Balance desarrollada en ECOSIMPRO permite la realización de modelos para análisis térmicos que incluyan componentes típicos representativos de equipos que normalmente forman parte de los ciclos de Centrales Térmicas, Nucleares y de Ciclos Combinados. Esta librería ha sido ampliamente utilizada en estudios encaminados a la mejora de rendimientos y predicción de comportamientos de ciclos térmicos de centrales de producción de energía.

La librería dispone de los siguientes componentes :

Componentes abstractos

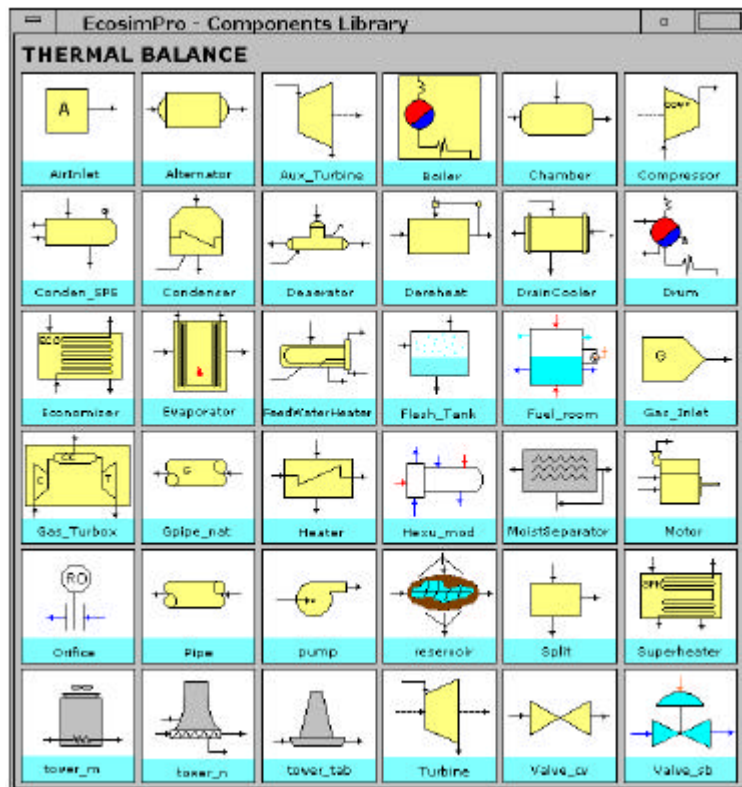
COMPONENTE	FUNCION
Channel	Componente con un puerto de entrada y otro de salida de tipo water
AdiabaticChannel	Channel con igualdad de entalpías entrada – salida
Burner	Componente de gas en el que se produce combustión

En la Figura 1 adjunta se muestra la representación gráfica de los componentes de esta librería. Esta librería utiliza dos tipos de puertos “water” y “gas” para fluidos de trabajo agua-vapor y gases, respectivamente.

Componentes Operativos

COMPONENTE	FUNCION
AirInlet	Suministro de aire
Alternator	Alternador eléctrico
Aux_turbine	Turbina auxiliar
Boiler	Caldera
Chamber	Cámara de combustión
Compressor	Compresor
Condens_SPE	Condensador tipo vapor de sellos
Condenser	Condensador principal
Deaerator	Desaireador
Dereheat	Desrecaentador
Divider	Divisor agua
DrainCooler	Enfriador de drenajes
Drum	Calderín
Economizer	Economizador
Evaporator	Evaporador
FeedWaterHeater	Calentador de agua de alimentación de ciclo
Flash_Tank	Tanque de vaporización instantánea
Fuel_room	Piscina de almacenamiento de combustible
Gas_inlet	Entrada de gas
Gas_Turbox	Turbina de Gas
Gpipe_nat	Tubería de gas
Heater	Intercambiador de calor (i)
Hexu_mod	Intercambiador de calor (ii)
Mixer	Mezclador
MoistSeparator	Separador de humedad
Motor	Motor de combustión interna
Orifice	Orificio de restricción
Pipe	Tubería
Pump	Bomba (I)
Pump_n	Bomba (II)
Reheater	Recalentador de vapor (con vapor)
Reservoir	Embalse para refrigeración
Split	Divisor gas
Superheater	Sobrecalentador
Tower_m	Torre de refrigeración de tiro mecánico
Tower_n	Torre de refrigeración de tiro natural
Tower_tab	Torre de refrigeración cuyo comportamiento está definido por tablas
Turbine	Escalón turbina de vapor
Valve	Válvula (I)
Valve_cv	Válvula (II)
Valve_sb	Válvula (III)

Figura 1



4 COMPONENTE EMBALSE

El componente embalse (“reservoir”) contiene el modelo físico-matemático que simula la interacción térmica de una gran masa de agua con el ambiente exterior y con otros componentes con los que puede estar ligado a través de puertas del tipo “agua”. La parte principal de este componente esta formada por las ecuaciones que modelizan el balance térmico existente en los intercambios térmicos agua-atmósfera, los cuales son resumidamente y principalmente los siguientes:

- Calor recibido por radiación solar: *hr*
- Calor recibido por radiación atmosférica de onda larga: *han*
- Calor intercambiado por convección y conducción: *hc*
- Calor intercambiado por radiación desde el agua:
hbr
- Calor intercambiado por evaporación de agua:
hbr

A continuación se muestra la programación de la parte del componente que modeliza los citados intercambios energéticos.

```
-----
CONTINUOUS
-- Determinacion de parametros ambientales
    TBH = t_b_humedo(Patm,HR,TBS,Ha,TD,EA,Ww)
    eammhg = EA * 750.0620188

-- Presion de saturacion del agua a la temperatura del
embalse
    EXPAND (k IN 1, nodos)
        es[k] = H2O_Psat_vs_T
(tembalse[k],IU())
    EXPAND (k IN 1, nodos)
        esmmhg[k] = es[k] * 750.062188

-- Evaporacion (funcion de viento corregida para 18 ft
segun -- NUREG 0693, se aplica coeficiente 0.91814 según
formula --- del HUTTE: Wx=Wy/(y/x)^(1/7))
    funcion_de_viento = a_viento + b_viento *
0.918**2*vel_viento * vel_viento
    EXPAND (k IN 1, nodos)
        he[k] = (esmmhg[k] - eammhg) * Area[k]
        * funcion_de_viento

-- Radiacion atmosferica de onda larga (1.2e-13 /3412.14
---- /24/.3048**2)
    EXPAND (k IN 1, nodos)
        han[k] = 1.5773e-17 * ((TBS*1.8 + 32)
+ 459.57)**6 * Area[k]

--- Radiacion reflejada
    EXPAND (k IN 1, nodos)
        hbr[k] = 4.026e-8 * (459.67 +
(tembalse[k] * 1.8 + 32.))**4 *
Area[k] / 3412.14/24/.3048**2

--- conveccion y conduccion
    EXPAND (k IN 1, nodos)
        hc[k] = 0.26 * 1.8 * Area[k] *
(tembalse[k] - TBS) *
funcion_de_viento

--- Caudal de agua evaporado
    EXPAND (k IN 1, nodos)
        w_evap[k] = he[k] / H2OLV_H (tembalse[k])

-- Radiacion solar
    EXPAND (k IN 1, nodos)
        hr[k] = rad_solar * Area[k]
```

Las grandes dimensiones de un embalse de enfriamiento invitan a poder simular su comportamiento en forma de diferentes “nodos” contiguos, en los cuales y dentro de cada uno de ellos la hipótesis de mezcla completa sea suficientemente aproximada a la realidad. Cada uno de los nodos se puede conectar con otros componentes que admitan puertos de “agua”, por lo que se puede aportar o retirar agua en diferentes puntos del embalse. Remarcar que es típico en este tipo de embalse la existencia de una barrera de separación térmica en la mitad de la superficie del agua, para obtener mayores tiempos de recorrido (el recorrido del agua se aumenta considerablemente) y así facilitar el intercambio de calor con la atmósfera.

5 DESARROLLO DEL MODELO DEL FOCO FRÍO

El modelo que va a simular el comportamiento de nuestro foco frío se va a componer de los siguientes elementos:

- El embalse de enfriamiento, con puertas de conexión en diferentes puntos.
- Componente simplificado que reproduce el comportamiento del ciclo de la central ante variaciones de la temperatura del foco frío, denominado “ciclo_condensador”.

El componente simplificado contiene un conjunto de curvas que reproducen la respuesta del ciclo ante diferentes temperaturas de entrada al condensador (la temperatura de entrada se relaciona con el vacío que es capaz de producir nuestro condensador y a partir de este se puede deducir la energía que es capaz de sacar la turbina de nuestra instalación).

El componente embalse se conecta con el componente “ciclo_condensador” a través de dos puntos (entrada-salida del condensador). A su vez el componente embalse tiene otras dos puertas donde se podrán fijar caudales de aporte (y su correspondiente temperatura) o retirada de agua a la temperatura existente ahí. También el componente embalse se verá afectado por las condiciones meteorológicas reinantes (temperatura seca del aire, humedad relativa, radiación solar, presión atmosférica y velocidad del viento), las cuales influirán en la capacidad final para evacuar el calor producido en la central.

En la Figura 2 adjunta se presenta el modelo gráfico de nuestro sistema:

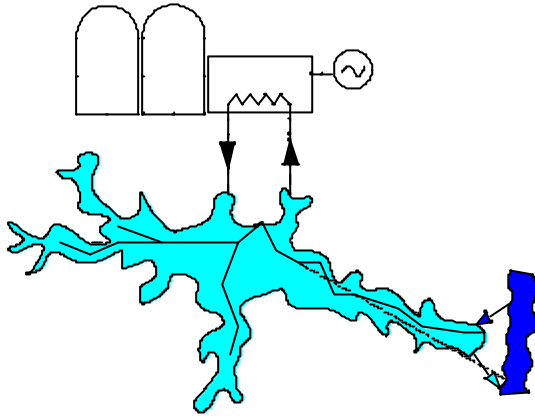


Figura 2

6 VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo construido en ECOSIMPRO se realizó frente a medidas reales. Se procedió a realizar una simulación del comportamiento del embalse para varios años históricos, de los cuales se disponía de la siguiente información:

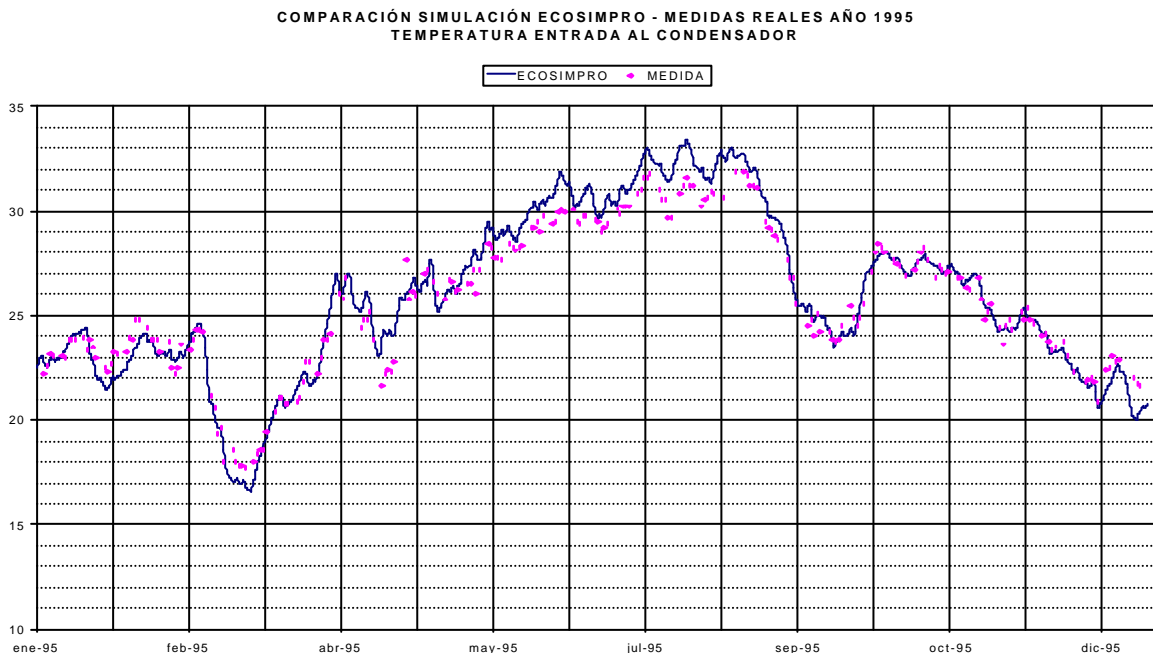
- Medias de parámetros meteorológicos con una frecuencia horaria.

- Medidas de régimen de funcionamiento de la Central.
- Medidas de aporte de agua al embalse y su temperatura
- Medidas de temperatura del agua del embalse en diferentes zonas del recorrido del agua

Como datos de partida para la simulación se tomaron los parámetros meteorológicos, el régimen de funcionamiento anual y los caudales de aporte con su temperatura. El resultado de temperaturas a lo largo del embalse se comparó con las medidas reales tomadas en el agua. La simulación se realizó para diferentes años donde se disponía de medidas registradas.

En la Figura 3 se muestra la evolución resultante de la temperatura del agua estimada por nuestro modelo en la entrada del condensador. También se muestran para su comparación las medidas registradas reales de esa misma zona. Se puede apreciar la acertada simulación durante la mayor parte del año, siendo algo conservador para los periodos más calurosos (verano). También se pueden apreciar claramente dos zonas de mínimos relativos de temperaturas, los cuales coinciden con dos recargas de combustibles ocurridas en ese año analizado.

Figura 3



7 ANÁLISIS DE OPTIMIZACIÓN DEL FOCO FRÍO

El modelo validado del foco frío de la central posibilita el análisis de nuevos modos operativos o

cambios de diseño con el objetivo de mejorar el rendimiento de la instalación. Gracias a la versatilidad y posibilidades de ampliación de los componentes de ECOSIMPRO es relativamente

sencillo realizar estudios para valorar cambios del diseño.

Los análisis que se realizaron se agruparon en dos partes:

- Análisis de modos operativos
- Análisis de cambios en el diseño del foco frío

7.1 Análisis de modos operativos

En este apartado se estudiaron posibles variantes en la forma de operar de la central con el objetivo de obtener unos mejores resultados en las temperaturas del foco frío. Se analizaron cambios en los caudales circulantes y en los caudales aportados al embalse desde el río.

7.2 Análisis de cambios en el diseño del foco frío

Este apartado fue el que más trabajo se llevó. Se analizaron diferentes modificaciones en el funcionamiento del foco frío, centrándose en la incorporación de nuevos equipos para evacuar una parte considerable de la carga térmica a disipar: torres de refrigeración de tiro natural y tiro mecánico.

A título de ejemplo se muestra en la Figura 4 la representación gráfica de una de las configuraciones estudiadas: incorporación de una torre de tiro natural entre la salida del condensador y la reentrada al embalse.

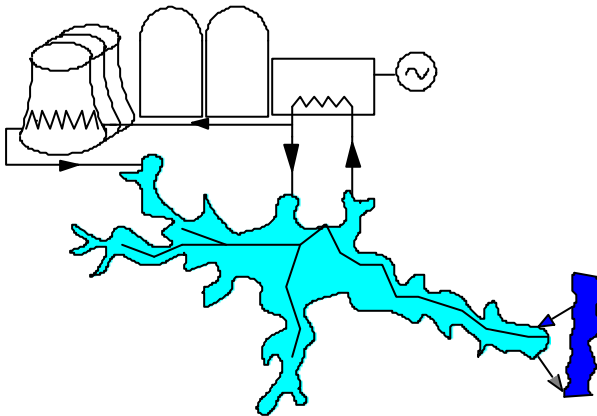
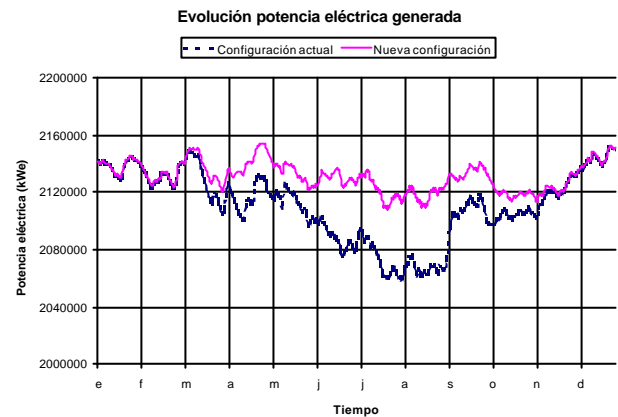
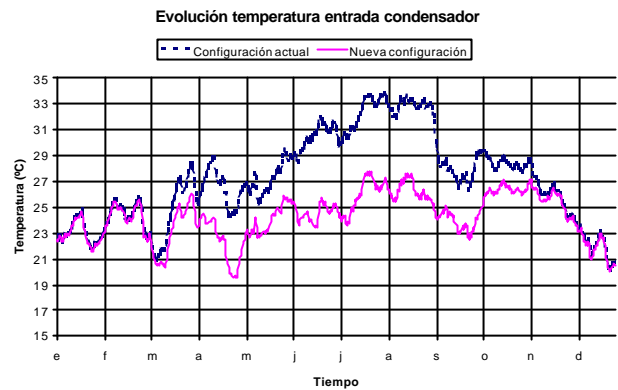


Figura 4

Para la construcción de este modelo se hizo uso de uno de los componentes incluidos en la librería Thermal-Balance, la torre de tiro natural ("tower_n"). Con el histórico de datos meteorológicos disponible y una previsión del régimen de funcionamiento de la central, se procedió a simular el funcionamiento de la nueva configuración. Posteriormente se realizó un

análisis técnico-económico sobre la idoneidad de este tipo de mejoras.

En las Figuras 5 y 6 se presenta a título de ejemplo la comparación del resultado de la simulación en cuanto temperatura del agua a la entrada del condensador y la producción de energía eléctrica, operando en la situación actual y las correspondientes a la nueva configuración propuesta. Se puede apreciar claramente la reducción de temperatura a la entrada del condensador en una gran parte del año con la nueva configuración y por consiguiente el aumento de energía eléctrica generada.



Figuras 5 y 6

8 CONCLUSIONES

Se ha modelizado acertadamente un foco frío basado en un embalse de enfriamiento con circulación natural de una central de producción eléctrica de origen Nuclear. Los componentes empleados provenientes de la librería Thermal-Balance de ECOSIMPRO han demostrado su acertada modelización de fenómenos físicos de balance energético entre el agua y la atmósfera.

El modelo construido permitirá analizar cambios en la configuración actual de la instalación para optimizar el rendimiento energético.

Agradecimientos

A D. Claudio Toledano Cámara y Emilio Casado Flores, por su ayuda e interés en este trabajo.

Referencias

- [1] R. B. Codell and W. K. Nuttle, "Analysis of Ultimate Heat Sink Cooling Ponds" USNRC Report NUREG-0693, November 1980.
- [2] P. J. Ryan and D. R. Harlem, " An analytical and Experimental Study of transiente Cooling Ponds Behavior" report No 161. Massachusetts Institute of technology, January 1973.
- [3] W.O. Wunderlich, "Heat and Mass transfer between a water surface and the atmosphere", Report No 14. TVA Engineering Laboratory, Tennessee, 1972
- [4] Eusebio Huélamo, Ramón Pérez Vara y Alfonso Méndez-Vigo, "Estudios de balance térmico y optimización operacional con ECOSIMPRO". Ponencia C13 1ª Reunión de Usuarios de ECOSIMPRO, Madrid 2001.