

# ANALISIS DE DESCARGAS TERMICAS EN UN EMBALSE

Por: José María Fluxa Ceva (\*), Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P.  
Jesús Incinillas Martínez (\*), Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P. y Economista.  
José Luis Ballesteros Moreno, Licenciado en Ciencias Físicas.

## I. INTRODUCCION

En muchos países donde existen grandes extensiones de agua continental (lagos naturales), ésta se ha utilizado como un eficiente sistema de refrigeración de vertidos de aguas de circulación de centrales térmicas. En principio, si el agua procedente de la refrigeración del circuito agua-vapor de la central se descarga a un entorno de agua natural, ésta deberá experimentar un mayor o menor aumento de temperatura. Sin embargo, el exceso de calor introducido en el sistema natural se puede eliminar, posteriormente, de tres formas:

- Directamente a la atmósfera por radiación.
- A la atmósfera en forma de vapor de agua, por evaporación de la misma.
- Absorción por parte de la atmósfera, por conducción y convección.

Estos procesos se dan de forma natural y continua en todas las masas de agua. La descarga de calor procedente de la refrigeración de centrales aumenta la carga de disipación natural de calor y puede dar lugar a contaminación térmica. Esto ocurre especialmente en aquellos casos en que la relación entre la cantidad de vertido y el área del embalse, además de la influencia meteorológica, no esté bien dimensionada.

La capacidad refrigerante de un embalse es mayor cuanto mayor sea su área, dependiendo de las condiciones meteorológicas de su entorno y de la cantidad de calor descargada por el influente de la central.

El aumento de temperatura provocado por la descarga del agua de circulación, en circuito abierto, de las centrales térmicas produce un cierto impacto en el medio acuático sobre el que se vierten dichas aguas. Este impacto se produce por causa del vertido térmico, tanto en el medio ambiente marítimo como en embalses y ríos. Es en éstos últimos, por lo general, donde es más patente la incidencia medioambiental.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Entre las cuestiones que se suscitan en el diseño de un embalse para refrigeración de una central térmica destacan las siguientes:

— Dados unos valores del caudal de refrigeración y de incremento de temperatura en el condensador ¿cuánta es la superficie necesaria para disipar el incremento de calor para una elevación límite de la temperatura superficial por encima de la natural?

— ¿Son suficientes las distintas aportaciones de agua (precipitaciones, escorrentías, etc.) para mantener un determinado nivel en el embalse a pesar de las pérdidas de agua debidas a la evaporación desde la superficie como consecuencia de la descarga térmica?

— Para unos valores dados de la carga térmica e incremento de temperatura en el condensador ¿cuál es la temperatura que puede ser esperada en la toma en las condiciones más desfavorables?

La temperatura de una masa de agua tiene importancia desde un punto de vista de calidad de agua por tres razones: los vertidos térmicos pueden afectar positiva o negativamente al ecosistema acuático, influye en las reacciones químicas y biológicas y las variaciones en la temperatura afectan a la densidad del agua y por lo tanto a su transporte.

La temperatura afecta físicamente a la densidad, viscosidad, presión de vapor, tensión superficial, solubilidad del oxígeno y difusión del oxígeno.

La solubilidad del oxígeno es el más importante de los parámetros puesto que el oxígeno disuelto en el agua es necesario para sostener muchas formas de vida acuática. Si esta solubilidad es baja, y se combina con vertidos orgánicos y un crecimiento de la respiración bacteriana, podría conducir a tan bajos niveles de oxígeno que pudiera ser letal para los peces.

La temperatura no sólo afecta al coeficiente de reacción químico, sino que extiende la zona donde las posibles reacciones pueden tener lugar.

**Importancia de las grandes extensiones de agua continental como eficaz sistema de refrigeración de vertidos.**

(\*) Bajo la dirección del 1.º firmante de este artículo, el segundo ha elaborado una tesis doctoral que fue leída el 18 de noviembre de 1991 en la E.T.S.I.C.C. y P. de Madrid obteniendo la calificación de apto cum laude por unanimidad.

**Con el objetivo de paliar los efectos negativos que puedan producir los vertidos térmicos, diversos países han elaborado legislaciones restrictivas sobre la temperatura y su incremento fuera de una denominada «zona de mezcla».**

Biológicamente, la contaminación, sea cual fuera su naturaleza, establece unas condiciones extremas sobre el medio ambiente, de forma que el espectro de tolerancia de las especies componentes de la biocenosis (animales y plantas) queda reducido a las especies tolerantes al agente contaminante. En la oxidación biológica tiene una gran importancia la temperatura.

En experiencias de laboratorio se han determinado para diversas especies de peces las denominadas «temperaturas letales», así como las «zonas de resistencia» en las que el organismo puede vivir por un período limitado.

La reproducción y el desarrollo del pez son las fases más vulnerables para variaciones de temperatura, pero hay temperaturas que, sin ser dañinas inmediatamente, pueden favorecer parásitos, a los competidores, etc.

En el ciclo de refrigeración es preciso considerar dos impactos ecológicos: la retención y el efecto de paso. El primero se refiere a la retención de organismos de gran tamaño en la rejilla de protección situada a la entrada del agua en el sistema de refrigeración. El segundo, son los efectos sufridos por los organismos de pequeño tamaño existentes en el agua de refrigeración al pasar a través del condensador y ser afectados por la zona de mezcla.

Con el objetivo de paliar los efectos negativos que puedan producir los vertidos térmicos, diversos países han elaborado legislaciones restrictivas sobre la temperatura y el incremento de temperatura fuera de una denominada «zona de mezcla».

En USA ya en el año 1968 se creó el Comité Auditor Técnico Nacional para la publicación de los criterios recomendados sobre la calidad de aguas. Este Comité concluyó que, debido a la gran cantidad de variables implicadas en dicha calidad, no se podían aplicar los mismos límites de incrementos de temperatura para todo el país, ni siquiera para un mismo Estado.

Como guía general, el Comité distinguió cinco casos generales del uso de agua y, en base a ellos, estableció los estándares siguientes: la cantidad de calor no se debe verter por igual en todos los meses del año, de forma que el aumento de temperatura nunca sea mayor de 5 °F en ríos con pesca de agua caliente y de 3 °F para el resto de los ríos y embalses.

En muchos Estados se establece un máximo de temperatura total de 68 °F (20 °C) y de 0 a 5 °F como máximo incremento para lugares de pesca de agua fría. Para zonas de agua caliente, el intervalo de temperaturas máximas permitidas oscila entre 83 y 93 °F (28 a 40 °C). En general, al aumento máximo de temperatura del cauce que se permite por encima de la temperatura ambiente del agua está ente 2 y 3 °C después de la zona de mezcla. La aplicación de este límite exige definir perfectamente qué zona del embalse o río se considera dentro del área de mezcla y cuál fuera de ésta, con objeto de poder comprobar la citada regulación. En este caso, la zona de mezcla se define en base al porcentaje del área total del lago o embalse y a la sección y caudal de un río y está determinada de forma muy específica sólo en algunos Estados.

**TABLA I**  
**Regulación europea de vertidos térmicos**

País	Temperatura máxima (G.C.)		Incremento máximo (G.C.)	
	Salida condensador	Después de mezcla	Salida condensador	Después de mezcla
Austria	30			3
Bélgica	30			4 (T. Fondo)
Dinamarca	30 (ríos) 35 (mar)			
Francia	30			3-5 (T. Natural)
Italia	30 (lagos) 35 (mar)			3 (T. Fondo)
Holanda	30		7-15	
R. Unido	No hay regulaciones nacionales			
Suecia	Cada caso es tratado separadamente			
Suiza	30	25 (ríos)		3 (T. Natural)

En algunas legislaciones de los estados americanos los criterios de descarga de calor se han expresado, de forma similar, en los siguientes términos: «La temperatura de las aguas no podrá aumentarse artificialmente en cuantías que puedan perjudicar la salud pública y/o la vida animal y acuática, o que evite el empleo del agua para usos domésticos, industriales o recreativos, o que estimule la producción de plantas o animales acuático hasta el punto de interferir con estos usos». Dentro de esta declaración existen consideraciones físicas, sanitarias, biológicas y estéticas como métodos para clasificar el problema de la contaminación térmica.

En la tabla I se hace un breve resumen de las diversas regulaciones existentes en los países europeos en materia de vertidos térmicos.

En las directivas de la Comunidad Europea no hay límites específicos para las descargas de vertidos, pero sí límites de incrementos y máximos de temperaturas de aguas receptoras. Estas directivas han sido adoptadas en España mediante el decreto 927/1988 de 29 de julio.

La legislación española en medio ambiente parte de la Constitución y se materializa a los efectos de los vertidos en la Ley de Aguas y sus reglamentos.

En la Ley de Aguas y, para el caso de lagos o embalses no hay límite de incremento de temperatura, sino que se impone un máximo de tempe-

ratura del vertido de 30 °C. En ríos, el incremento de temperatura media de una sección fluvial tras la zona de dispersión no superará los 3 °C.

En el 2.º reglamento de la Ley de Aguas se incluyen las cuatro directivas de la CE. En la correspondiente a «vida de los peces», estos son catalogados en tipo S y tipo C (salmónidos y ciprínidos). La temperatura media aguas abajo de un vertido térmico (en el límite de la zona de mezcla) no deberá superar la temperatura natural en más de 1,5 °C para el tipo S y 3 °C para el tipo C. Las temperaturas aguas abajo de un vertido (fuera del límite de la zona de mezcla) no superarán los valores de 21,5 y 10 °C para el tipo S y 28 y 10 °C para el tipo C (el valor de 10 °C es en períodos de reproducción). (Ver tabla II).

En los planes hidrológicos se establecerán, para las diversas zonas niveles de calidad que no podrán ser menos estrictos que los del reglamento.

En la tramitación de las concesiones será preceptiva la presentación de una evaluación de los efectos. En el caso de centrales cuya potencia térmica nominal sea mayor que 300 MWt es preciso realizar una evaluación de impacto ambiental.

Además en el BOE han ido apareciendo resoluciones sobre centrales térmicas específicas en las que se imponen condiciones a los límites de descarga en circuito abierto.

Como consecuencia del vertido térmico de la central es preceptivo el pago de un canon de vertido que depende de la naturaleza del mismo y de su grado de tratamiento.

### III. MODELO FISICO-MATEMATICO SELECCIONADO

La verificabilidad de las regulaciones es sencilla cuando se imponen límites máximos de temperatura. Es más complejo cuando las limitaciones se refieren a máximos incrementos de temperatura, siempre que fuera de la llamada zona de mezcla. Esta zona de mezcla puede delimitarse

**TABLA II**  
Límites de la Ley de Aguas y sus reglamentos

#### ■ Ley

- Ríos:  $\Delta$  3° C tras la zona de dispersión
- Embalses: vertido 30° C

#### ■ Reglamentos (directivas de peces)

En el límite de la zona de mezcla:

- $\Delta$  1,5° para peces tipo S
  - 3° para peces tipo C
  - Temperatura 21,5 y 10° para peces tipo S
  - 28° y 10° para peces tipo C (10° en período de reproducción de especies que necesitan agua fría para ello)
- (Los límites de temperatura podrán ser superados durante el 2 por 100 del tiempo).

matemáticamente con un modelo calibrado a las condiciones específicas de cada embalse y meteorológicas.

Existen numerosas publicaciones y artículos que tratan la modelización matemática de la distribución de temperatura del agua como consecuencia de un vertido térmico. Estos modelos se basan en estudios empíricos en aguas continentales (lagos artificiales y naturales, embalses y ríos) y aguas marítimas (estuarios y mar abierto).

El tratamiento para el caso de aguas dulces o para el caso de aguas marítimas es muy distinto en cada uno, pues aunque muchos de los parámetros que intervienen en la formulación de los modelos son los mismos, el caso de aguas marítimas es mucho más complejo al entrar, además, como factores determinantes de la dispersión de calor, los conceptos de densidad y capacidad calorífica (mucho más variables en aguas marinas que dulces), salinidad, viscosidad, números de Froude y Reynolds (determinado el primero de ellos por la densidad del agua en capas más superficiales y más profundas, velocidad del flujo del agua y aceleración de la gravedad, y el segundo por la viscosidad, densidad y velocidad de flujo en condiciones de equilibrio), etc.

Para el tratamiento de lagos, embalses y ríos, existen una gran diversidad de modelos matemáticos cuyas diferencias residen no en la base científica sobre la que se desarrollan sino en el tratamiento en el espacio tri, bi o unidimensional y, dentro de éstos, la complejidad es mayor o menor en función del número de consideraciones físicas que se tengan en cuenta a la hora de su formulación.

El modelo matemático utilizado en este estudio se desarrolló en los Estados Unidos por la Universidad Johns Hopkins en 1965, basado en modelos simples ya utilizados en los años 50, y que se fue perfeccionando y aplicando con datos experimentales en diversos embalses de refrigeración desde su desarrollo hasta fechas muy recientes, mediante proyectos que se han ido publicando a lo largo de estos años por la Universidad J. Hopkins para el Edison Electric Institute con el título de «Cooling Water Studies».

A partir de los años 80 existen diversos estudios americanos y europeos que, basados en las mismas premisas matemáticas utilizadas para el tratamiento unidimensional de los incrementos de temperatura debidos a efluentes térmicos, han desarrollado el modelo bidimensional simétrico radial de la dispersión del penacho térmico. Un modelo de este tipo permite determinar el tamaño y la forma de dicho penacho. Se pueden definir cuáles son las zonas del embalse más afectadas y delimitar la llamada «zona de mezcla» o zona donde las temperaturas son más elevadas. Con ello se establece el incremento «real» de temperatura ocasionado por el vertido en el resto del embalse y se comprueba el cumplimiento legal de los límites impuestos cuando se establecen en base a incrementos según las diversas regulaciones detalladas en el apartado anterior.

En el caso español se restringe la temperatura de vertido a 30 °C en lagos o embalses y existen límites tanto de temperatura como de incremen-

En las directivas de la Comunidad Europea no hay límites específicos para las descargas de vertidos, pero sí límites de incrementos y máximos de temperaturas de aguas receptoras. Estas directivas han sido adoptadas en España mediante el decreto 927/1988 del 29 de julio.

**La capacidad de un lago para disipar calor adicional a través de una «superficie de refrigeración» puede expresarse como el producto del coeficiente de intercambio de calor, el área superficial disponible para intercambiar calor con el aire, y la diferencia entre la temperatura media superficial real del embalse, y su temperatura ambiental de equilibrio.**

to de temperatura aguas abajo de un vertido térmico (más allá de la zona de mezcla).

Ha de entenderse, además, que estos incrementos tienen que ser producidos exclusivamente por la influencia del vertido térmico y, por tanto, perfectamente diferenciados de la influencia de la meteorología exterior, ya que la insolación es en parte responsable del calentamiento superficial de un embalse.

Por todas estas consideraciones, la aplicación del modelo inidimensional para el caso de embalses es correcto en nuestro país desde el punto de vista de la comprobación de las regulaciones y planificación de necesidades de superficie de refrigeración.

El volumen de datos que se necesita para un modelo y el tiempo necesario para recopilarlos es muy variable en cada caso concreto. En general, el estudio de un vertido térmico requiere un volumen suficiente de datos, referido como mínimo a un período de un año, que dé información acerca de las temperaturas del aire y del agua, presión atmosférica, humedad relativa, caudales, etc. Estos datos a veces se pueden obtener de tablas de aforos y boletines meteorológicos.

Para establecer el balance de calor de un cuerpo de agua cualquiera, que será el que determine la temperatura resultante en dicho cuerpo, hay que definir, en primer lugar, las diversas fuentes y sumideros de calor. Aquí se considerarán todas las fuentes y sumideros que corresponden a los procesos naturales que aportan y disipan calor en un embalse, además de la fuente de calor adicional que supone el vertido térmico en el embalse procedente del agua de refrigeración de una central térmica.

En un embalse de refrigeración en circuito cerrado, sin aportaciones, la cantidad neta de calor almacenado vendrá dado por la siguiente expresión:

$$H_{st} = H_{rj} + (H_s - H_{sr}) + (H_a - H_{ar}) - H_{br} - H_e - H_c \quad (1)$$

donde  $H_{st}$  es el calor almacenado.

$H_{rj}$  es el calor procedente del vertido térmico.

$H_s - H_{sr}$  es la radiación solar neta.

$H_a - H_{ar}$  es la radiación atmosférica neta.

$H_{br}$  es la radiación solar emitida por la masa de agua (o radiación del cuerpo negro).

$H_e$  es la evaporación.

$H_c$  es la diferencia de conducción de calor desde la atmósfera al agua y viceversa.

Esta ecuación es expresada para un tiempo y superficies dados.

Dada la necesaria limitación en la extensión de este artículo, se señala que todos los términos de la derecha de la ecuación 1 pueden ser valorados a partir de parámetros meteorológicos observables experimentalmente (insolación, inclinación solar, temperatura del aire, presión de vapor de aire, temperatura superficial, velocidad de viento y presión de vapor de saturación), y del vertido térmico, por lo que puede ser calculado el calor almacenado.

Se demuestra que la capacidad de un lago para disipar calor adicional a través de una «superficie de refrigeración» puede expresarse como el producto del coeficiente de intercambio de calor,  $K$ , el área superficial disponible para intercambiar calor con el aire,  $A$ , y la diferencia entre la temperatura media superficial real del embalse,  $T_s$ , y su temperatura ambiental de equilibrio.

$$E: \text{Calor disipado, } H = KA (T_s - E) \quad (2)$$

Se define la temperatura de equilibrio  $E$ , como la temperatura de la superficie del agua a la cual, en ausencia de calor emitido por la central, no se produciría almacenamiento de calor.

$$E = T_s \text{ cuando } H_{st} = 0 \text{ y } H_{rj} = 0 \quad (3)$$

Esta temperatura se puede evaluar en términos de parámetros meteorológicos, pero no puede medirse experimentalmente de forma directa.

Asimismo, el «coeficiente de intercambio de calor»  $K$ , cuyo valor se obtiene de datos meteorológicos experimentales, es un parámetro empírico que determina la capacidad de transferencia de calor agua-atmósfera y es específico de cada emplazamiento y diferente según cambien las condiciones meteorológicas. Para aplicar la ecuación se utilizan valores promedio tanto de  $K$  como de  $E$ .

Los valores  $T_s$ ,  $E$ ,  $K$  se pueden calcular de acuerdo a las siguientes formulas:

$$T_s = E + H_{rj}/K \quad (4)$$

$$T = (T_s + T_d)/2 \quad (5)$$

$$\beta = 0,255 - 0,0085 T + 0,000204 T^2 \quad (6)$$

$$f(u) = 70 + 0,7 U^2 \quad (7)$$

$$K = 15,7 + (\beta + 0,26) f(u) \quad (8)$$

$$E = T_d + H_s/K \quad (9)$$

La única información meteorológica que es necesaria para aplicar esta secuencia de ecuaciones son los siguientes datos:

$H_s$ : radiación solar bruta.

$T_d$ : temperatura del punto de rocío.

$U$ : velocidad de viento.

$H_{rj}$ : calor vertido por la central.

El valor de la temperatura superficial, en principio desconocida, es necesario para aplicar la ecuación 4 que es la primera del bucle. Se introduce, para ello, un valor cualquiera, obteniéndose los valores de  $T$ ,  $\beta$ ,  $f(u)$ ,  $K$  y  $E$ . Con este último se

calcula un nuevo valor  $T_s$  con el que se puede obtener nuevamente el resto de los valores.

El valor optimizado de  $T_s$  se consigue cuando entre dos iteraciones, este no varía prácticamente y con él se obtiene los valores optimizados del resto de los parámetros (el primer valor de  $T_s$  no necesariamente debe acercarse al valor optimizado, pues este se consigue con un mayor o menor número de iteraciones).

Se ha justificado la consideración unidimensional del embalse en base a la sencillez de manejo de los datos y cálculos en el modelo, ya que se trata de obtener un único incremento de temperatura final, fuera de la denominada zona de mezcla, en el embalse debido al vertido de la central.

Por estas razones el modelo matemático desarrollado analiza gradientes longitudinales de temperatura. La dirección vendrá determinada por el punto de descarga de la central y el de descarga del embalse al cauce receptor y con ello se están efectuando las siguientes hipótesis:

- El embalse es estrecho y poco profundo.
- La dirección del viento dominante coincide con la dirección longitudinal del embalse.
- El embalse es de capacidad retenida constante.
- La distribución del vertido térmico por la superficie es uniforme.

El cambio de temperatura en función del tiempo en un punto del eje longitudinal del embalse, eje  $x$ , en que los gradientes transversales se consideran despreciables, puede expresarse como la suma de los términos: velocidad de flujo influyente, difusividad del flujo en el agua (término de mezcla) e intercambio de calor a través de la atmósfera:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -v \frac{\partial T}{\partial x} + D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{K(T-E)}{\rho C_p h} \quad (10)$$

donde:

$T$  = temperatura del agua.

$t$  = tiempo.

$v$  = velocidad.

$D$  = coeficiente de difusividad turbulenta longitudinal.

$K$  = coeficiente de intercambio de calor con la atmósfera a través de la superficie.

$E$  = temperatura superficial de equilibrio.

$\rho$  = densidad del agua.

$C_p$  = calor específico del agua.

$h$  = profundidad de la capa de agua.

La forma de expresar esta fórmula en términos de incremento de temperatura, es decir, de diferencia entre la temperatura real del agua  $T$ , y la temperatura de equilibrio,  $E$ , dada por  $\theta = T - E$ , es la siguiente:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -v \frac{\partial \theta}{\partial x} + D \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{k\theta}{\rho C_p h} \quad (11)$$

Bajo condiciones de estado estables, la ecuación anterior se expresa:

$$0 = -v \frac{d\theta}{dx} + D \frac{d^2\theta}{dx^2} - \frac{K\theta}{\rho C_p h} \quad (12)$$

El coeficiente de difusividad,  $D$ , sólo puede conocerse empíricamente. Su influencia a través del segundo término del lado derecho de la ecuación puede ser analizado estudiando los dos casos extremos:

— Mezcla longitudinal cero: no existe difusividad. La temperatura en el punto de descarga es máxima y decae exponencialmente con la distancia a éste ( $D = 0$ ).

— Mezcla longitudinal infinita: con difusividad infinita. En este caso la temperatura es idéntica en el punto de descarga y en el punto más alejado de aquel ( $D = \infty$ ).

En la figura 1 se muestra la curva exponencial de incremento de temperatura  $\theta$ , función del incremento longitudinal del área de la superficie. El calor total disipado,  $H_{sc} = H_{rj}$  se representa por el área que hay debajo de la curva, designado  $H_0$ , ya que el coeficiente de intercambio de calor es un factor constante.

La línea horizontal de esta figura representa la temperatura constante del embalse con mezcla total. El calor disipado está representado por el área de debajo de la línea  $H_{\infty}$ .

Para comparar estos dos casos extremos, y en orden a simplificar, se ha dispuesto que la elevación de la temperatura del condensador  $T_c$  es la misma en los dos casos. Esta hipótesis ignora el

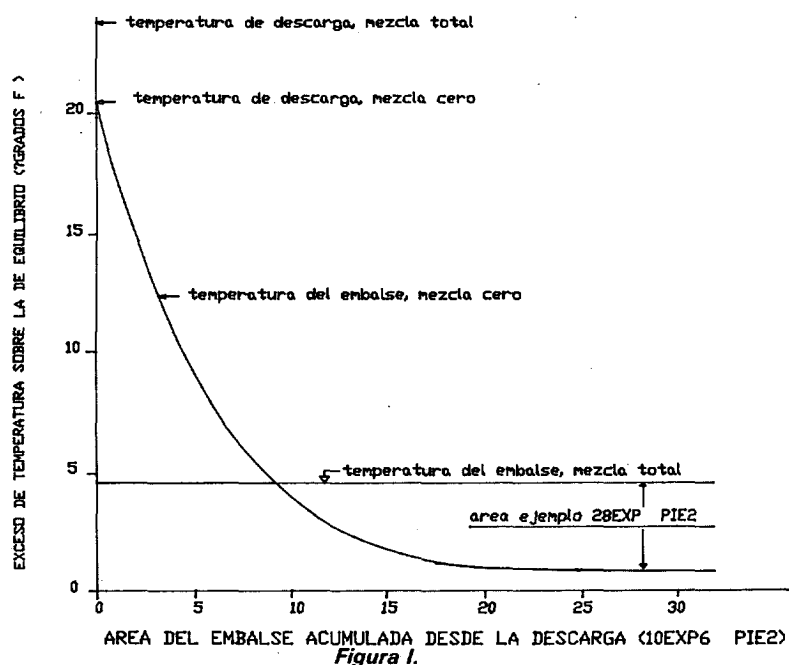


Figura 1.

**TABLA III**  
**Expresiones teóricas de temperaturas**

Concepto	Mezcla Total	Sin mezcla
Caudal de refrigeración	$Q$	$Q$
Elevación temperatura condensador	$T_c$	$T_c$
Calor descargado	$T_c Q_p C_p$	$T_c Q_p C_p$
Área superficial	$A$	$A$
Coefficiente de intercambio de calor	$K$	$K$
* Incremento de temperatura en la toma	$T_e Q' / Q' = Q_p C_p / KA$	$T_e X / (1-X), X = \exp(-1/Q')$
* Incremento de temperatura en la descarga	$T_e (Q' + 1)$	$T_e / (1-X)$
* Incremento de temperatura medio superficial	$T_e Q'$	$T_e Q' = (1/A) \int_0^A \theta da$
Calor disipado	$T_e Q' KA = H_\infty$	$T_e Q' KA = H_0$

\*  $\theta$  = exceso sobre la temperatura de equilibrio  
 $\rho$  = densidad  
 $C_p$  = calor específico

Se realizaron  
campañas de medida  
en los embalses de  
Villalba y  
Puentenuevo.

hecho de que la eficiencia térmica del condensador se reduciría en el caso de mezcla total debido a que la temperatura de toma sería más alta, lo que redundaría en un calor emitido al embalse mayor.

El caso de mezcla cero requiere menor superficie que el caso de mezcla total para producir la equivalente refrigeración bajo las mismas condiciones debido a la mayor diferencia inicial de temperaturas.

En la tabla III se resumen comparativamente las expresiones numéricas que se obtienen en el caso de sin mezcla y con mezcla.

Los parámetros  $T_s$ ,  $E$  y  $K$  de las fórmulas se calculan según se ha detallado,  $T_c$  es un dato del que habitualmente se dispone en el cuarto de control de la central, normalmente en continuo.

El resto de los parámetros de las fórmulas señaladas son variables calculadas anteriormente. La densidad y la capacidad calorífica, aunque varían ligeramente con la temperatura del agua, se suponen constantes dado que sus oscilaciones no contribuyen significativamente en los valores que se obtienen de las temperaturas.  $Q$  es el caudal del agua de refrigeración que también se mide en continuo.

#### IV. CAMPAÑAS DE MEDIDA

Para poder validar el modelo matemático a las diferentes posibles situaciones existentes en España se decidió efectuar las campañas de medida en dos embalses con características, tanto meteorológicas como dimensionales, diferentes.

El embalse de Villalba (Palencia) es de poca extensión superficial (230.500 m<sup>2</sup>), profundidad máxima pequeña (14 m) y sirve de refrigeración a una central de pequeña potencia (148 MW).

El embalse de Puente nuevo (Córdoba) es mucho más amplio superficialmente (hasta un máximo de 2050 Ha), la profundidad máxima puede llegar hasta 44 m y sirve de refrigeración a una central térmica de tamaño medio (313 MW).

En Villalba se hicieron las siguientes campañas:

– Junio 87 precampaña manual para poder diseñar las siguientes campañas de forma racional.

– Abril 88 campaña automatizada, con la central térmica parada para comprobar las sondas automáticas y en el que se comprobó la influencia de los parámetros meteorológicos.

– Diciembre 88 campaña automatizada con la central funcionando.

En Puente nuevo se hicieron las siguientes campañas:

– Agosto 88 en el que se comprobó que el área de refrigeración necesaria es de 792.000 m<sup>2</sup> y que el embalse estaba estratificado térmicamente.

– Octubre 88 en el que hubo que hacer una recalibración de las sondas debido a la humedad recibida por el equipo receptor.

#### V. CALIBRADO Y UTILIZACION DEL MODELO

A diferencia del modelo original, se ha obtenido un modelo de trabajo en «tiempo real» (en concreto es suficiente con valores horarios dada la inercia térmica de la masa de agua) y de predicción de situaciones futuras.

Las transformaciones realizadas han sido el utilizar valores horarios tanto de la radiación solar bruta, como del calor emitido por la central, sustituyendo la temperatura superficial a medio plazo por la realmente medida en una zona del embalse no afectada por el vertido térmico.

Al trabajar en condiciones horarias la superficie de mezcla puede ir variando. Por ello se ha transformado el modelo calculándose las variables correspondientes a la difusión y transporte de calor así como de intercambios con la atmósfera para todas las áreas posibles desde el vertido inicial en el embalse hasta más allá del área predefinida por el usuario.

La curva correspondiente a la solución de contorno de «sin mezcla» es exponencial y de forma muy similar a la del modelo original. En el modelo original la exponencial era función del área fijada mientras que en el modelo transformado es función del área variable y del resto de los coeficientes, que a su vez son también función del área.

La curva correspondiente a la solución de contorno de «mezcla total» en el modelo original era una recta horizontal. En el modelo transformado es exponencial. Dicha curva es el resultado de la intersección de las infinitas soluciones lineales con sus correspondientes áreas, variando éstas desde el área cero hasta más allá de la predefinida por el usuario como área final o de cálculo.

En el modelo original, tanto la toma como el vertido se realizan superficialmente. En el modelo transformado se ha tenido en cuenta la posibilidad de que la toma esté en profundidad, como en Puente nuevo, tratándose como dos focos que trabajan simultáneamente: vertido y embalse.

En el modelo original no se tienen en cuenta otras aportaciones debido a que no existían en los embalses refrigerantes. En el transformado no es preciso tenerlo en cuenta al utilizar valores horarios.

Dado que entre los dos embalses existen diferencias en cuanto a las condiciones de toma se

## Modelo de vertido térmico en embalse

### Datos de entrada

Fecha (DD/MM/AAAA):	21/12/1988
Hora (HH):	15
Velocidad de viento (m/s):	3.40
Radiación solar (mW/cm <sup>2</sup> ):	39.00
Incremento de temperatura en condensador (°C):	9.27
Caudal de agua de refrigeración (m <sup>3</sup> /s):	3.78
Temperatura de rocío (°C):	10.20
Temperatura de salida del condensador (°C):	27.27
Superficie del embalse considerada (m <sup>2</sup> ):	230500

### Datos de salida

Temperatura superficial (°C):	12.33
Temperatura de equilibrio (°C):	11.01
Constante de intercambio (Btu/ft <sup>2</sup> ·día·°F)	85.10
Función velocidad (Btu/ft <sup>2</sup> ·día·mmHg)	110.49
β (mmHg/°F)	0.37
Temperatura de iteración (°F)	52.27
Aporte Calorífico (Btu/ft <sup>2</sup> ·día)	201.99
Coeficiente adimensional R	7.03
Incremento de temperatura con mezcla (°C)	1.15
Incremento de temperatura sin mezcla (°C)	0.01
Temperatura con mezcla (°C)	19.15
Temperatura sin mezcla (°C)	18.01

Figura III

ha elaborado, para cada uno de ellos, un programa de cálculo y sus correspondientes presentaciones gráficas de resultados, en lenguaje de alto nivel Turbo-Pascal.

Este lenguaje contiene estructuras de cálculo y librerías gráficas de uso relativamente sencillo y de buena calidad de presentación. El compilador utilizado es el de BORLAND, en su versión Turbo

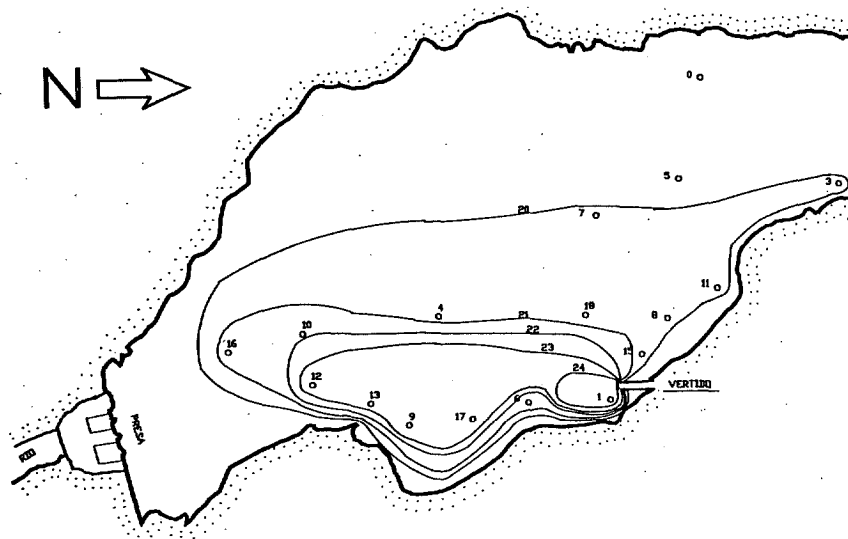


Figura II

5.1, y las librerías gráficas generales son de la misma compañía y las específicas han sido generadas por ASINEL. Para ejecutar los programas es necesario un ordenador PC compatible IBM, con monitor VGA o EGA en color.

La validez de los modelos transformados se basa en la contrastación entre las temperaturas calculadas y las reales obtenidas en las diferentes campañas. Se presenta como ejemplo la isoterma medida realmente en el embalse de Villalba a las 15 horas del día 21 de diciembre de 1988, así como la hoja de cálculo y los gráficos de incremento de temperaturas y de temperaturas calculados (figuras II, III, IV y V). La bondad de los datos calculados, respecto de los medidos para las dos condiciones de contorno del embalse, puede estimarse con un error máximo inferior a 0,5 °C.

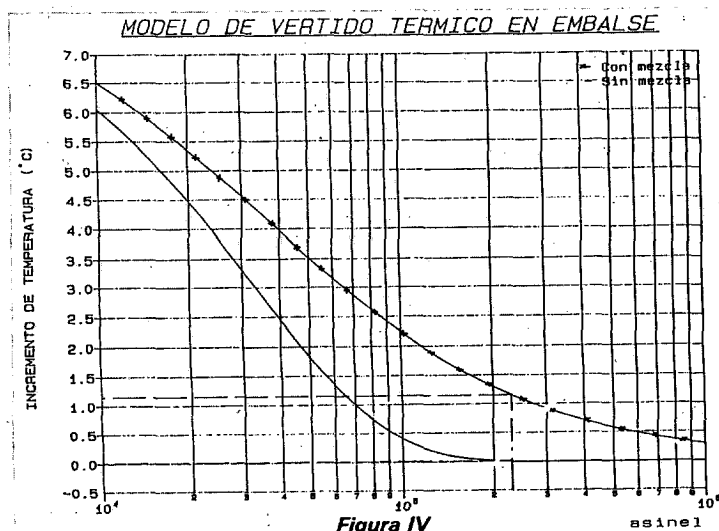


Figura IV

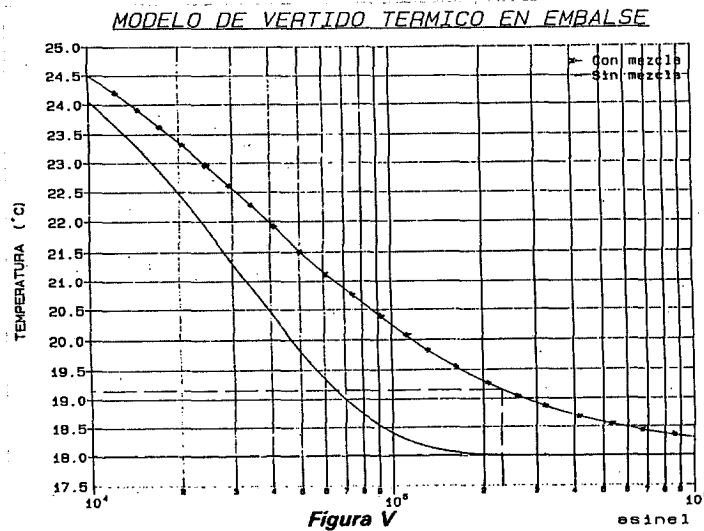


Figura V

**TABLA IV**  
Area de refrigeración necesaria en función del caudal

0.5° C de incremento de temperatura fuera de la zona de mezcla

Incremento de temperatura en el condensador: 10° C

U	0	5	0	5	0	5	0	5
Hs	0	0	95	95	0	0	95	95
Td	0.1	0.1	0.1	0.1	20	20	20	20
Q	condición de mezcla cero							
4	180000	100000	178000	97500	107500	53500	105000	53000
6	275000	150000	265000	145000	162500	81000	157500	79500
8	365000	200000	350000	195000	215000	107500	210000	106000
Q	condición mezcla total							
4	1200000	700000	1150000	650000	700000	360000	700000	350000
6	1800000	1000000	1750000	950000	1100000	550000	1050000	525000
8	2400000	1250000	2300000	1250000	1400000	720000	1400000	700000

## VI. EVALUACION DE LAS NECESIDADES DE AREAS DE REFRIGERACION

Una vez contrastada la calidad de los modelos para su aplicación en condiciones de «tiempo real» (horarias), se pueden utilizar, en una fase de planificación, para evaluar las necesidades de área de refrigeración para unas situaciones dadas.

Estas pueden variar entre valores medios o extremos, siendo estos últimos los que establecen las restricciones más severas a las necesidades de área.

A fin de mostrar la utilidad del método se ha considerado que se impone un límite al incremento de temperatura, como consecuencia del incremento de temperatura en el condensador, de 0,5 °C fuera del área de mezcla. Este valor es el grado de precisión de medida de las temperaturas mediante las sondas.

El incremento de la temperatura del agua en el condensador se supone de 10 °C y los posibles caudales de refrigeración son 4, 6 y 8 m³/sg.

Partiendo de estas condiciones de la central, se varía la velocidad de viento de 0 a 5 m/sg, la radiación solar de 0 a 95 mW/cm² y la temperatura del punto del rocío de 0,1 a 20 °C.

Con la condición impuesta de 0,5 °C de incremento de temperatura fuera del área de mezcla se calcula la superficie de refrigeración necesaria en los dos casos de «mezcla cero» y «mezcla total».

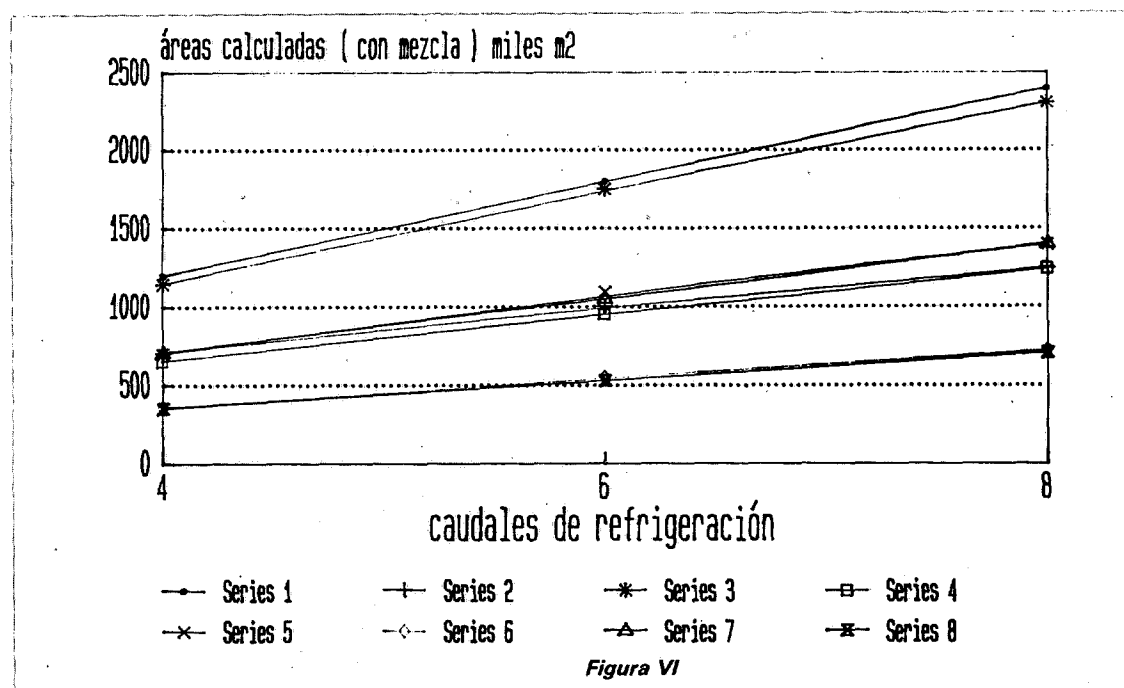
En la tabla IV se presentan los valores obtenidos. En la figura VI se presentan gráficamente las curvas para el caso de mezcla cero y en la VII para el caso de mezcla total.

Se puede observar que las necesidades de área de refrigeración son mucho más elevadas en el caso de mezcla total que en el de mezcla cero.

El aumento de la radiación solar bruta hace disminuir en una cantidad mínima el área necesitada. Esto se debe por un lado a la no elevada influencia de la radiación solar, que ya se había considerado en el modelo inicial, y por otro, al utilizar el modelo transformado horario, a la inercia de la masa de agua.

El aumento de velocidad de viento hace disminuir notablemente el área necesitada. Lo cual concuerda con el fenómeno de evaporación a través de la función de velocidad de viento.

El aumento de la temperatura del punto de rocío hace disminuir notablemente el área necesitada.



El aumento de la radiación solar bruta hace disminuir en una cantidad mínima el área necesitada.



Las condiciones más estrictas serán por tanto velocidad de viento nula, temperatura del punto de rocío casi nula, y radiación solar bruta nula y en los casos de mezcla total.

De los gráficos y valores obtenidos en estas hipótesis se deduce que condiciones de velocidad de viento de 5 m/sg y temperatura del punto de rocío casi nula, son similares a velocidad de viento nula y temperatura de punto de rocío de 20 °C.

## VII. CONCLUSIONES

En el diseño de un embalse de refrigeración de una nueva central térmica, e inclusive en las condiciones de explotación de una ya existente, se plantean determinadas cuestiones medioambientales, que en épocas anteriores no tenían demasiada consideración, entre las que destaca la temperatura de vertido del efluente térmico y su disipación en la superficie del embalse.

Mediante un conjunto de cinco campañas intensivas en dos embalses de características diferentes se ha puesto a punto, y validado por tanto experimentalmente, un modelo matemático que permite predecir en «tiempo real» las temperaturas e incrementos de temperatura a lo largo de la superficie del embalse y por lo tanto es susceptible de ser utilizado en la determinación de nuevas necesidades de refrigeración.

Este modelo ha sido desarrollado para su uso en un PC compatible IBM con monitor VGA o EGA color y es propiedad de la Asociación de Investigación Industrial Eléctrica (ASINEL).

## VIII. AGRADECIMIENTOS

En este artículo se ha expuesto un resumen de un amplio trabajo que ha sido desarrollado en ASINEL (Asociación de Investigación Industrial

Eléctrica) en el que ha participado un numeroso equipo de personas entre las que destaca el Dr. D. Félix Esteban, anterior jefe del Departamento de Medio Ambiente, y el personal y directivos de Terminor, S.A. y Eneco, S. A. por la ayuda logística prestada. A todos ellos se agradece su colaboración.

El trabajo se enmarca dentro del Programa de Investigación y Desarrollo Tecnológico Electro-técnico (PIE).■

## IX. BIBLIOGRAFIA

- ASINEL, Informe CAT/4/85 «Influencia del incremento de la temperatura del agua de circulación del Grupo I de la Central térmica de Velilla del Río Carrión en el cauce receptor». Mostoles, abril 1985.
- REAL DECRETO 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos Preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. BOE n.º 103, 30 de abril de 1986.
- REAL DECRETO 927/1988 de 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, en desarrollo de los títulos II y III de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de aguas. BOE n.º 209, 31 de agosto de 1988.
- LEY 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas (BOE 189, 8 de agosto de 1985).
- BRADY, D. K.; GRAVES, W. L.; GEYER, J. C. «Surface heat exchange at power plant cooling lakes». Cooling Water Studies for Edison Electric Institute. Report n.º 5. The Johns Hopkins University November, 1969.
- THOMANN, R. V.; MUELLER, J. A. «Principles of surface water quality modeling and control». Harper and Row, Publishers. New York, 1974.
- «INDUSTRIAL POLLUTION», Edt. by N. Irvin Sax, Van Nostrand Reinhold Company, 1974.

Las nuevas cuestiones medio-ambientales destacan la importancia de la temperatura del vertido del afluente térmico.

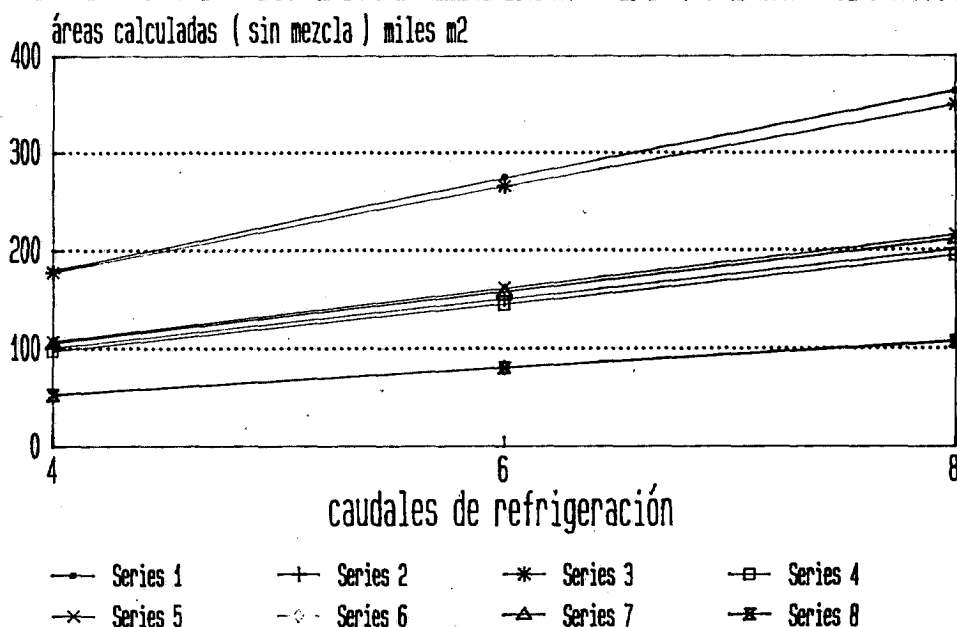


Figura VII