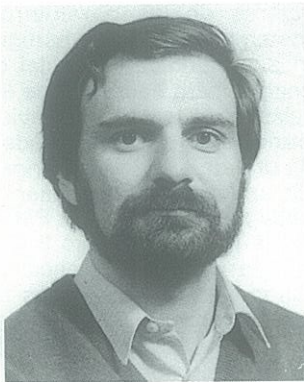




Ginés RUBIO CUADRADO es licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad de Barcelona y diplomado en Ingeniería Nuclear por el Instituto de Estudios Nucleares. Durante los años 1977 y 1980 trabajó en Empresarios Agrupados en las áreas de Blindajes y Protección Radiológica en diversos proyectos nucleares. En 1981 se incorpora a Asociación Nuclear Vandellós (CN Vandellós II), donde en la actualidad desempeña la función de jefe del Grupo de Seguridad, Protección Radiológica y Medio Ambiente de la Ingeniería de Apoyo a la Explotación.



Joaquín MARTI RODRIGUEZ es ingeniero de caminos por la ETSICCP de Madrid y doctor en Ingeniería Civil por la Universidad de Texas A&M en Estados Unidos. Durante los cuatro años de 1976 a 1979 trabajó en el Grupo de Tecnología Avanzada de Dames & Moore en Londres. Cofundador de Principia Mechanica Ltd en Londres, trabajó allí los años de 1980 a 1984. Desde 1984 es director de Principia, SA, en Madrid, y profesor titular en la ETS de ingenieros de Minas. Su especialidad es la simulación numérica de problemas dinámicos y no lineales. Es autor de medio centenar de artículos técnicos internacionales.

Devraj SHARMA es ingeniero mecánico por la Universidad de Utkal (India), master en Ingeniería Mecánica por el Instituto de Tecnología de Kanpur (India) y doctor en Mecánica de Fluidos y Transferencia de Calor por el Imperial College de Londres. Su vida profesional discurre en CHAM Ltd (Londres, 1972-75) y Dames & Moore (Londres y Denver, 1975-1983). En 1984 fundó Principia Mathematica Inc en Denver, Colorado. Su especialidad es la dinámica de fluidos y los fenómenos de transferencia de masa y de calor. Es autor de más de cincuenta artículos y libros en estas disciplinas.

ANALISIS DE DISPERSION DE LOS VERTIDOS DE REFRIGERACION

G. RUBIO - D. SHARMA - J. MARTI

INTRODUCCION

El objetivo principal de este trabajo es demostrar la efectividad de la aplicación de modelos matemáticos cuidadosamente elegidos para predecir y analizar las consecuencias de los vertidos de un sistema de refrigeración. Dichos modelos se aplican aquí al sistema de refrigeración de la Central Nuclear Vandellós II. El agua de refrigeración de esta central se vierte a través de una estructura costera al Golfo de San Jorge en el Mar Mediterráneo. La estructura de toma está situada aproximadamente a 0,3 km de la costa y no lejos de la perpendicular a la costa por la estructura de vertido. El presente artículo estudia el comportamiento de los vertidos provenientes de esta última. También se discute brevemente el efecto de tales vertidos sobre la toma de agua de refrigeración.

El enfoque técnico adoptado en la aplicación de los modelos matemáticos condujo a la consideración de una serie de dominios o regiones dentro de la masa de agua receptora de los vertidos. Dichos dominios se eligieron de modo que se correspondiesen con los mecanismos físicos específicos que, al menos en principio, ejercían una influencia dominante dentro de cada región. Este último punto, que es de gran importancia, se subrayará más adelante en el artículo. Aunque inicialmente se seleccionaron tres dominios de estudio con los correspondientes modelos para cada caso, luego se encontró que sólo dos de tales regiones tenían importancia en el análisis. Por tanto, el tercer dominio no fue estudiado ni llegó a utilizarse el modelo matemático correspondiente.

Se investigaron con los modelos un total de catorce escenarios: siete de ellos simulaban condiciones de operación en verano, mientras los otros siete se aplicaron a condiciones de operación en invierno. Cada uno de tales escenarios correspondía a una combinación dada de parámetros naturales y de condiciones de operación. Los valores de los parámetros se variaron sistemáticamente para así investigar la sensibilidad de los resultados respecto de dichas variaciones. En base a estos análisis pudieron establecerse conclusiones acerca del diseño y funcionamiento de la estructura de vertido. Además de efectuar un estudio sobre el comportamiento térmico de la descarga del sistema de refrigeración, se realizaron también análisis del transporte y dispersión de las sustancias liberadas con las aguas vertidas.

PROBLEMA CONSIDERADO

La evacuación de las aguas del sistema de refrigeración de la Central Nuclear Vandellós II tiene lugar a través de una única estructura de vertido. La estructura presenta una sección transversal rectangular y se encuentra situada sobre la línea de costa modificada por la construcción de la planta. El movimiento del agua de refrigeración vertida está parcialmente restringido hacia uno de los lados por las obras realizadas. El nivel del agua de refrigeración dentro del conducto de descarga y de la estructura de vertido depende tanto de la operación de la planta como de las variaciones estacionales de la temperatura de las aguas costeras. El objetivo primordial de la aplicación

de los modelos era predecir los campos de velocidades y temperaturas en la masa de aguas costeras receptora de los vertidos de refrigeración. Otros objetivos eran la investigación de a) el efecto sobre dichos campos de la variación de los parámetros de operación y de las condiciones naturales, b) el efecto de los vertidos sobre la temperatura del agua de toma, c) la posibilidad de interacción entre los efectos asociados a los vertidos de las dos centrales existentes en el mismo emplazamiento y d) la dispersión de las sustancias liberadas con el agua de refrigeración para permitir una posterior evaluación de su impacto sobre el medio ambiente. Por último, también formaba parte del estudio la preparación de posibles recomendaciones relativas al diseño conceptual de la estructura de vertido.

ENFOQUE TECNICO ELEGIDO

Existen en la literatura especializada numerosos modelos matemáticos que permiten analizar el comportamiento de los vertidos del sistema de refrigeración. En un trabajo de gran utilidad, Policastro y sus colaboradores (1979) estudiaron y evaluaron las capacidades de los distintos modelos. Tras cuidadosa consideración de tales capacidades en relación con las condiciones reales de aplicación de los modelos en el presente estudio, se seleccionó un conjunto de modelos que se comenta a continuación.

En el campo "muy próximo" (metros o pocas decenas de metros de la estructura de vertido), es la cantidad de movimiento del vertido quien gobierna los mecanismos convectivos turbulentos que, a su vez, afectan a las distribuciones de velocidad y temperatura (ver Vreughenhil y Voogt, 1975). En consecuencia, en el referido dominio se adaptó y aplicó el modelo PM-A-DEPT-2D (Sharma, 1978), que es adecuado para la representación de tales mecanismos.

Más allá del dominio anterior, en la zona que se extiende hasta varios centenares de metros en cada dirección del plano horizontal, la cantidad de movimiento y la velocidad de mezcla del penacho van siendo amortiguadas por las corrientes ambientales y la turbulencia asociada a las mismas. Además, las variaciones verticales de las fuerzas de flotación ocasionadas por diferencias de densidad tienden a reducir la intensidad de la turbulencia local en los alrededores del penacho. Estos fenómenos influyen en la velocidad de mezcla y en la tasa de incorporación al penacho de aguas de la masa receptora. Los cambios de temperatura resultantes dependen fuertemente de la turbulencia local y, en consecuencia, de

la distancia a la costa. Las pérdidas de calor a través de la superficie expuesta del penacho ejercen asimismo una gran influencia sobre la temperatura del penacho (Jirka *et al*, 1975; Ryan *et al*, 1974). Los mecanismos de flujo y de transferencia de calor se encuentran así fuertemente ligados en este dominio y el modelo debe reflejar dicho acoplamiento. Por esta razón se seleccionó para el análisis en esta región el modelo desarrollado por Prych (1972) en su versión modificada y extendida (Dames & Moore, 1977). El modelo exige que exista una profundidad suficiente para que el penacho se mantenga separado del fondo, requisito que se cumplía en el caso que nos ocupa. Este segundo dominio es el que denominamos "campo próximo o cercano".

La tercera región a considerar se extiende más allá de las anteriores y cubre un área de varios kilómetros cuadrados de aguas costeras, región que denominamos de "campo lejano". Los movimientos naturales que las aguas costeras ejercen el efecto dominante en esta zona. Tales movimientos gobiernan la velocidad a la cual la masa vertida, perdida ya su cantidad de movimiento inicial, es transportada por la corriente. Durante este proceso se detiene virtualmente la mezcla con las aguas ambientales y, por tanto, la disolución ya no juega un papel dominante en los cambios de temperatura. Sin embargo, el penacho continúa cediendo calor a la atmósfera. Por esta razón se eligió un modelo basado en una formulación de aguas poco profundas (Dronkers, 1969; Leendertse *et al*, 1973) llamado PM-ADEPT-SW para su aplicación en el campo lejano. En la práctica, el modelo no llegó a utilizarse puesto que las reducciones de temperatura en el campo cercano eran suficientemente grandes como para obviar al análisis del campo lejano.

ESTRATEGIA DE APLICACION DE LOS MODELOS

La estrategia de aplicación de los modelos para evaluar el sistema de refrigeración incluyó los seis pasos siguientes:

- Reunir la información relacionada

con las características del sistema de refrigeración, las condiciones de operación de la planta y las condiciones ambientales oceanográficas y meteorológicas. La Tabla I presenta un conjunto de valores para los parámetros utilizados en las aplicaciones de los modelos. Los parámetros considerados incluían:

- Parámetros geométricos, tales como orientación y forma de la estructura de vertido, así como la batimetría local.
- Parámetros relativos al vertido, tales como caudales, saltos térmicos y densidades.
- Parámetros oceanográficos, tales como la temperatura de las aguas receptoras y la velocidad y dirección de la corriente.
- Parámetros atmosféricos, tales como la temperatura del aire, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, etc.
- Seleccionar una serie de escenarios, representados por los correspondientes valores de los parámetros para su posterior análisis. Se estudiaron con más profundidad un total de siete escenarios para cada uno de los extremos climáticos, esto es, el invierno y el verano. Las Tablas II y III identifican cada uno de estos escenarios.
- Construir una malla para presentar el campo muy próximo y aplicar PM-A-DEPT-2D para predecir el flujo transitorio turbulento y la transferencia de calor asociada a los vertidos. Los resultados así obtenidos tienen claras implicaciones sobre la implementación del modelo de campo cercano.
- Elegir un intervalo de discretización espacial adecuado para el análisis del campo cercano para cada uno de los escenarios seleccionados. Aplicar el modelo Prych modificado a cada uno de tales escenarios y representar los resultados obtenidos.
- Interpretar los resultados producidos para el campo cercano con objeto de establecer la posible necesidad de un modelo de campo lejano. En caso de que no fuese necesario hacerlo, emplear directamente los resultados para evaluar la efectividad del diseño del sistema de vertido bajo las condiciones de operación investigadas.

T I
Parámetros de descarga

PARAMETRO	INVIERNO	VERANO
Caudal de vertido (m ³ /s)	40	53
Anchura del canal de salida (m)	15,7	15,7
Altura del canal de salida (m)	4	4
Nivel del agua en el canal de salida (m)	1,50 a 2,55	1,47 a 2,42
Velocidad de vertido (m/s)	1,0 a 1,7	1,4 a 2,3
Salto térmico (°C)	11,9	8,9

Proponer conclusiones y recomendaciones a partir de las aplicaciones de los modelos.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos con el modelo de campo muy próximo resultaron ser muy instructivos en varios aspectos. En primer lugar, los análisis indican que el penacho alcanza un régimen esencialmente estacionario en un periodo de tiempo relativamente corto a partir del inicio o cambio de parámetros del vertido. Dicho periodo es generalmente del orden de dos horas, momento en el que los efectos transitorios rápidamente desaparecen. En segundo lugar, estos mismos análisis mostraron que, para las varias condiciones de vertido simuladas, el penacho entra en contacto con el fondo del mar si la profundidad de las aguas receptoras es inferior a 3,5 km. Si esto ocurriera, se imposibilita la mezcla a través de la

superficie inferior del penacho, con lo que la reducción de su temperatura se vería fuertemente afectada. Por último, se halló que las reducciones de la temperatura del penacho dentro del campo muy próximo son muy pequeñas: la máxima reducción del salto térmico es menor del 5 %.

En base a lo anterior pudo concluirse que la hipótesis estacionaria, basada en el modelo de Prych modificado, era adecuada para el análisis del campo cercano. En la serie de aplicaciones de este modelo al problema se puso de manifiesto la fuerte influencia ejercida por algunos parámetros. En particular, el salto térmico y la velocidad del vertido demostraron ser los parámetros más significativos. Altas velocidades de salida, asociadas con valores mayores del número de Froude y con una gran turbulencia, dan lugar a una mezcla más vigorosa del penacho con las aguas ambientales. Las velocidades al-

tas de vertido causan así un mayor enfriamiento inicial del penacho. Aunque el penacho logra en estos casos una mayor flotación, lo que dificulta la mezcla posterior, la reducción global de temperatura obtenida es ventajosa. Esto es particularmente cierto en condiciones de verano, que están asociadas a altas velocidades de salida y saltos térmicos de vertido moderados.

Las figuras 1 a 8 presentan algunos de los resultados obtenidos. Como puede observarse, en todos los casos estudiados (exceptuando el caso de corriente oceánica nula) el salto térmico del penacho es inferior a 1,5 °C a 1 km del punto de vertido. En ausencia de corrientes, este valor es de aproximadamente 3 °C a 500 m en invierno y de 1,5 °C en verano. A mayores distancias, la mezcla es muy reducida y el penacho se encuentra a merced de las corrientes que pudiesen presentarse.

Entre los parámetros oceanográficos, la temperatura del mar y las corrientes costeras son las variables que ejercen la influencia más significativa. El efecto de la primera puede apreciarse implícitamente considerando el salto térmico, ya que a un mayor valor de la temperatura ambiente corresponde un valor menor del salto térmico. Así, para velocidades de salida idénticas, a un menor salto térmico corresponde una mayor velocidad inicial de mezcla. Sin embargo, al aumentar la flotabilidad del penacho, pueden reducirse las pérdidas adicionales de calor si la humedad relativa y la radiación solar incidente son elevadas.

Las corrientes oceánicas ejercen dos tipos de influencia sobre el penacho. En primer lugar, lo desvían en la dirección de la corriente. Además, dan lugar a una mezcla más vigorosa en zonas de mayor turbulencia. En el caso que nos ocupa, las corrientes son en general beneficiosas, tanto por desviar la trayectoria del penacho de la zona de la estructura de toma como por la reducción adicional de temperatura que logran.

T II
Casos estudiados bajo condiciones de verano

PARAMETRO	CASOS						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Caudal de vertido (m³/s)	53	53	53	53	53	53	53
Salto térmico (°C)	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
Velocidad de salida del vertido (m/s)	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	1,4
Velocidad de la corriente marina (m/s)	0,10	0,0	0,25	0,10	0,10	0,10	0,10
Dirección de la corriente marina	SO	-	SO	SO	SO	SO	SO
Profundidad en la descarga (m)	4	4	4	3	2	4	4
Coefficiente de transferencia de calor	L	L	L	L	L	M	L

L: bajo; M: medio; H: alto.

T III
Casos estudiados bajo condiciones de invierno

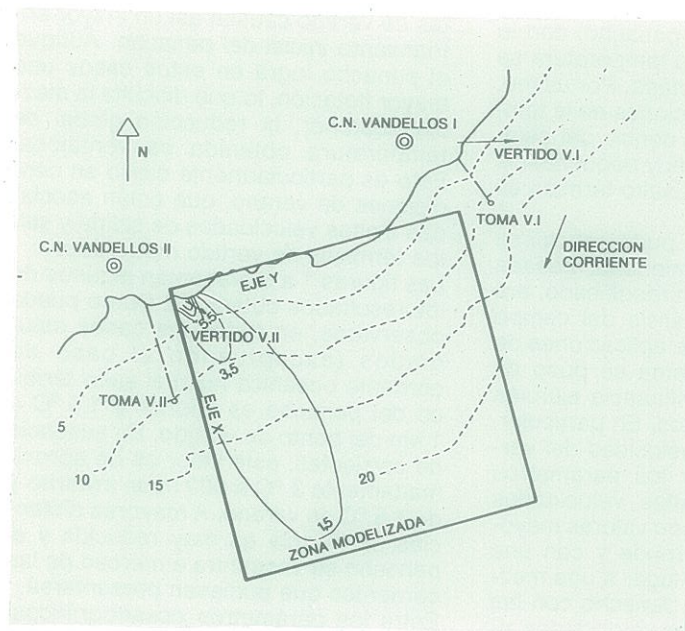
PARAMETRO	CASOS						
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
Caudal de vertido (m³/s)	40	40	40	40	40	40	40
Salto térmico (°C)	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9
Velocidad de salida del vertido (m/s)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,7
Velocidad de la corriente marina (m/s)	0,25	0,00	0,10	0,25	0,25	0,25	0,25
Dirección de la corriente marina	SO	-	SO	SO	SO	SO	SO
Profundidad en la descarga (m)	4	4	4	3	2	4	4
Coefficiente de transferencia de calor	M	M	M	M	M	H	M

L: bajo; M: medio; H: alto.

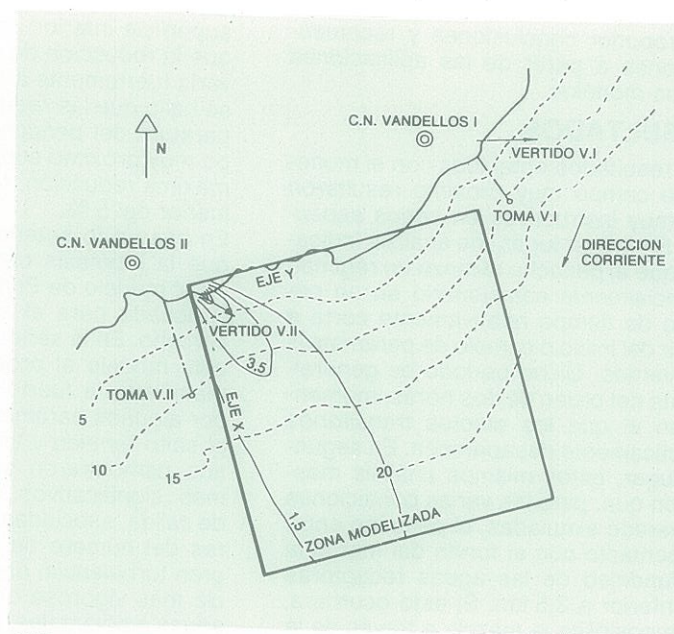
CONCLUSIONES

La aplicación del modelo de campo cercano al análisis térmico del penacho de la CN Vandellós II permitió establecer las siguientes conclusiones:

- El salto térmico del vertido se reduce a 1,5 °C aproximadamente en una distancia de 1 Km del punto de vertido. Dicha reducción es esperable sobre una amplia gama de condiciones ambientales y de operación de la planta. En condiciones de verano, el salto térmico a 1 Km puede variar entre 1,0 °C y 1,4 °C. En invierno, los caudales son menores y los saltos térmicos mayores, lo que aumenta la flotabilidad del



F I Isotermas superficiales (caso W1)



F II Isotermas superficiales (caso W4)

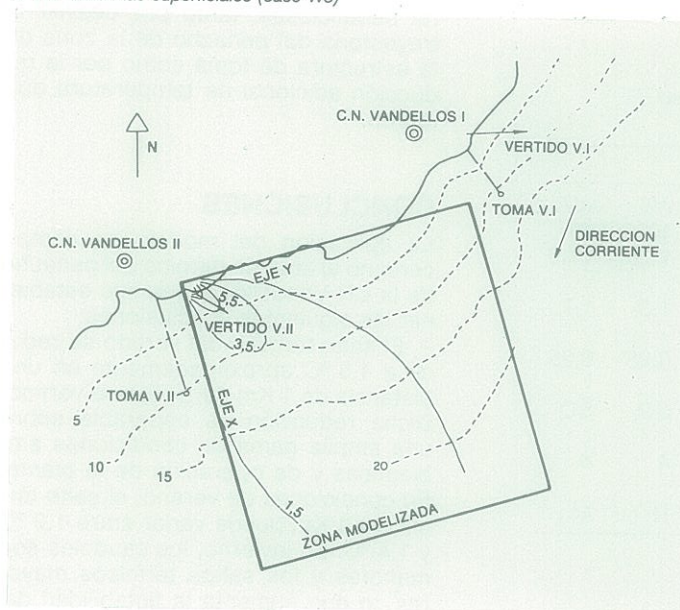
penacho. A distancias de unos 700 m, la mezcla turbulenta se reduce considerablemente. A distancias mayores, los descensos de temperatura dependerán principalmente del intercambio superficial de calor y de la velocidad de las corrientes. En condiciones invernales, el salto térmico a 1 Km está comprendido entre 1,3 °C y 1,7 °C, pudiendo incluso excederse este último valor durante períodos cortos de tiempo bajo ciertas condiciones. En cualquier caso, estas temperaturas no tienen un efecto adverso en la zona de toma.

— La máxima profundidad del penacho térmico en verano es de 3,5 m y tiene

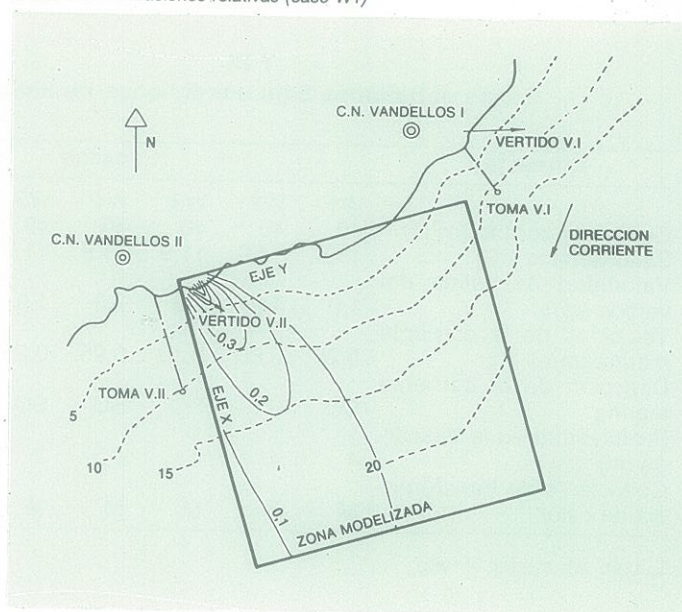
lugar a unos 300 m del punto de vertido. A esta distancia, la profundidad del agua es de unos 8 m y, por tanto, suficiente para evitar la adherencia del penacho. En condiciones invernales la máxima profundidad del penacho es de 2 m y tiene lugar dentro de los primeros 150 m, con idénticas conclusiones respecto de la adherencia al fondo. La profundidad del penacho se reduce al aumentar la velocidad de la corriente. — Las variaciones estacionales esperables en las condiciones oceanográficas y meteorológicas tienen un efecto pequeño en el comportamiento térmico del penacho en los primeros 500 m de distancia desde el punto de vertido.

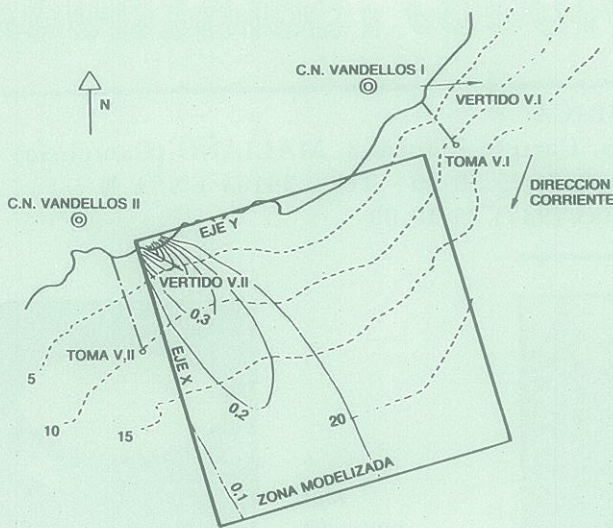
La velocidad máxima de vertido es de 2,3 m/s. La velocidad del penacho se reduce rápidamente por mezcla turbulenta, aun en ausencia de corrientes. Las zonas afectadas por gradientes de velocidad y posible erosión del fondo se limitan a los primeros 60 m, aproximadamente. A partir de este punto, la velocidad del penacho se reduce a menos de 0,5 m/s. La posible erosión del fondo puede evitarse colocando escollera sobre la distancia mencionada. Dadas las distancias afectadas puede concluirse que la interacción entre los sistemas de refrigeración de las dos centrales nucleares en el mismo emplazamiento es despreciable.

F III Isotermas superficiales (caso W3)

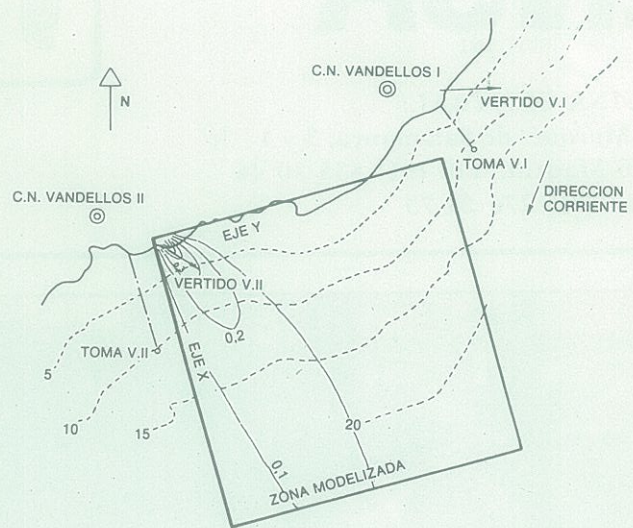


F IV Concentraciones relativas (caso W1)





FV Concentraciones relativas (caso W4)



FVI Concentraciones relativas (caso W7)

REFERENCIAS

DAMES & MOORE (1977). *Modifications to the Prych Thermal Plume Model and Computer Program to Take Account of Shallow Water Bottom Interactions*, International Report, Cooling System, Bushehr Nuclear Power Plant 1 & 2.

DRONKERS, J. J. (1969) *Tidal Computations for Rivers, Coastal Areas and Seas*, Proceedings ASCE, vol. 95, pp. 29-79.

JIRKA, E. H.; RYAN, P. J., y STOLZENBACH, K. D. (1975) *Basic Physical Processes in Heat Transport*, European

Course on Heat Disposal in Power Generation, Amsterdam, Holanda.

LEENDERTSE, J.; ALEXANDER, R. C., y LIU, S. K. (1973) *A Three Dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas: Vol. 1. Principles of Computation*, Report R-1417-OWRR, Rand Corporation, Santa Monica, California.

POLICASTRO, A. J.; DUNN, W. E., y PADDOCK, R. A. (1975) *Surface Thermal Plumes: Evaluation of Mathematical Models for the Near and Complete Fields*, Water Resources Research Program, ANLWR-75-3.

PRYCH, J. (1972) *A Warm Water Effluent Analyzed as a Buoyant Surface Jet*, Report 21, Swedish Hydraulic &

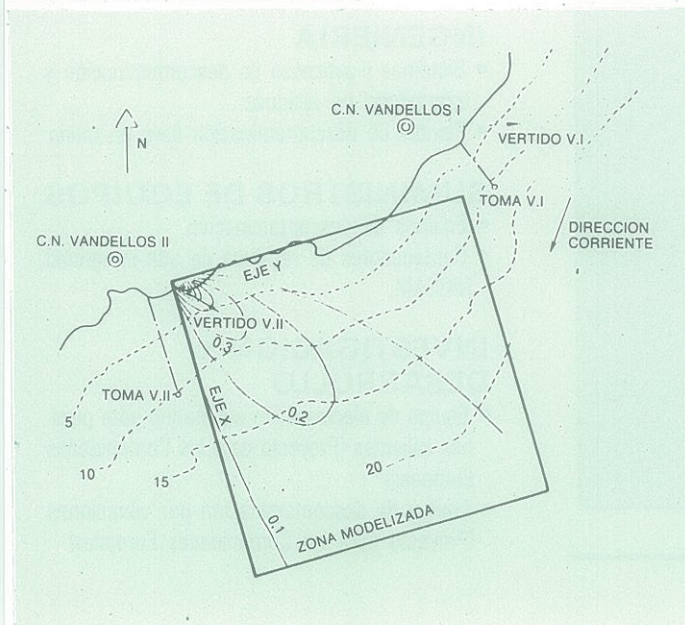
Meteorologic Institute, Stockholm, Suecia.

RYAN, P. J.; HARLEAM, D. R. F., y STOLZENBACH, K. D. (1974) *Surface Heat loss from Cooling Ponds*, J. Water Resources Research, pp. 432-441.

SHARMA, D., et al (1978). *Practical Developments in the Modelling of Turbulent Heat and Mass Transfer*, Int. Conf. on Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow, Swansea, Inglaterra.

VREUGDENHIL, K., y VOOGT, H. (1975) *Hydrodynamic Transport Phenomena in Estuaries and Coastal Waters: Scope of Mathematical Models*, Rep. No. 155, Delft Hydraulic Laboratories, Holanda.

FVII Concentraciones relativas (caso S7)



FVIII Profundidad (m) de la isoterma de 1,5 °C (caso S6)

