



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

2<sup>o</sup> eje.

FACULTAD DE INGENIERIA

División de Ingeniería Civil Topográfica y Geodésica

Disipación de Calor en  
Cuerpos de Agua

TESIS

Que para obtener el Título de:  
**INGENIERO CIVIL**

Presenta:

Arganis Juárez Maritza Liliana

Director de Tesis: Ing. Alba B. Vázquez González

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cd. Universitaria México, D.F. 1994



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE INGENIERIA CIVIL TOPOGRAFICA Y GEODESICA

TESIS

DISIPACION DE CALOR EN CUERPOS DE AGUA

DIRECTOR DE TESIS: ING. ALBA B. VAZQUEZ GONZALEZ

PRESENTADA POR: ARGANIS JUAREZ MARITZA LILIANA

MEXICO, D. F.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-077/93

Señorita:  
**ARGANIS JUAREZ MARITZA LILIANA**  
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor. **ING. ALBA B. VAZQUEZ GONZALEZ** que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

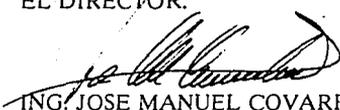
**"DISIPACION DE CALOR EN CUERPOS DE AGUA"**

- I. INTRODUCCION
- II. IMPACTO DE LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CON ALTAS TEMPERATURAS EN CUERPOS RECEPTORES
- III. ACTIVIDADES INDUSTRIALES QUE GENERAN AGUAS RESIDUALES CON ALTA TEMPERATURA
- IV. APLICACION DE UN MODELO PARA LA DETERMINACION CUANTITATIVA DE LA DISIPACION DEL CALOR EN CUERPOS RECEPTORES
- V. MEDIDAS PARA MITIGAR EL IMPACTO POR DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CON ALTA TEMPERATURA
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, a 14 de mayo de 1993.  
EL DIRECTOR.

  
ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

fl. JMCS/RCR\*nl1

## **Agradecimientos**

A mi papá Horacio Elías Arganis Díaz Leal y a mi mamá Ma. Amparo Juárez Castillo, excelentes profesionistas, de gran calidad humana; con mucho amor y cariño por haberme brindado la vida, paréntesis pequeñito entre dos eternidades.

---

A la maestra Ing. Alba B. Vázquez González; por su paciencia y asesoría proporcionada durante la revisión de este trabajo; y muy especialmente por la amistad que me ha concedido.

---

A mi hermana Elia Nora, por la confianza y apoyo que me ha dado siempre.

A mi hermana Aurea Ligia, por su respaldo y confianza; por enseñarme a utilizar Framework 3 con el que se hicieron los primeros borradores de este trabajo; por ser una buena compañera y amiga, con mucho cariño.

A mi hermano Carlos Rosendo, por su ejemplo y dedicación a la investigación y al estudio.

A mi hermana Esther Amparo, compañera de juegos, alegrías y tristezas en las primeras etapas de mi vida.

A mi primo Angel Hernández Salazar, por su ayuda y asesoría con los gráficos y la impresión del primer original de este trabajo.

---

A los maestros y profesores más admirados y queridos:

Ing. Erik Castañeda De I.P., Ing. Salvador García Burgos, Ing. Enrique César Valdez, Ing. Ricardo R. Padilla V., Ing. Agustín Deménegui C., Ing. Oscar Vega Roldán; que desempeñan la labor de la enseñanza de una manera excelente.

Al Ing. Miguel Angel González L. por la asesoría brindada para el uso de WP5.1; por su apoyo en la realización de gráficos y en el préstamo de material bibliográfico; gran persona.

---

Al grupo de compañeros de escuela: Leo, Isaac, Homero, Leonardo, Cristina, Ivette, Ceci, Claudia, Odeth; con los que compartí juegos y horas de estudio y trabajo en la Facultad.

A Elvy, amiga inolvidable.

---

*A Carlos Jesús, por todo lo que me ha brindado desde que lo conocí.*

---

## **Contenido**

**CONTENIDO**

	Pág.
1. Introducción . . . . .	1
2. Impacto de las descargas de aguas residuales con alta temperatura en los cuerpos receptores. . . . .	3
2.1 Efecto en la velocidad de las reacciones químicas. . . . .	3
2.2 Alteración en la densidad y la conductividad. . . . .	4
2.3 Alteraciones en el oxígeno disuelto. . . . .	5
2.4 Alteración en la capacidad de asimilación de desechos orgánicos. . . . .	8
2.5 Efectos en ecosistemas acuáticos. . . . .	9
2.6 Alteración en la circulación vertical en lagos y depósitos. . . . .	10
2.7 Efectos en la evaporación de cuerpos receptores. . . . .	11
3. Actividades industriales que generan aguas residuales con alta temperatura. . . . .	12
3.1 Industria acerera. . . . .	14
3.2 Industria azucarera. . . . .	17
3.3 Industria química. . . . .	23
3.4 Industria de la curtiduría. . . . .	28
3.5 Industria del café. . . . .	31
3.6 Industria de minerales no metálicos. . . . .	33
3.7 Industria de alimentos. . . . .	36
3.8 Industria petrolera. . . . .	39
3.9 Industria que generan energía eléctrica empleando combustibles fósiles. . . . .	41
3.10 Legislación para la prevención y control de la contaminación del agua en el país, a nivel federal. . . . .	46

	Pág.
4. Aplicación de un modelo para la determinación cuantitativa de la disipación de calor en cuerpos receptores. . . . .	54
4.1 Fenómeno térmico. . . . .	54
4.1.1 Conducción. . . . .	56
4.1.2 Convección. . . . .	57
4.1.3 Evaporación. . . . .	58
4.1.4 Radiación. . . . .	60
4.1.5 Regímenes térmicos. . . . .	62
4.2 Planteamiento del balance de energía térmica. . . . .	63
4.2.1 Pérdida por evaporación. . . . .	64
4.2.2 Pérdida por convección. . . . .	67
4.2.3 Pérdida por radiación. . . . .	68
4.2.4 Ganancia por radiación solar. . . . .	68
4.3 Modelo para calcular la temperatura de equilibrio del agua. . . . .	69
4.4 Ejemplo de aplicación del modelo para la determinación de la temperatura de equilibrio de un cuerpo de agua. . . . .	71
4.5 Factores de conversión. . . . .	75
4.6 Perfil de la temperatura del agua. . . . .	76
4.7 Temperatura de la superficie del agua y gradientes verticales en depósitos profundos. . . . .	78
4.8 Depósitos profundos empleados con fines de enfriamiento. . . . .	80
4.9 Consideraciones de aplicación práctica. . . . .	80
4.9.1 Variación en factores meteorológicos e hidrológicos. . . . .	80
4.9.2 Patrón estacional esperado de la temperatura natural de equilibrio del agua. . . . .	81
4.9.3 Desviación inducida por una hidrología poco común. . . . .	81
4.10 Perfil de la temperatura de un río. . . . .	81
4.11 Ejemplo de cálculo del perfil de temperatura de un río. . . . .	83

	Pág.
4.12 Distribución de la descarga de calor de desecho. . . . .	87
4.12.1 Factores que causan modificaciones en corrientes receptoras. . . . .	87
4.12.2 Factores que causan modificaciones en lagunas. . . . .	88
4.12.3 Factores que causan modificaciones en depósitos. . . . .	88
4.13 Temperatura natural e inducida en depósitos profundos. . . . .	92
4.14 Consideraciones de dos o más fuentes de desechos con alta temperatura. . . . .	92
5. Medidas para mitigar el impacto por descargas de aguas residuales con alta temperatura. . . . .	93
5.1 Aprovechamiento y control de desechos. . . . .	93
5.2 Utilización del calor de desecho. . . . .	96
5.3 Sistemas de enfriamiento para plantas termoeléctricas. . . . .	100
5.3.1 Sistemas abiertos. . . . .	100
5.3.2 Sistemas cerrados. . . . .	101
5.4 Consideraciones en la evaluación de técnicas para controlar las descargas de aguas residuales con alta temperatura en plantas termoeléctricas. . . . .	105
5.4.1 Selección del sitio. . . . .	105
5.4.2 Sistemas de enfriamiento abiertos. . . . .	112
5.4.3 Sistemas de enfriamiento cerrados. . . . .	113
5.5 Lista de métodos para resolver el problema de contaminación por descargas de aguas residuales con alta temperatura producidos por plantas generadoras de energía y de las industrias que demandan agua con fines de enfriamiento. . . . .	116
5.6 La opción de utilizar plantas hidroeléctricas. . . . .	116
6. Conclusiones. . . . .	117
Bibliografía. . . . .	120

## Capítulo 1

## Capítulo 1

## INTRODUCCION

La asignatura optativa Contaminación del Agua perteneciente al plan de estudios de la Carrera de Ingeniería Civil trata diferentes temas relativos a la alteración en los cuerpos acuáticos cuando se tienen descargas de contaminantes de diferentes fuentes; uno de los temas es el relativo a la disipación del calor en los cuerpos de agua, el cual se desarrolla en el presente trabajo.

En el capítulo "Impacto de las Descargas de Aguas Residuales con Alta Temperatura en Cuerpos Receptores" se mencionan los impactos negativos que se manifiestan en la flora y fauna acuática, así como las alteraciones en los parámetros físicos, químicos y biológicos de los cuerpos receptores, como consecuencia de las descargas de aguas residuales con alta temperatura, resaltando la influencia que tiene el parámetro temperatura en el adecuado desarrollo de los ecosistemas acuáticos así como en los valores de algunos parámetros de calidad del agua.

En el capítulo "Actividades Industriales que Generan Aguas Residuales con Alta Temperatura" se presentan diferentes actividades industriales que, de acuerdo con la Legislación Nacional vigente en materia de protección de la calidad del agua, deben reportar el valor del parámetro temperatura de acuerdo con la condición particular de descarga. Se hace énfasis en aquellas industrias que demandan agua con fines de enfriamiento, como es el caso de las plantas termoeléctricas, porque son éstas las que generan aguas residuales con alta temperatura; se indica, en los casos en que hubo información disponible, el valor de este parámetro en aguas residuales típicas de esas industrias. Se hace hincapié en que la contaminación del agua con alta temperatura dependerá de la ubicación geográfica y características naturales del cuerpo receptor escogido. También se menciona la Legislación Nacional vigente en materia de protección de calidad del agua; se hace referencia a las Normas Oficiales Mexicanas para la determinación de contaminantes en las descargas de aguas residuales provenientes de las industrias, particularmente aquellas en las que es necesario el control en sus descargas del parámetro temperatura. Se presentan los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, en los que se establecen los ámbitos de temperatura recomendados de acuerdo con distintos usos del agua.

En el capítulo "Aplicación de un Modelo para la Determinación Cuantitativa de la Disipación de Calor en Cuerpos Receptores" se presenta la definición de los fenómenos naturales que están involucrados en el planteamiento del balance de energía para la determinación de la temperatura de equilibrio del agua aplicable tanto a corrientes como a depósitos y lagos. Se presenta también el balance de energía y la obtención del modelo matemático que permite la determinación de la temperatura de equilibrio del agua, así como un ejemplo de aplicación de este

modelo que es de tipo iterativo. Más adelante se presenta el desarrollo de otro modelo matemático que permite determinar el área requerida para que tenga lugar la disipación de calor, es decir, para lograr la temperatura de equilibrio. Se presentan las consideraciones que deben tomarse en cuenta para las descargas con alta temperatura en depósitos o lagos de gran profundidad. Se indica que con la ayuda de los dos modelos presentados se puede construir el perfil de temperatura de un río, tomando en cuenta la existencia de una descarga de calor de desecho en el punto inicial del perfil que se determina.

En el capítulo "Medidas para Mitigar el Impacto por Descargas de Aguas Residuales con Alta Temperatura" se proporciona información con respecto a las medidas que pueden aplicarse para mitigar los impactos producidos en general por los desechos y en particular por las descargas con alta temperatura, desarrollando más ampliamente lo correspondiente a sistemas de enfriamiento para plantas termoeléctricas; además de presentar como una opción la generación de electricidad utilizando al agua.

En el último capítulo se presentan algunos comentarios y conclusiones con respecto a la información proporcionada.

## Capítulo 2

## Capítulo 2

**IMPACTO DE LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES CON ALTA TEMPERATURA EN LOS CUERPOS RECEPTORES**

En un cuerpo de agua superficial como es el mar, un río, una laguna, un depósito o un lago, la temperatura no alcanza valores mayores a la que tiene el ambiente cuando las condiciones naturales del agua no han sido alteradas.

El incremento de la temperatura del agua por la descarga de aguas residuales con alta temperatura trae consigo una serie de trastornos en todos los procesos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo en el cuerpo receptor; por ejemplo, la velocidad de las reacciones químicas aumenta, parámetros como la densidad y conductividad del agua sufren cambios, el oxígeno presente en el cuerpo receptor disminuye al aumentar la temperatura y la rapidez de aireación con la atmósfera también, es decir se afecta la solubilidad de este gas así como su difusión con el incremento de temperatura; se altera la capacidad para asimilar desechos orgánicos, los microorganismos encargados de degradar la materia orgánica sufren trastornos, se presentan desequilibrios en los ecosistemas acuáticos; en lagos y depósitos se afecta la circulación vertical del agua, se altera la evaporación en los cuerpos receptores.

**2.1 Efecto en la velocidad de las reacciones químicas**

La cantidad de oxígeno que demandan los microorganismos para degradar la materia orgánica presente en un cuerpo receptor a una cierta temperatura y en condiciones aerobias es denominada Demanda Bioquímica de Oxígeno ( D B O ); como parámetro de calidad del agua la D B O es una medida de la materia orgánica presente en el cuerpo de agua analizado. La D B O se puede determinar a partir de un modelo matemático de tipo exponencial en el que está involucrada entre otros parámetros una constante ( k ) de la velocidad de la reacción, representa la rapidez de oxidación de la materia orgánica, ecuación 1.1. Esta constante depende de la temperatura y también se puede estimar por la expresión propuesta por Van't Hoff - Arrhenius, ecuación 1.2.

$$y=L_0(1-e^{-kt}) \quad \dots (1.1)$$

$$k = k_0 \theta^{(T-T_0)} \quad \dots (1.2)$$

Donde:

Y es la D B O ejercida después de un tiempo t.

$L_0$  es la Demanda Bioquímica Última, siendo el oxígeno necesario para estabilizar por completo la materia orgánica

k es la constante de velocidad de la reacción

t es el tiempo transcurrido

$k_0$  es la constante de la velocidad de la reacción a una temperatura  $T_0$ , por ejemplo  $k_0 = 0.1 \text{ día}^{-1}$  a  $T_0 = 20^\circ\text{C}$

$\theta$  es un coeficiente de temperatura empírico, por ejemplo, para temperaturas entre  $15^\circ\text{C}$  y  $30^\circ\text{C}$ ,  $\theta = 1.047$  de acuerdo con estudios de Phelps.

Al analizar las expresiones anteriores se puede ver que a mayor temperatura T el valor de k aumentará y al aumentar el valor de k se incrementará el valor de la D B O.

Investigaciones de Van't Hoff-Arrhenius indican que si se tiene una velocidad de reacción  $k_1$  a una temperatura  $T_1$ , la velocidad de la reacción  $k_2$  para una temperatura de  $T_2 = T_1 + 10^\circ\text{C}$  será  $k_2 = 2k_1$ , es decir, la velocidad de reacción en un cuerpo de agua se duplica al incrementarse en  $10^\circ\text{C}$  la temperatura.

## 2.2 Alteración en la densidad y la conductividad

La densidad y la conductividad son parámetros físicos del agua que se ven afectados por un incremento en la temperatura. La temperatura a la que la densidad del agua dulce alcanza un valor máximo es de  $4^\circ\text{C}$ ; cuando esta temperatura es excedida la densidad disminuye, lo cual trae consigo variaciones en la sedimentación de sustancias presentes en el agua; además de cambios en la circulación vertical en lagos y depósitos. Una gráfica que muestra la variación de la densidad con la temperatura se presenta en la Figura 2.1.

La conductividad en el agua se incrementa de 1 a 3 por ciento cuando aumenta la temperatura en un  $^\circ\text{C}$ .

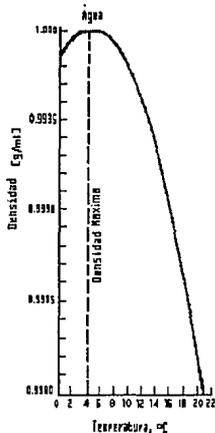


Figura 2.1 Variación de la densidad del agua con la temperatura

### 2.3 Alteraciones en el oxígeno disuelto

Cuando se efectúa una descarga de aguas residuales con alta temperatura en un cuerpo de agua, por ejemplo un río, se produce una variación casi inmediata en la concentración del oxígeno disuelto que contiene la corriente. Si estaba presente el oxígeno de saturación, este valor se ve disminuido de acuerdo con la temperatura del desecho descargado, es decir, la temperatura influye en la solubilidad de este gas.

Hay dos leyes físicas que rigen la solubilidad de un gas en un líquido: la Ley de Dalton de las presiones parciales y la Ley de Henry.

La Ley de Dalton de las presiones parciales establece que la presión parcial de un gas en una mezcla de gases es el producto de la proporción de ese gas en la mezcla por la presión total.

La Ley de Henry indica que a temperatura constante la solubilidad de un gas en un líquido es proporcional a la presión parcial del gas.

El valor de saturación del oxígeno es la cantidad total del oxígeno que el agua puede disolver en equilibrio dinámico con la presión parcial del oxígeno en la atmósfera. La presión parcial obtenida a partir de la ley de Dalton se determina por el porcentaje en volumen del gas en la atmósfera, siendo de 20.95 al nivel del mar y en condiciones secas.

El oxígeno disuelto participa de manera importante en las reacciones químicas y procesos biológicos que ocurren en una corriente, en general es poco soluble en agua. Sus concentraciones de saturación que fluctúan de 14.6 mg/l a 0°C a 7.1 mg/l a 35°C disminuyen al incrementar la temperatura si la presión atmosférica es constante.

En los Cuadros 2.1 y 2.2 se presenta la cantidad de Oxígeno Disuelto en el agua pura a nivel del mar en función de la temperatura, así como los factores de corrección para el oxígeno de saturación a varias altitudes.

Cuadro 2.1 Solubilidad del oxígeno en agua dulce a nivel del mar (cantidad de O<sub>2</sub> en el agua pura)

T [°C]	OD [mg/l]	T [°C]	OD [mg/l]	T [°C]	OD [mg/l]
0	14.62	10	11.33	20	9.17
1	14.23	11	11.08	21	8.99
2	13.84	12	10.83	22	8.83
3	13.48	13	10.60	23	8.68
4	13.13	14	10.37	24	8.53
5	12.80	15	10.15	25	8.38
6	12.48	16	9.95	26	8.22
7	11.17	17	9.74	27	8.08
8	11.89	18	9.54	28	7.92
9	11.59	19	9.35	29	7.77
				30	7.63

Cuadro 2.2 Factor de corrección para Oxígeno de Saturación a varias altitudes

Altitud [ m ]	Presión [mm Hg]	Factor de corrección
0	760	1.00
100	750	0.99
200	741	0.97
300	732	0.96
400	723	0.95
500	714	0.94
600	705	0.93
700	696	0.92
800	687	0.90
900	679	0.89
1000	671	0.88
1100	663	0.87
1200	655	0.86
1300	647	0.85
1400	639	0.84
1500	631	0.83
1600	623	0.82
1700	615	0.81
1800	608	0.80
1900	601	0.79
2000	594	0.78
2100	587	0.77
2200	580	0.76
2300	573	0.75
2400	566	0.74
2500	560	0.73

En aguas marinas se tiene una disminución más notable en la concentración del oxígeno disuelto ante el incremento en la temperatura del agua por descargas de aguas residuales, debido a que la concentración de sales también es un factor químico que afecta de manera negativa a la concentración de saturación del oxígeno disuelto.

El oxígeno disuelto en las corrientes se debe principalmente a dos mecanismos: la aireación y la fotosíntesis, en corrientes naturales libres de descargas el oxígeno que consume la cadena alimenticia se reabastece de manera continua por la ocurrencia de estos mecanismos.

En el proceso de aireación de los cuerpos de agua participan la disolución y la difusión. La disolución ocurre hasta que se satura con oxígeno la capa superficial del agua que está en contacto con el aire de la atmósfera, la difusión se lleva a cabo transfiriendo el oxígeno disuelto de la zona superficial a mayores profundidades.

La rapidez con que se disuelve el oxígeno de la atmósfera en el agua es proporcional a la diferencia entre la concentración de saturación ( $C_s$ ) y la concentración real ( $C_R$ ), esto en forma diferencial se expresa en la ecuación 1.3.

$$\frac{dC}{dt} \propto (C_s - C_R) \quad \dots (1.3)$$

Con la expresión anterior se puede explicar como afecta la temperatura en la rapidez de disolución del oxígeno, al aumentar la temperatura disminuye el valor del oxígeno de saturación, siendo menor la diferencia respecto a la concentración real, lo cual trae consigo que disminuya la rapidez de disolución del oxígeno.

Por otra parte la Ley de Fick establece que la velocidad con que el oxígeno se difunde a través del agua es proporcional a la diferencia en la concentración de este gas entre dos puntos, ecuación 1.4.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = k_d A \frac{\partial C}{\partial l} \quad \dots (1.4)$$

En esta expresión:

M = transferencia del oxígeno con respecto al tiempo.

$k_d$  = coeficiente de difusión; para oxígeno en agua  $k_d = 1.86 \times 10^{-3}$  mm<sup>2</sup>/s a 20°C.

A = área transversal a través de la cual ocurre la transferencia.

C = concentración del oxígeno.

l = distancia en la dirección de la transferencia.

Si se presenta un incremento en la temperatura aumenta la rapidez de difusión del oxígeno disuelto a través de la profundidad de un cuerpo de agua; pero la solubilidad del oxígeno en el agua disminuye al incrementar la temperatura, entonces es menor el oxígeno que se difunde.

#### 2.4 Alteración en la capacidad de asimilación de desechos orgánicos

Los principales microorganismos presentes en el agua que tienen la función de llevar a cabo los procesos de descomposición de la materia orgánica son las bacterias saprófitas llamadas así porque viven de la energía liberada al consumir la materia orgánica.

De acuerdo con sus requerimientos de oxígeno las bacterias pueden ser aerobias es decir únicamente viven en presencia de oxígeno, anaerobias que pueden prescindir del oxígeno para subsistir o facultativas que prefieren un ambiente con oxígeno, pero pueden vivir sin la existencia del mismo.

Con relación a los ámbitos de temperatura se identifican tres tipos principales de microorganismos: psicrófilos que viven a una temperatura cercana a 0°C; mesófilos que viven a una temperatura entre 15 y 40°C, perteneciendo a este grupo las bacterias saprófitas y termófilos que viven a temperaturas entre 50 y 70°C.

Cuando aumenta la temperatura en los cuerpos de agua ocurre un incremento en la velocidad con que las bacterias se multiplican hasta que se alcanza el límite máximo de temperatura en que se desarrollan cuando el medio es favorable y hay alimento suficiente; si el alimento se agota comienza la muerte de los organismos que ayudan a la recuperación natural de la corriente, la muerte de estos organismos también ocurre al rebasarse los ámbitos de temperatura favorables para su subsistencia.

Las bacterias aerobias disponen de menos oxígeno para llevar a cabo sus procesos de degradación de materia orgánica cuando este gas se reduce ante el incremento de temperatura por una descarga de agua residual; si la reducción de oxígeno es severa las bacterias aerobias comenzarán a morir incrementándose la materia orgánica en el cuerpo receptor e iniciándose la descomposición en un medio facultativo; si el oxígeno disuelto se agota por completo, la descomposición se llevará a cabo en un medio anaerobio en cierto tramo de la corriente, hasta la recuperación natural que será más lenta si la temperatura que lleva el agua es elevada.

### 2.5 Efectos en ecosistemas acuáticos

Además de la muerte de bacterias, la flora y fauna acuática se ve afectada por el incremento en la temperatura del agua. Con respecto a la flora acuática, la combinación de nutrientes como nitratos y fosfatos con una temperatura elevada del agua es adecuada para el desarrollo de especies como las algas verde azul ( *Cianophytas* ) cuyo crecimiento excesivo provoca eutroficación en lagos y depósitos.

La distribución y número de organismos del fondo o bentos disminuye al incrementarse la temperatura por arriba de 32°C que es el límite máximo para mantener una población equilibrada. Los organismos adultos resisten más los incrementos de temperatura que los huevecillos y organismos en etapa de cría.

El aumento de la temperatura del agua trae como consecuencia la muerte de organismos vegetales y animales esenciales en la alimentación de otras especies en sus primeras etapas de crecimiento, esto se refleja en un desequilibrio total en las cadenas alimenticias del ecosistema acuático.

Los organismos acuáticos no mamíferos como los peces son animales denominados de sangre fría, es decir, no pueden regular la temperatura de sus cuerpos de un modo tan eficiente como los de sangre caliente, como aves y mamíferos, que cuentan con reguladores internos que mantienen una temperatura constante en el cuerpo.

La temperatura máxima para una especie de peces está en función del tamaño y capacidad de adaptabilidad al cambio de temperatura, los peces prefieren temperaturas en que pueden sobrevivir, normalmente muy por debajo de la temperatura que les produce la muerte.

Los peces de agua dulce se pueden agrupar de acuerdo con los ámbitos de temperatura en que se desarrollan favorablemente en peces que viven en agua fría, agua templada y agua caliente; cuando se rebasan los valores máximos de temperatura comienzan los problemas de adaptación y a peligrar su existencia. Por ejemplo, para peces de agua fría como la trucha y el salmón el ámbito de temperatura en el que se desarrollan y viven satisfactoriamente es entre 11 y 20°C pero si el agua se eleva a unos 24°C comienza la muerte de estas especies disminuyendo hasta a un 10 por ciento su población. Si se trata de agua templada con temperaturas entre 21 y 27°C es posible encontrar peces como el robalo, pero si la temperatura se incrementa a aproximadamente 29°C esta especie presenta problemas para sobrevivir. Finalmente, en una corriente de agua caliente un ámbito de temperatura para garantizar la existencia de peces es entre los 27 y 32°C y cuando se alcanzan valores del orden de 35°C las especies comienzan a morir.

Las especies marinas tienen menor resistencia a las variaciones súbitas de temperatura que las de agua dulce; los peces marinos se reproducen dentro de ámbitos de temperatura muy restringidos, incrementos en la temperatura traen consigo alteraciones en los procesos metabólicos, sistema nervioso y aparato respiratorio.

También se presenta un incremento en la sensibilidad de organismos y de peces tanto de agua salada como dulce a sustancias tóxicas que se encuentran en las aguas residuales descargadas, cuando se alcanzan temperaturas más arriba de lo tolerable.

Para los peces un incremento de  $10^{\circ}\text{C}$  en la temperatura del agua incrementa sus requerimientos de oxígeno 2 ó 3 veces; el agotamiento del oxígeno disuelto o su disminución a menos de 5 ó 4 mg/l debido al incremento de la temperatura del cuerpo receptor por la descarga de aguas residuales, trae consigo la muerte de peces de pesca deportiva que requieren de este gas para vivir; los peces ordinarios pueden morir si se alcanzan niveles de oxígeno disuelto menores que 1.5 mg/l.

## 2.6 Alteración en la circulación vertical en lagos y depósitos

En una zona templada el comportamiento de la temperatura en invierno en lagos y depósitos es isotérmico; ocurre una circulación vertical completa debido a que la densidad del agua es uniforme a una temperatura de  $4^{\circ}\text{C}$ . En primavera el calor tibia el agua de la superficie disminuyendo su densidad de tal manera que la capa tibia superior no se mezcla con el agua más densa y fría de la parte inferior. A medida que la superficie se calienta la densidad disminuye aún más y la profundidad a la que el viento puede mezclar las aguas superiores también disminuye. Debido a lo anterior el depósito o lago se separa en dos estratos aislados, uno formado por el volumen superficial circulante denominado epilimnio que flota sobre otra capa de menor circulación que es el hipolimnio. Entre estos estratos existe una zona denominada termoclina que tiene espesor variable y en ella la temperatura disminuye rápidamente al aumentar la profundidad. La estratificación anterior persiste por lo regular hasta el otoño cuando el enfriamiento de la superficie aumenta la densidad del agua y rompe la estabilidad térmica iniciando una circulación vertical de las capas del agua, que se denomina inversión del lago o depósito, Figura 2.2.

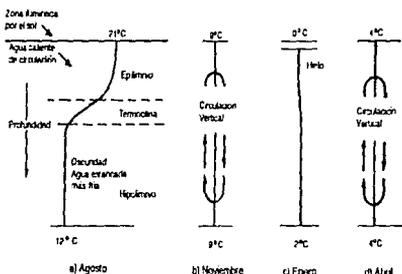


Figura 2.2 Perfiles de temperatura de un lago profundo

- Estratificación vertical
- Circulación otoñal
- Estancamiento de invierno
- Recirculación de primavera

Al ocurrir una descarga con alta temperatura en un cuerpo receptor se presenta una alteración en la estratificación térmica y se modifica la circulación vertical que ayuda al abastecimiento de oxígeno a las zonas más profundas. Por ejemplo en la época en que la temperatura del ambiente ha creado la estratificación térmica en un lago, se incrementará la zona del epilimnio debido a que se tendrá una menor densidad por el incremento de temperatura debido a una descarga de agua residual; también aumentará la profundidad de la termoclina y del hipolimnio en el que normalmente hay poca temperatura y oxígeno disuelto. Esta zona prácticamente se abastece del oxígeno que con la actividad fotosintética produce la flora acuática presente en la termoclina cuando no hay circulación por la diferencia de densidades; si la profundidad del epilimnio es muy grande, la luz no llegará a la termoclina, no habrá fotosíntesis y en consecuencia el oxígeno disuelto en el hipolimnio se agotará; teniéndose una condición aerobia en la superficie y anaerobia en la profundidad del lago o depósito.

### 2.7 Efectos en la evaporación de cuerpos receptores

El enfriamiento por evaporación es una forma natural de disipación de calor; la velocidad de evaporación de corrientes superficiales varía con la temperatura o presión de vapor del agua y del aire en contacto con ella, también influyen otros factores como la velocidad del viento, la presión barométrica y la calidad del agua. La velocidad de evaporación del agua es proporcional a la diferencia de temperatura entre el aire y el agua así como al grado de saturación del aire circundante. La evaporación es rápida cuando se tienen diferencias elevadas entre la presión de vapor máxima a la temperatura de la superficie del agua y la presión real del vapor de agua en el aire sobre ella, la evaporación es lenta para diferencias pequeñas, para diferencias negativas existe condensación. Por cada incremento de  $10^{\circ}\text{C}$  en la temperatura normal del agua la presión de vapor se eleva casi al doble, de donde se puede notar que la temperatura afecta a la evaporación notablemente, aunque el lento calentamiento y enfriamiento de las masas profundas de agua llevan a una evaporación relativamente uniforme.

La presión de vapor es la presión gaseosa máxima que se ejerce a una temperatura dada por el vapor de agua en contacto con la superficie del agua. La presión de vapor en el aire no saturado con vapor de agua es igual a la presión de vapor del agua a la temperatura del punto de rocío del aire, es decir, a la temperatura a la que el aire se encontraría saturado por la humedad que realmente contiene. Lo anterior se puede expresar diciendo que la presión de vapor es la presión parcial ejercida por el vapor del agua de la atmósfera y, de acuerdo con la Ley de Dalton, la evaporación es proporcional a ella.

Si se trata de un agua con concentraciones salinas altas la velocidad de evaporación disminuye.

### Capítulo 3

## Capítulo 3

**ACTIVIDADES INDUSTRIALES QUE GENERAN AGUAS RESIDUALES CON  
ALTA TEMPERATURA**

El agua es un elemento que presta numerosos servicios a la sociedad; los que pueden definirse como básicos para la industria son la transferencia de calor, la generación de energía y la aplicación a procesos.

En este capítulo se identificarán los más importantes procesos industriales en los que el uso del agua trae consigo la generación de aguas residuales con alta temperatura ; además se presentará la legislación nacional actual vigente en materia de protección de la calidad del agua, especialmente en lo relativo a las descargas industriales con alta temperatura.

Los doce sectores industriales consumidores de agua más significativos del país estudiados por la antigua Secretaría de Recursos Hidráulicos en el período de julio de 1974 a febrero de 1976, para conocer los volúmenes de agua utilizados y las características de las descargas, son los siguientes:

1. Industria de la celulosa y el papel
2. Industria del hierro y del acero
3. Industria textil
4. Industria de la curtiduría
5. Industria de acabado de metales
6. Industria química
7. Beneficios de café
8. Industria del azúcar
9. Industria de minerales no metálicos
10. Industria alimenticia
11. Industria vitivinícola
12. Industria petrolera.

En el Seminario de Evaluación y Control de la Contaminación del Agua de 1986 se indica que las industrias que tienen mayor consumo de agua son las siguientes:

Industria	Consumo [m <sup>3</sup> /ton procesada ]
Papelera	350
Acero, Siderúrgicas	240
Textil	224
Curtiduría	60
Petrolera	22.8
Coque	13.6
Cemento	2.8

De las industrias que se han mencionado, aquellas que demandan volúmenes considerables de agua en procesos y para fines de enfriamiento o transferencia de calor en las que se reporta el parámetro temperatura dentro del contenido característico de sus efluentes son las siguientes:

- a) Industria del hierro y el acero.
- b) Industria azucarera
- c) Industria química
- d) Industria de la curtiduría
- e) Industria del café
- f) Industria de minerales no metálicos
- g) Industria de alimentos
- h) Industria petrolera

Además debe considerarse el sector de generación de energía eléctrica particularmente en las plantas que utilizan combustibles fósiles como el carbón, gas o petróleo que se agrupan con el nombre de termoeléctricas, estas plantas se abordarán en este capítulo en el apartado 3.9 " Industrias que generan energía eléctrica empleando combustibles fósiles".

### 3.1 Industria acerera

Las industrias productoras de hierro, acero y sus derivados se pueden clasificar en:

1. Integradas
2. Parcialmente integradas
3. No integradas

Las primeras realizan tanto las operaciones básicas de fabricación de hierro primario en altos hornos o reactores de reducción directa a partir del mineral de hierro, como la aceración en hornos de hogar abiertos, de arco eléctrico o al oxígeno, la laminación y productos semifabricados o terminados totalmente, además de operaciones específicas de limpieza y acabados.

Las parcialmente integradas cuentan con equipo de aceración, generalmente hornos eléctricos de baja capacidad relativa, líneas de laminación y acabados de productos de acero.

Las no integradas, también llamadas laminadoras o troqueladoras, ejecutan la laminación secundaria en las piezas semiterminadas procedentes de las empresas integradas y parcialmente integradas. También cuentan con líneas de acabados, revestimientos metálicos, etc.

Sus procesos de producción respectivos se forman en esencia de los siguientes pasos:

#### Industria integrada:

1. Envío del mineral de hierro a altos hornos o reducción directa.
2. Aceración del producto de arrabio o fierro esponja y de la chatarra.
3. Laminación y acabado de acero.

#### Industria parcialmente integrada:

1. Aceración de chatarra o hierro primario.
2. Laminación y acabado.

#### Industria no integrada:

1. Laminación o troquelado y acabado.

#### Características contaminantes de las descargas

Las descargas de este sector provocan incrementos de sólidos suspendidos que junto con la temperatura afectan la calidad de las aguas de los cuerpos receptores. La naturaleza de los combustibles (coque y combustóleo) utilizados en la fabricación de hierro y acero, provoca la generación de amoníaco, cianuros y fenoles que degradan la vida acuática. Su concentración varía en función de las características del combustible empleado. En el Cuadro 3.1 se muestra el contenido característico de los efluentes de las industrias del hierro y del acero.

Cuadro 3.1 Industrias del hierro y el acero  
Contenido característico de los efluentes

Parámetros	Procedencia de vertidos		
	Destilación de amoníaco	Enfriamiento final	Destilado puro
Temperatura [°C]	49	44	38
DBO [mg/l]	3974	218	647
SST [mg/l]	356	-	125
SSV [mg/l]	153	-	97
Fenoles [mg/l]	2057	-	-
Cianuros [mg/l]	110	-	-
p H	8.9	-	-

En el Cuadro 3.1 se puede ver que el efluente de mayor temperatura corresponde a la destilación de amoníaco, también se observa el incremento de la DBO con el aumento de temperatura.

Si se emplea el mineral tal y como sale de los yacimientos para la obtención de los productos acabados del acero, la cantidad de agua que se necesita oscila generalmente entre 75 700 y 151 400 l/ton de acero producido.

La mayor parte del agua necesaria en los procesos de producción del acero se emplea en las operaciones de refrigeración como lo muestra el Cuadro 3.2:

Cuadro 3.2 Diversa utilización del agua como refrigerante en una siderurgia

Uno tanto en el depto. de calderas como en los lugares de utilización específica .....	Condensadores de turbinas, cojinetes cubiertas de compresor, prensas.
Producción de hierro para .....	Altos hornos, válvulas de estufas, refrigeración del gas, máquina para colada continua de arrabio en moldes metálicos.
Elaboración de acero .....	Hornos, condensadores de desgasificación, apagado de gases.
Laminado y moldeado .....	Laminadores, cojinetes, guías, sierras, máquinas de enderezar, forjas.
Tratamiento del calor.....	Hornos y tanques de apagado.
Planta de coque.....	Refrigeradores del gas, condensadores de vapor y aparatos para apagado del coque.

Debido al gran consumo de agua para refrigeración de las plantas siderúrgicas integradas, el calor contenido en el agua que sale a las corrientes receptoras puede estimarse del orden de 3780 kcal/ h al día por tonelada producción a 5040 kcal/ h al día por tonelada de producción. A veces también se necesita que la refrigeración se haga utilizando vapor para controlar la temperatura si se quiere preservar la fauna de la corriente del agua receptora o si interesa que la temperatura aguas abajo de la planta siderúrgica no sobrepase los límites durante la época de sequía.

### 3.2 Industria azucarera

Tradicionalmente la manera más conveniente de cuantificar los volúmenes de agua que la industria azucarera demanda y descarga actualmente y a futuro, es determinando una relación entre estos volúmenes y la producción que un determinado ingenio genera. Pero la industria azucarera debe tomar en cuenta otros criterios debido a que el término producción implica variables como son el proceso utilizado, tipo de azúcar producido y la generación de productos intermedios o subproductos que varían de un ingenio a otro.

Si la caña es la materia prima utilizada en la producción de cualquier tipo de azúcar, la relación de agua demandada o descargada a la cantidad de caña que se muele es considerada como un índice estimativo de los volúmenes de agua utilizada con mayor certeza, porque sin importar el tipo de producto a obtener y los subproductos que se generen o dejen de generar, la cantidad de caña que entra a un ingenio dependerá siempre de su capacidad de procesamiento sin importar el grado de eficiencia de remoción de sacarosa en los procesos productivos.

También se pueden obtener índices de manejo del agua que se relacionan con la cantidad de jugo mezclado que se genera inmediatamente después de la molienda de caña; teniéndose el inconveniente de que el jugo mezclado contiene una cantidad de agua que se añade al jugo de la caña en un porcentaje en peso de ésta y dicho porcentaje es variable influyendo en el índice obtenido.

La industria azucarera se puede dividir en tres secciones con el fin de clasificar el uso del agua según los tres grados de refinación del azúcar, siendo éstos el azúcar crudo (mascabado), azúcar estándar y azúcar refinado. Existen variantes dentro de cada tipo de ingenio en lo que se refiere a que algunos incluyen procesos cuya finalidad es la elaboración de alcohol etílico, que en ocasiones es complemento de los procesos de producción de azúcar. Lo anterior representa incrementos en la demanda y descarga de agua, siendo más notorio en ingenios que producen azúcar refinada que en su mayoría producen alcohol a partir de las mieles no cristalizables.

Una parte significativa de la demanda total de un ingenio se destina a la alimentación de agua de enfriamiento a las columnas barométricas; las refinerías de azúcar requieren de un 40 a 60% más de agua que las fábricas de azúcar crudo, siendo el proceso empleado el factor que determina la cantidad de agua a usar.

Los usos del agua varían ampliamente de una a otra refinería de azúcar según los procesos empleados. En términos generales, los diversos usos del agua incluyen:

- Agua para evaporadores
- Agua para retrolavado de filtros de arena
- Agua de lavado de carbón
- Agua para usos diversos

En los Cuadros 3.3, 3.4 y 3.5 se presentan en términos generales el caudal de agua demandado para enfriamiento y para calderas, según la calidad del azúcar fabricado.

Cuadro 3.3 Uso interno del agua en la industria azucarera  
Fabricación de azúcar crudo (mascabado)

Tipo de Índice	Enfriamiento [m <sup>3</sup> /ton]	Calderas [m <sup>3</sup> /ton]	Procesos [m <sup>3</sup> /ton]	Servicios [m <sup>3</sup> /ton]
En relación a la cantidad de caña molida	0.35	0.18	3.3	0.3
En relación a la cantidad de jugo mezclado producido	23.17	1.20	18.49	0.67
En relación a la cantidad de azúcar producido	2.19	1.91	36.97	2.29

Cuadro 3.4 Uso interno del agua en la industria azucarera  
Fabricación de azúcar estándar

Tipo de Índice	Enfriamiento [m <sup>3</sup> /ton]	Calderas [m <sup>3</sup> /ton]	Procesos [m <sup>3</sup> /ton]	Servicios [m <sup>3</sup> /ton]
En relación a la cantidad de caña molida	2.52	0.59	14.78	0.04
En relación a la cantidad de jugo mezclado producido	23.03	1.20	19.67	0.09
En relación a la cantidad de azúcar producido	59.23	8.11	113.67	0.81

Cuadro 3.5 Uso interno del agua en la industria azucarera  
Fabricación de azúcar refinado

Tipo de Índice	Enfriamiento [m <sup>3</sup> /ton]	Calderas [m <sup>3</sup> /ton]	Procesos [m <sup>3</sup> /ton]	Servicios [m <sup>3</sup> /ton]
En relación a la cantidad de caña molida	6.32	0.71	18.61	0.1
En relación a la cantidad de jugo mezclado producido	10.68	0.90	31.79	0.08
En relación a la cantidad de azúcar producido	101.20	4.00	339.80	0.47

De los valores presentados anteriormente se puede observar que en efecto los ingenios que producen azúcar refinado emplean el mayor volumen de agua destinada a enfriamiento en relación a la cantidad de azúcar producido.

La reutilización del agua de condensados es mayor en los ingenios de producción de azúcar estándar y refinado, ya que los procesos que generan vapor son más numerosos en este tipo de ingenios que en los de producción de azúcar crudo.

En el Cuadro 3.6 se proporciona información de los porcentajes promedio de los requerimientos de agua atendiendo a su uso y para cada tipo de ingenio.

Cuadro 3.6 Clasificación funcional de usos del agua

Destino (%)				
Tipo de ingenio	Enfriamiento	Calderas	Procesos	Servicios
Producción de:				
Maacabado	2.5	3.4	86.1	8.1
Azúcar Estándar	2.9	3.1	87.5	6.5
Azúcar refinado	1.8	3.5	90.1	4.7
Promedio	2.4	3.3	87.9	6.4

Se observa en el Cuadro 3.6 que es mayor el uso del agua en procesos y servicios con respecto a los caudales empleados para enfriamiento y calderas.

Es muy común que las descargas de un ingenio sean mayores a las demandas debido a que la materia prima contiene un alto grado de humedad que es mayor casi siempre al volumen de pérdidas que puede registrar este tipo de industrias.

Se presentan en los Cuadros 3.7, 3.8 y 3.9 índices de demandas y descargas para cada clase de azúcar producido.

Cuadro 3.7 Manejo global de agua en la industria azucarera  
Fabricación de azúcar crudo ( masecado )

Tipo de Índice	Demanda de agua [m <sup>3</sup> /ton]	Descargas al drenaje [m <sup>3</sup> /ton]
En relación a la cantidad de caña molida	29.86	30.0
En relación a la cantidad de jugo mezclado producido	33.75	34.0
En relación a la cantidad de azúcar producido	328.00	330.06

Cuadro 3.8 Manejo global de agua en la industria azucarera  
Fabricación de azúcar estándar

Tipo de Índice	Demanda de agua [m <sup>3</sup> /ton]	Descarga al drenaje [m <sup>3</sup> /ton]
En relación a la cantidad de caña molida	16.06	15.6
En relación a la cantidad de jugo mezclado producido	19.50	17.6
En relación a la cantidad de azúcar producido	216.78	196.0

Cuadro 3.9 Manejo global de agua en la industria azucarera  
Fabricación de azúcar refinado

Tipo de Índice	Demanda de agua [m <sup>3</sup> /ton]	Descarga de agua [m <sup>3</sup> /ton]
En relación a la cantidad de caña molida	18.2	19.6
En relación a la cantidad de jugo mezclado producido	32.62	27.33
En relación a la cantidad de azúcar producido	341.27	224.79

De los últimos 3 Cuadros se observa que la mayor demanda de agua se presenta en la producción de azúcar refinado porque para producirla se realizan más procesos.

Las tres principales fuentes de agua residual en la fabricación de azúcar crudo son:

- Agua de lavado de la caña
- Agua de condensación de las columnas barométricas
- En menor grado agua de lavado de equipo, tuberías y pisos

El agua de condensados representa la mayor fuente de contaminación después del agua de lavado de caña y cuando ésta no se lava el agua condensada representa el total de la contaminación orgánica del proceso, atribuyéndose esta característica al arrastre de azúcar dentro del evaporador o bien a un control inadecuado.

Las fuentes de agua residual de una refinería de azúcar varían dependiendo del tipo de agente decolorante que se utilice, ya sea carbón animal o carbón activado. Para una refinería que utilice carbón activado como agente decolorante, las principales fuentes de agua residual, de mayor a menor importancia son:

- Condensados de las columnas barométricas
- Agua de enfriadores
- Agua de procesos incluyendo aquella utilizada en la regeneración de las unidades de intercambio iónico
- Lavado de pastas de carbón

Con base en los tres tipos principales de producción de azúcar, en el Cuadro 3.10 se muestran los valores promedio de los parámetros temperatura y Demanda Bioquímica de Oxígeno del agua residual producto de la fabricación de azúcar.

Cuadro 3.10 Valores promedio de temperatura y D B O del agua residual proveniente de la fabricación de azúcar

Parámetro		
Tipo de azúcar	Temperatura [°C]	DBO [mg/l]
Crudo	31	149
Estándar	37	714
Refinado	36	1091

Puede observarse en el Cuadro 3.10 que se tiene una mayor temperatura y D B O en las aguas residuales producto de la fabricación de azúcar estándar y refinado.

El uso de recirculaciones, cambios de procesos y recuperación de subproductos, debe ser estudiado antes de definir los sistemas de tratamiento de las aguas residuales generadas por la industria azucarera para disminuir el costo en los mismos.

## 3.3 Industria química

Para realizar el estudio correspondiente a la industria química es necesario clasificar y agrupar los centros de producción de manera conveniente en función de los productos que elaboran. Se pueden identificar cuatro ramas básicas de la industria química y las correspondientes subramas; en el Cuadro 3.11 se muestra la agrupación utilizada en los estudios realizados por la Secretaría de Recursos Hidráulicos (actualmente la SARH) durante el período 74-76.

Cuadro 3.11 Clasificación de la industria química

Ramas de Producción	Número de Identificación	Número de Industriales Analizados*	Subramas	Incluyen la elaboración de:
Ácidos, Bases y Sales	1	39	1.1 1.2 1.3	Ácidos Bases Sales
Resina y Hule Sintético	2	35	2.1 2.2	Resinas Hule sintético
Industria Farmacéutica	3	37	3.1 3.2	Materiales Primas Productos Terminados
Plaguicidas	4	8	4.1 4.2 4.3	Insecticidas Herbicidas Fungicidas

\* Las cifras corresponden al total de casos considerando las tres fuentes de información que la SRH consultó.

## Notas:

-No se incluyeron las industrias elaboradoras de fertilizantes y petroquímica básica por estar suficientemente estudiada la primera y por que la segunda fue objeto de un análisis paralelo al que se realizó.

-Debido a que se enfocó la atención a los sectores más importantes desde el punto de vista de producción global no se incluyeron las actividades como la fabricación de pólvora y explosivos.

No es posible manejar una unidad única para todos los conceptos concernientes al uso del agua en la industria química, debido a la amplia diversificación de instalaciones industriales y productos manufacturados.

El agua es un elemento indispensable en la operación de una industria química, en ocasiones es materia prima, medio de transporte de otros materiales, medio de acondicionamiento o proporciona servicios auxiliares.

Las funciones fundamentales del agua en las líneas de producción se pueden resumir en cuatro aspectos:

- i) Agua involucrada directamente con el proceso
- ii) Agua destinada a operaciones de enfriamiento con o sin contacto con los productos elaborados
- iii) Agua empleada en calderas de fuerza o vapor
- iv) Agua utilizada en operaciones de limpieza y otros servicios auxiliares.

Es necesario acondicionar la calidad del agua de primer uso antes de su aceptación, especialmente la utilizada en procesos y calderas, para las de enfriamiento y servicios las normas de calidad no son muy estrictas.

El porcentaje del agua de primer uso que entra a una planta correspondiente a cada renglón de la clasificación funcional depende del tipo de producto elaborado, el equipo empleado, edad tecnológica del mismo y situación geográfica del centro industrial; por lo que es conveniente asociar las empresas por subramas y ramas de producción y promediar sus cifras.

Valores promedio de la distribución funcional del agua así como de índices de uso interno del agua para procesos, enfriamiento, calderas y servicios auxiliares, de acuerdo con las ramas y subramas que se definieron con anterioridad se muestran en los Cuadros 3.12 y 3.13.

Cuadro 3.12 Distribución Funcional de la demanda de agua

Distribución Funcional de la Demanda ( % )				
Clasifi- Cación Subrama	Procesos	Enfriamiento	Calderas	Servicios Auxiliares
1.1	41.1	25.8	12.1	9.7
1.2	58.6	29.1	16.7	6.8
1.3	56.7	22.8	21.4	10.2
Rama 1	52.1	25.9	16.7	8.9
2.1	33.4	38.9	22.5	13.4
2.2	53.0	21.0	26.0	-
Rama 2	43.2	29.8	24.3	13.4
3.1	42.9	37.5	15.1	12.7
3.2	32.4	14.8	41.4	20.9
Rama 3	39.5	27.4	26.9	13.4
4.1	40.8	36.3	8.8	6.9
4.2	34.6	21.4	14.3	16.9
4.3	46.0	35.3	8.3	10.0
Rama 4	40.5	31.0	10.5	11.3

Cuadro 3.13 Índices de uso interno del agua

Índices de Uso interno [m <sup>3</sup> /ton]				
Clasificación Subrama	Procesos	Enfriamiento	Calderas	Servicios Auxiliares
1.1	5.90	2.17	1.40	1.56
1.2	9.70	6.59	3.46	1.20
1.3	10.00	5.05	3.82	1.44
Rama 1	8.53	4.60	2.89	1.30
2.1	3.21	5.90	1.83	1.18
2.2	7.57	3.00	3.71	-
Rama 2	5.39	4.45	2.77	1.18
3.1*	0.43	0.36	0.14	0.09
3.2*	1.34	0.18	0.76	0.16
Rama 3*	0.89	0.27	0.45	0.12
4.1	17.53	14.88	3.85	2.13
4.2	22.71	29.20	7.79	4.74
4.3	37.08	29.20	7.79	5.19
Rama 4	25.77	24.43	6.48	4.02

\*m<sup>3</sup>/kg

El mayor uso del agua en las cuatro ramas analizadas en el estudio realizado por la SRH ( hoy SARH) corresponde al renglón de procesos con cifras entre 39.5 y 52.1% de la demanda global, seguida por el uso en operaciones de enfriamiento con valores entre 25.9% ( rama 2 ) y 31% ( rama 4 ) .

También en lo que se refiere a los índices de uso interno del agua, correspondió el segundo lugar al agua para enfriamiento, estando el caudal promedio más alto por tonelada de producción en la rama 4 ( plaguicidas ) al ser de 24.43 m<sup>3</sup>/ton.

En la industria química las fuentes de agua residual son:

- Las operaciones de enfriamiento sin contacto
- Los procesos, incluyendo principalmente las operaciones de enfriamiento o calentamiento por contacto con materias primas, reactivos, productos intermedios, finales o de desecho, operaciones de lavado, transporte e incorporación como diluyente y servicios auxiliares.

Es conveniente resaltar que las operaciones de enfriamiento son típicas de plantas en las cuales los procesos químicos operan más rápida y eficientemente a altas temperaturas o generan calor en su transcurso y el agua se emplea para controlar o reducir esas temperaturas. Si los caudales demandados para estos fines no entran en contacto con los reactivos, como en los casos en que el agua circula por intercambiadores de calor y serpentines, ésta no será contaminada con los materiales de proceso; sin embargo, cuando estos caudales entran en contacto con los reactivos, se provoca la contaminación y el volumen de aguas de desecho se incrementa.

El agua de enfriamiento sin contacto se puede clasificar en dos categorías:

- 1) Agua que se puede recircular una vez que la temperatura es abatida en torres de enfriamiento o lagunas de aspersion.
- 2) Agua de un solo paso, tomada generalmente de ríos, lagunas o estuarios y usualmente devuelta a esos cuerpos naturales cuando ha cumplido sus funciones.

Valores promedio de la temperatura del agua residual por ramas de producción de la industria química se presentan en el Cuadro 3.14.

Cuadro 3.14 Valores promedio del parámetro temperatura de las aguas residuales por ramas de Producción

Rama	Temperatura (°C)
1	31.5
2	30.3
3	22.8
4	27.2

- La información del Registro de las Descargas se procesó analizando y ponderando el parámetro indicado en 147 descargas de origen químico industrial.
- Los resultados presentados proceden de ponderar con base en el gasto de descarga medio la concentración del parámetro dado.

Estos valores se considerarán adecuados u ofensivos dependiendo de la temperatura en condiciones naturales del cuerpo receptor.

### 3.4 Industria de la curtiduría

En la industria de la curtiduría de pieles el mayor volumen de productos procesados lo forman, entre otras, la suela y la carnaza, las cuales poseen características ventajosas tales como: resistencia, durabilidad y mayor superficie aprovechable.

Sus procesos de producción se pueden clasificar de acuerdo a tres operaciones básicas:

- 1o. Depilado
- 2o. Curtido
- 3o. Acabado

El depilado consiste en alcanzar la remoción del pelo de la piel, mientras que el curtido se estabiliza mediante agentes que le proporcionan resistencia y preservación, ya sean vegetales, sales de cromo y otros curtientes de aquí que los volúmenes de agua empleados en el proceso contengan impurezas que es necesario tratar para evitar la afectación de cuerpos receptores.

#### Características contaminantes de las descargas

Para la determinación de alternativas de tratamiento existen datos de análisis de muestras generales de agua residual y muestras particulares de las operaciones productivas de una planta grande, una mediana y una pequeña de curtido al cromo, además de una planta mediana con taninos, que se presentan en los Cuadros 3.15, 3.16, 3.17 y 3.18.

Cuadro 3.15 Planta grande, curtido al cromo, medición y  
caracterización de las aguas residuales, capacidad de producción:  
25 000 kg de pieles curtidas/ día

Gasto de 800 m<sup>3</sup>/día

Parámetro	Concentración	Carga (kg/día)
Temperatura [°C]	23	
DBO [mg/l]	4390	3513
DQO [mg/l]	4800	3838
SST [mg/l]	3125	2500
S Sed [ml/l]	80	
GYA [mg/l]	195	156
p H	8	

Índice de descarga 32 l/kg

Cuadro 3.16 Planta mediana, curtido al cromo, medición y caracterización de las aguas residuales. Capacidad de producción: 1550 kg de pieles curtidas/día

Gasto: 150 m<sup>3</sup>/día

Parámetro	Concentración	Carga [kg/día]
Temperatura [°C]	22	
DBO [mg/l]	1452	218
DQO [mg/l]	1586	239
SST [mg/l]	1034	155
S Sed [ml/l]	100	
GYA [mg/l]	39	6
p H	5-8	

Índice de descarga : 96 l/kg

Cuadro 3.17 Planta mediana, curtido con taninos, medición y caracterización de las aguas residuales. Capacidad de producción de 5 100 kg de pieles curtidas/día

Gasto: 150 m<sup>3</sup>/día

Parámetro	Concentración	Carga [kg/día]
Temperatura [°C]	22	
DBO [mg/l]	3573	536
DQO [mg/l]	4167	625
SST [mg/l]	833	125
S Sed [ml/l]	118	
GYA [mg/l]	200	125
Taninos [mg/l]	360	30
p H	11	

Índice de descarga: 29 l/kg

Cuadro 3.18 Planta chica, curtido al cromo, medición y  
caracterización de las aguas residuales. Capacidad de producción  
de 400 kg de pieles curtidas/día

Gasto:  $18 \text{ m}^3/\text{día}$

Parámetro	Concentración	Carga [kg/día]
Temperatura [°C]	23	
DBO [mg/l]	3123	57
DQO [mg/l]	3412	62
SST [mg/l]	2222	40
S Sed. [ml/l]	90	
GVA [mg/l]	84	2
p H	6	

Índice de descarga: 45 l/kg

Nota: En los cuadros correspondientes a plantas que utilizan cromo para el curtido no se incluyeron los contenidos de cromo.

De acuerdo con la información antes proporcionada se observa que la mayor temperatura de las aguas residuales típicas de una planta de curtiduría es aproximadamente de 23°C; es agua que se emplea en procesos distintos al enfriamiento por lo que la temperatura de la misma no es muy elevada.

### 3.5 Industria del café

Los beneficios del café generan cantidades significativas de desperdicios que pueden ser subproductos utilizables principalmente como abono orgánico y alimento balanceado, además de que la descarga líquida puede ser reutilizada.

El proceso de producción del beneficiado del café por vía húmeda puede resumirse en los siguientes pasos:

1. Adición de agua al grano proveniente de los silos
2. Despulpación
3. Fermentación
4. Secado
5. Morteo
6. Clasificación
7. Envasado

#### Características contaminantes de las descargas

De los procesos de despulpación y fermentación se derivan desechos líquidos, del morteo y clasificación se desechan las cascarillas, en conjunto estas aguas se verten directamente a los cuerpos de aguas superficiales.

Los residuos líquidos de cualquier beneficio provienen del agua de transporte del café cereza, el despulpado y el lavado.

La utilización de volúmenes de agua en la industria cafetalera se debe a que los cafés lavados tienen mayor comercialización pues con el proceso de beneficio húmedo y seco se obtiene café suave.

En lo referente a las aguas residuales, los principales aportadores de contaminantes son: los desechos de despulpado, la pulpa misma, el agua de lavado de fermentación, y el tejido; siendo la pulpa la que causa mayores problemas; aunque se puede recuperar para utilizarla como combustible o fertilizante. El agua derivada de la trituration contiene sólidos suspendidos, azúcar y otros materiales solubles; de la fermentación resulta una descarga con geles coloidales de pectina y otros productos, que comparada con la descarga de trituration no es muy grave y menos aún lo es la descarga de la molienda en seco de los granos, debido a que es casi celulosa pura que puede utilizarse como combustible para las calderas de vapor que producen la energía para los molinos.

Información promedio de las aguas residuales de la industria cafetalera se muestran en los Cuadros 3.19, 3.20 y 3.21.

Cuadro 3.19 Composición Físico- Química de aguas de despulpe

Parámetro	Valor Máximo	Valor Mínimo
Temperatura [°C]	25.5	13.0
S Sed. [ml/l]	150.0	25.0
p H	6.2	4.1

Cuadro 3.20 Resultados promedio de análisis  
Composición Físico- Química de aguas de lavado

Parámetro	Valor Máximo	Valor Mínimo
Temperatura [°C]	23.0	16.0
S Sed. [ml/l]	300.0	20.0
p H	6.7	3.5

Cuadro 3.21 Composición Físico-Química de una mezcla de  
agua de lavado y despulpe de una beneficiadora

Determinación	Valor promedio
Temperatura [°C]	20
S Sed. [ml/l]	50
GVA [mg/l]	125
p H	7.2

Se ha observado que si bien en la industria del café se reporta el parámetro temperatura, éste no es el parámetro que causa el mayor impacto en los cuerpos receptores.

### 3.6 Industria de minerales no metálicos

El sector analizado elabora productos de mármol, mosaicos de asbesto y abrasivos.

El proceso de fabricación del mármol consta de tres etapas:

- 1a. Laminación
- 2a. Cortado
- 3a. Pulido

En la primera se corta la piedra o bloque de mármol en láminas a un espesor deseado; en la segunda se seleccionan las láminas a las medidas requeridas. El pulido se efectúa en máquinas especiales provistas de un disco abrasivo que, por efecto de presión sobre la placa, le proporciona una superficie lisa y fina.

Las empresas que fabrican productos de mármol utilizan agua para enfriamiento en laminación, cortado y pulido, aunque en cantidades pequeñas gracias a la máxima recirculación que le dan a partir de la sedimentación.

Los procesos de producción que se ejecutan para elaborar mosaicos son:

- 1) Cortado
- 2) Planchado
- 3) Pulido

En la primera operación se corta la piedra en láminas, en el planchado se prepara la mezcla de piedra cortada, arena, cemento y color; después se pule con discos abrasivos ejerciéndoles presión a los mosaicos formados en el planchado.

El agua se utiliza en volúmenes pequeños y se destina para el enfriamiento de las máquinas cortadoras, pulidoras y en la preparación de la muestra.

Con respecto a la elaboración de productos de asbesto, debe saberse que los productos manufacturados de asbesto cemento se componen de cemento Portland reforzado con fibras de asbesto. El asbesto aparece en diversas formas y tipos, en los que se encuentran los de fibra larga, sedosa y suave, los de fibra corta, quebradiza y áspera, y de color blanco, gris-verdoso, pardo amarillento o azul. Su clasificación más común lo divide en asbesto hilable y no hilable.

Con el primero se hacen tejidos y con el segundo se hacen aislantes térmicos, piezas automotrices, etc.

Sus operaciones de fabricación son:

1. Procedimiento húmedo a máquina
2. Procedimiento húmedo a la prensa
3. Procedimiento semiseco a máquina
4. Procedimiento de moldeo

El agua es utilizada en este caso en enfriamiento, calderas, procesos y servicios sanitarios.

La industria de productos abrasivos emplea para tal efecto al cuarzo, esmeril, granate, óxido de aluminio y al carbono de silicio; y como materiales de sostén al papel, fibra vulcanizada, tela o combinación de éstos.

Los procesos productivos característicos dentro de la fabricación de productos abrasivos son:

1. Reparación de dorsos
2. Manufacturado
3. Acabado y dimensionado.

En los procesos antes mencionados, el agua se emplea en el teñido de dorsos, la preparación de colas y el secado de las operaciones de manufacturado y acabado, además de los servicios sanitarios de la planta. No obstante no representa grandes volúmenes

#### Características contaminantes de las descargas

El efluente residual de empresas productoras de mármol, contiene principalmente sólidos sedimentables al igual que el efluente de la industria productora de mosaicos, que también usa el agua residual de otras industrias. En los Cuadros 3.22, 3.23 y 3.24 se muestran las descargas de la industria de minerales no metálicos.

Cuadro 3.22 Características de las descargas de empresas productoras de mármol

Parámetro	Concentración
Temperatura [°C]	19
GVA [mg/l]	-
Materia flotante [mg/l]	-
S Sed. [ml/l]	27
p H	8-9

En el agua de enfriamiento solo se reporta la temperatura con valores aproximados de 24°C y no se registran índices en los otros parámetros reglamentados.

Cuadro 3.23 Características de descargas arrojadas por productos de Anbento

Parámetro	Concentración
Temperatura [°C]	23
S Sed. [mg/l]	-
GVA [ml/l]	7.5
Materia flotante [mg/l]	-
p H	10-12

Cuadro 3.24 Características del agua descargada del teñido y  
servicio sanitario en la fabricación de productos abrasivos

Parámetro	Concentración
Temperatura [°C]	24.3
S Sed. [ml/l]	4
GVA [mg/l]	27.8
Materia flotante [mg/l]	-
p H	7-9

### 3.7 Industria de alimentos

Las empresas dedicadas a la preparación, conservación, empaclado y envasado de frutas y legumbres tienen por objeto conservar materias y preparar alimentos de diversas clases.

Para ello, los procesos productivos más importantes que se ejecutan son los siguientes:

- Proceso para elaborar legumbres enlatadas
- Proceso para la preparación de mermeladas
- Proceso para el enlatado de frutas
- Proceso para enlatado de productos de tomate
- Proceso para enlatado de chiles

Las metodologías utilizadas en la preparación de los productos son innumerables, en seguida se describe brevemente la secuencia de elaboración para el enlatado de chícharos en conserva:

1. Recolección de las matas
2. Separación de los chícharos ( desengranado )
3. Limpieza, pesado y embalaje
4. Lavado y clasificación por grupos
5. Precocimiento ( a 85°C durante 5 minutos )
6. Lavado y selección manual
7. Llenado en botes
8. Cocimiento a vapor
9. Relleno con salmuera
10. Cierre de botes
11. Esterilizado
12. Enfriamiento

#### Características contaminantes de las descargas

Los volúmenes de agua empleados difieren dependiendo del proceso efectuado, pero en común requieren la misma calidad desde el punto de vista bacteriológico, por lo que la cloran y la purifican. Por su parte las aguas residuales de mayor importancia son las correspondientes al proceso de lavado de materia prima, de equipo y pisos, por lo que contienen sólidos grandes y desechos como azúcares, féculas y carbohidratos derivados del producto bruto o cocinado.

Las muestras generales de este sector industrial se indican en los Cuadros 3.25, 3.26 y 3.27; obedecen a los tres tamaños de plantas que existen en el país.

**Cuadro 3.25** Planta grande para producción de alimentos  
Características de las aguas residuales

Parámetro	Concentración
Temperatura [°C]	17
DBO [mg/l]	3000
DQO [mg/l]	5000
SST [mg/l]	1000
S Sed. [ml/l]	9
GYA [mg/l]	1000
p H	4-7

Flujo de agua residual: 525 m<sup>3</sup>/día.

**Cuadro 3.26** Planta mediana para producción de alimentos  
Características de las aguas residuales

Parámetro	Concentración
Temperatura [°C]	25
DBO [mg/l]	4000
DQO [mg/l]	4600
SST [mg/l]	2500
S Sed. [ml/l]	28
GYA [mg/l]	1120
p H	9.5

Flujo de agua residual: 163 m<sup>3</sup>/día

Cuadro 3.27 Planta chica para producción de alimentos  
Características de las aguas residuales

Parámetro	Concentración
Temperatura [°C]	22
DBO [mg/l]	2000
DQO [mg/l]	5000
SST [mg/l]	350
S Sed. [ml/l]	26
GVA [mg/l]	300
p H	3-9

Flujo de agua residual: 67 m<sup>3</sup>/día.

En cuanto a las posibilidades de reutilizar el agua al interior de la industria, la utilización en los evaporadores puede recuperarse en su mayor parte como condensados para recircularla en el lavado de materia prima, lo mismo puede hacerse con el agua de enfriamiento.

### 3.8 Industria petrolera

El sector petrolero en el país es uno de los más importantes gracias al desarrollo que se ha tenido con la ampliación de áreas de extracción de petróleo y la modernización de su tecnología, tanto para este fin como para la refinación del mismo. Esto ha producido como consecuencia una complejidad industrial que hace imposible acoplar una sola metodología de tratamiento para depurar los residuos líquidos resultantes sobretodo si se tienen presentes las diversas fases de que constan los variados procesos productivos de este sector.

Por un lado están las actividades referentes a la extracción y transporte del petróleo crudo hasta una refinería, y por otro lado, las relacionadas a la refinación del petróleo crudo y sus transformaciones. Dentro de la refinación están las de almacenamiento y transporte interno, desalación, destilación, destilación fraccionada térmicamente, destilación catalítica, hidro-destilación, polimerización, alquilación, isomerización, reconstitución, hidro-tratamiento y producción de asfalto.

A partir de la refinación se obtiene la gasolina, kerosina, diesel, combustóleo, asfalto, lubricantes, grasas, parafinas y gas licuado.

El agua en la industria petrolera tiene mayor uso en la refinación y de allí salen mayores aguas residuales, el agua demandada para este fin se emplea de la siguiente manera:

Uso del agua	%
Enfriamiento	60
Generación de vapor	30
Servicios generales	10

El agua para enfriamiento recorre prácticamente todas las instalaciones y se utiliza para condensar gases, enfriar equipos, productos y subproductos terminados.

Una vez utilizada regresa a torres de enfriamiento para bajar su temperatura a través del contacto con el aire, con lo que se puede utilizar nuevamente adicionándole agua, para recuperar la que se evapora en la torre de enfriamiento, así como la que se drenó para mantener características específicas de la calidad del agua que se utiliza.

### Características contaminantes de las descargas

Debido a que el flujo del petróleo a través de los procesos de refinación puede escapar en ocasiones o bien existir derrames que provocan sulfuros, fenoles y amoníaco, cada etapa resulta una fuente potencial emisora de contaminantes.

Las aguas residuales de enfriamiento provienen de las purgas de las torres de enfriamiento que se hacen para evitar la concentración excesiva de sales disueltas al ocurrir la evaporación en las torres.

En el Cuadro 3.28 se muestran algunas características principales de las descargas líquidas en las refinerías de Ciudad Madero y Salamanca.

Cuadro 3.28 Características de las descargas líquidas en Refinerías de Cd. Madero y Salamanca

Parámetros				
Identificación	Productos Principales	Temperatura (°C)	S Sed. [ml/l]	GYA [mg/l]
MAD d 1.2	Gas Pemex	37.5	0.0	70
	Olina, gaolímex	36.0	0.1	81
SAL d 1.1	Petroquímicos Combust.	36.0	0.4	124

Se observa que las temperaturas de las aguas residuales de los productos derivados del petróleo antes mencionados son bastante elevadas, considerándose factibles de producir impactos significativos en los cuerpos receptores.

### 3.9 Industrias que generan energía eléctrica empleando combustibles fósiles

La producción de electricidad trae consigo problemas de contaminación del agua, especialmente por elevación en la temperatura de la misma; pero es necesario que exista este sector industrial porque es esencial la energía eléctrica en el hogar, el campo y en todas las actividades comerciales e industriales.

El consumo de electricidad se ha incrementado de manera acelerada en los últimos años y continuará así, por lo que se considera que es un buen índice del potencial industrial, económico y de prosperidad de una nación.

Datos cuantitativos referentes a las cargas de calor de desecho de plantas generadoras de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles generalmente no están disponibles.

Las plantas termoeléctricas utilizan turbinas de vapor. El proceso para la generación se inicia cuando una fuente de energía, ya sea carbón, gas, combustóleo o combustible nuclear, se utiliza para calentar agua en una caldera y producir vapor caliente a alta presión; el vapor se expande contra las álabes de una turbina, que al girar activa un generador que produce electricidad. Después de que se gasta la energía aprovechable del vapor, éste se dirige a un condensador donde se enfría y es reconvertido en líquido para ser devuelto a la caldera para nuevamente utilizarlo. Es esencial la acción refrigeradora del condensador para todo el proceso de producción de energía, Figura 3.1.

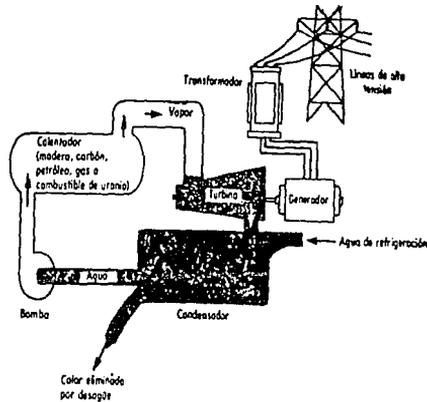


Figura 3.1 Generador de energía (esquemático) con la descarga del calor de desecho.

Cuando el calor se convierte en trabajo, la cantidad de trabajo producido dependerá de la diferencia de temperatura entre las partes caliente y fría de la máquina. Por lo tanto, se alcanza una máxima eficiencia cuando una sustancia muy caliente puede descargar su calor sobrante en un vertedero muy frío. Por ello, debe tomarse alguna medida para mantener un ambiente frío en un extremo de la máquina.

En la práctica el enfriamiento se logra al hacer circular agua alrededor del condensador. Se alcanza la máxima eficiencia con una corriente de vapor muy caliente y un condensador muy frío. El metal que forme a la turbina limita la temperatura a un máximo aproximado de 540°C. La temperatura más baja, depende del enfriador más barato, generalmente un río, un lago o el mar. Dentro de las restricciones de los límites antes indicados, es posible en teoría obtener una eficiencia del 60%, pero la variaciones no controladas de la temperatura del vapor y las pérdidas calóricas la reducen al 40%, aunque se empleen las mejores instalaciones. De esta manera, para cada 100 unidades de energía potencial en forma de combustible, se dispone de 40 unidades de energía eléctrica en forma de trabajo útil y se disipan 60 unidades de energía en el medio que rodea a la fuente de calor. Además, en virtud de que resulta muy costosa la refrigeración del condensador, un incremento mayor en la eficiencia requiere la utilización del vapor más caliente. Dado que la temperatura máxima está limitada por la capacidad de los metales para resistir las tensiones por calor, no se espera un aumento apreciable en la eficiencia.

La naturaleza y extensión de los problemas relacionados con la descarga de aguas de enfriamiento varían dependiendo del sitio, disponibilidad y el tipo de corriente receptora de los líquidos que pueden ser descargados. Cuando la ubicación de las planta generadoras permite disponer los desechos en agua salada, los problemas son minimizados, pero no del todo eliminados, debido a que la descarga en aguas costeras de cierto tipos de contaminantes de las aguas residuales está prohibido.

Davidson y Bradshaw ( 1967) informan que en plantas de vapor que utilizan carbón, 6000 BTU ó 1512 kcal de calor debe disiparse por medio de agua de enfriamiento en intercambiadores de calor para cada kW-h de electricidad generada.

En términos generales el diseño del condensador depende de la cantidad de agua de enfriamiento disponible y de la temperatura permisible del agua que retorna a la corriente.

El autor Cadwallader (1965) hace predicciones de los requerimientos de agua de enfriamiento en Estados Unidos en el período de 1959 a 1980 del que obtiene que el combinado incremento en la demanda de agua de ríos, lagos y agua de mar para propósitos de enfriamiento es aproximadamente del 300%; mientras que para el mismo período, se predijo que el agua de circulación a través de torres de enfriamiento se incrementa casi en 500%; siendo justificado un estudio de las necesidades de agua de enfriamiento.

Estudios de ingeniería en los Estados Unidos de plantas que generan energía utilizando condensadores de dos pasos ( sistemas cerrados), revelan que existe una relación directa entre la capacidad de la unidad en kW y los requerimientos de agua de circulación, lo anterior se puede observar en la Figura 3.2. La curva A muestra la relación entre la capacidad de la unidad en kW y los requerimientos de agua de circulación; la curva B muestra la relación entre la capacidad de la unidad en kW y la descarga de calor de desecho.

Por capacidad debe entenderse el tamaño de las unidades individuales de las que se compone la capacidad total de la planta, los requerimientos de agua de circulación corresponden a condiciones de verano. A medida que el tamaño de una unidad de generación disminuye, la carga de calor y los requerimientos de agua de circulación aumentan bruscamente. Para una capacidad grande ( por encima de los 200 000 kW) la carga de calor de desecho de unidades modernas se estabiliza a cerca de 4400 BTU/kW h ó 1108.8 kcal/kW h y los requerimientos de agua de circulación a cerca de 0.55 gpm/kW ó 0.035 l/s kW . Durante el periodo invernal los requerimientos del agua son del orden del 60% de los de verano.

Existe una tendencia a que las unidades de generación grandes alcancen los 350 a 750 MW. Pocas unidades que excedan los 750 MW son construidas. Alguna reducción en la tasa neta de calor ( que es la cantidad de combustible requerido para generar un kW-h) es obtenido con unidades más grandes.

Del calor neto por el combustible que entra, cerca del 40% es convertido en energía eléctrica, cerca del 50% es calor de desecho descargado en el agua de circulación del condensador y cerca del 10% es pérdida descargada a la atmósfera. De esta manera 4400 BTU/kW-h ó 1108.8 kcal/kW-h es un índice razonable de calor que es desechado a las corrientes por parte de las plantas modernas generadoras de energía eléctrica utilizando vapor generado con ayuda de combustibles fósiles.

La Figura 3.2 coincide con datos de operación recientes. Para instalaciones específicas la carga de calor de desecho puede determinarse a partir de registros de operación de la tasa de agua de enfriamiento que es bombeada, de la carga de energía y de la elevación de la temperatura a través de los condensadores.

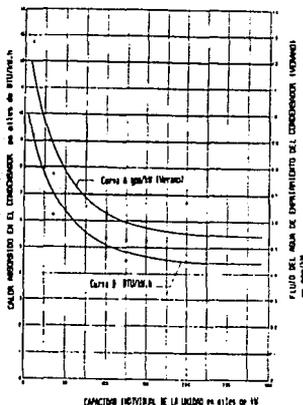


Figura 3.2 Características de los condensadores de una planta de energía que utiliza vapor a partir de combustible fósil ( condensadores de dos pasos ).

Las magnitudes de la carga de calor de desecho y de los requerimientos de agua para el condensador en una planta sencilla de 4000 mW de capacidad alimentada por combustible fósil con base en el índice de 4400 BTU/kW h ó 1108.8 kcal/kW h y 0.55 gpm/kW son 17.6 miles de millones de BTU/h ó 4435.2 x 10<sup>6</sup> kcal/h y 2.2 x 10<sup>6</sup> gpm ó 139000 l/s. El incremento en la temperatura de los 139000 l/s del agua del condensador para esta carga de calor podría ser de 16°F (9°C). El caudal antes mencionado representaría un río muy grande, durante el período más crítico del estiaje serían 0.1 pie<sup>3</sup>/s.millas<sup>2</sup> ó 1.09 l/s.km<sup>2</sup> que requerirían una área tributaria de drenaje de 4900 millas<sup>2</sup> ó 1892 km<sup>2</sup>. Si la temperatura del agua normal de verano bajo tales condiciones de estiaje es de 26.7°C y pasara todo el flujo de 139000 l/s a través de los condensadores, la temperatura del río en donde descarga la planta se elevaría a 35.6°C, es decir se tendría un incremento de casi 9°C.

Un ejemplo del caudal de aguas residuales de una planta generadora de energía eléctrica en el país es el que corresponde al Proyecto de la Central Termoeléctrica Valladolid. En el Cuadro 3.29 se muestran las características de la Central Valladolid.

Cuadro 3.29 Característica de la Central Termoeléctrica  
Valladolid

Tipo de agua residual que se genera durante la operación	Gasto [l/s]
Sanitarias y servicios generales	0.88
Aguas aceitosas	1.26
Aguas químicas	2.38
Purgas del sistema de enfriamiento	46.00

Se observa que el caudal de agua residual debida a las purgas del sistema de enfriamiento es casi 50 veces mayor que la generada por otros usos; en este caso lo efectos de la temperatura elevada sobre el cuerpo receptor no serán nocivos debido a que la descarga se realizará en un acuífero a una profundidad de 100 m donde el agua es salada y no se hace uso del mismo a ese nivel.

La generación de energía eléctrica a partir de centrales nucleoelectricas también produce aguas residuales contaminadas principalmente por calor de desecho producto de los procesos de enfriamiento que se llevan a cabo en este tipo de plantas; en el país únicamente se cuenta con una planta de estas características que es la Central Nucleoelectrica Laguna Verde ubicada en el Estado de Veracruz, que hasta 1990 ha tenido una generación bruta de 2937 GWh con una potencia instalada de 675 MW. La literatura menciona que la descarga de calor de desecho por unidad de producción de energía de una planta nucleoelectrica es más grande que la descarga de una planta termoelectrica. La diferencia se debe a la eficiencia más baja de las plantas nucleares; el flujo de agua de circulación del condensador así como el flujo de calor de desecho asociados con las plantas nucleares son aproximadamente 50% mayores que los flujos de plantas alimentadas por combustibles fósiles. Para mayor información con respecto a este tipo de plantas se sugiere consultar la bibliografía proporcionada en este trabajo.

### 3.10 Legislación para la prevención y control de la contaminación del agua en el país, a nivel federal

En México, al igual que en otros países en vías de desarrollo, la contaminación del agua presenta un panorama típico que se caracteriza por el incremento desmedido de volúmenes de contaminantes vertidos a los cuerpos de agua, debido al proceso de crecimiento demográfico y de industrialización, así como al incipiente control de los residuos ocasionados por los limitados recursos técnicos y económicos disponibles.

Como medida de solución, el Gobierno Federal publica el 21 de marzo de 1971 La Ley Federal de Protección al Ambiente y dos años después su Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación del agua, el cual establece que para poder descargar aguas residuales a algún cuerpo receptor se deben de fijar las condiciones particulares de descarga de acuerdo con la capacidad de asimilación y dilución de la corriente y de la clasificación que se haya hecho, en relación al uso de la misma.

La publicación de esta Ley y sus Reglamentos, conforman el primer intento formal del Gobierno Federal por atender la problemática ambiental en México.

Actualmente el control de la contaminación tiene su fundamento legal en la siguiente legislación:

- Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.
- Ley de Aguas Nacionales

También deben considerarse los siguientes documentos :

- Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección Ambiental. ( Antes Normas Técnicas Ecológicas )
- Criterios Ecológicos de Calidad del Agua.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente establece que todas las descargas de aguas residuales en ríos, cuencas, vasos y aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua deberán satisfacer las Normas Oficiales Mexicanas en materia de Protección Ambiental publicadas en el Diario Oficial de la Federación el 18 de octubre de 1993 y que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales municipales e industriales, a fin de asegurar una calidad del agua satisfactoria para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico.

Revisando las Normas Oficiales Mexicanas en las que se indican los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de distintas industrias y servicios se tiene que para el parámetro temperatura no hay un valor fijo que se deba cumplir, únicamente se indica en el apartado 5.3 de dichas normas relativo a las condiciones particulares de descarga, que la temperatura debe ajustarse a condiciones específicas de descarga, fijadas por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos a través de la Comisión Nacional del Agua, para las siguientes industrias:

---

Centrales termoeléctricas convencionales	NOM-CCA-001-ECOL/1993
Industria productora de caña	NOM-CCA-002-ECOL/1993
Industrias de refinación de petróleo y petroquímica	NOM-CCA-003-ECOL/1993
Industrias de fabricación de fertilizantes, excepto las que produzcan ácido fosfórico como producto intermedio	NOM-CCA-004-ECOL/1993
Industrias de fabricación de productos plásticos y polímeros sintéticos	NOM-CCA-005-ECOL/1993
Industria de fabricación de harinas	NOM-CCA-006-ECOL/1993
Industria de la cerveza y de la malta	NOM-CCA-007-ECOL/1993
Industria elaboradora de leche y sus derivados	NOM-CCA-009-ECOL/1993
Industria manufacturera de vidrio plano y de fibra de vidrio	NOM-CCA-010-ECOL/1993
Industria de productos de vidrio prensado y soplado	NOM-CCA-011-ECOL/1993
Industria hulera	NOM-CCA-012-ECOL/1993
Industria del hierro y acero	NOM-CCA-013-ECOL/1993
Industria textil	NOM-CCA-014-ECOL/1993
Industria de la celulosa y el papel	NOM-CCA-015-ECOL/1993

---

---

Industria de bebidas gaseosas	NOM-CCA-016-ECOL/1993
Industria de acabados metálicos	NOM-CCA-017-ECOL/1993
Industrias de laminación, extrusión y estiraje de cobre y sus aleaciones	NOM-CCA-019-ECOL/1993
Industria de asbestos textiles, ma- teriales de fricción y selladores	NOM-CCA-020-ECOL/1993
Industria elaboradora de papel a partir de celulosa virgen	NOM-CCA-024-ECOL/1993
Industria elaboradora de papel a partir de fibra celulósica reciclada	NOM-CCA-025-ECOL/1993
Restaurantes, hoteles	NOM-CCA-026-ECOL/1993
Industria de beneficio del café	NOM-CCA-027-ECOL/1993
Hospitales	NOM-CCA-029-ECOL/1993
Industria de jabones y detergentes	NOM-CCA-030-ECOL/1993

---

La Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-031-ECOL/1993 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales provenientes de la industria, actividades agroindustriales, de servicios y el tratamiento de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal, en su punto 5 relativo a las especificaciones indica que las descargas de aguas residuales provenientes de las actividades antes señaladas deben cumplir con las especificaciones que se presentan a continuación:

Parámetro	Límites Máximos Permisibles	
	Promedio diario	Instantáneo
Temperatura	-	40 °C (313K)
p H ( unidades de p H )	6 a 9	6 a 9
Sólidos Sedimentables (ml/l)	5	10
Grasas y aceites (mg/l)	60	100
Conductividad eléctrica (micromhos/cm)	5000	8000
Aluminio (mg/l)	10	20
Arsénico (mg/l)	0.5	1.0
Cadmio (mg/L)	0.5	1.0
Cianuros (mg/l)	1.0	2.0
Cobre (mg/l)	5	10
Cromo hexavalente (mg/l)	0.5	1.0
Cromo total ( mg/l)	2.5	5.0
Fluoruros (mg/l)	3	6
Mercurio (mg/l)	0.01	0.02
Níquel (mg/l)	4	8

Parámetro	Límites Máximos Permisibles	
	Promedio diario	Instantáneo
Plata [mg/l]	1.0	2.0
Ploino [mg/l]	1.0	2.0
Zinc [mg/l]	6	12
Fenoles [mg/l]	5	10
Sustancias Activas al Azul de Metileno [mg/l]	30	60

**Notas:**

Parámetro. Unidad de medición que al tener un valor determinado, sirve para mostrar de una manera simple las características principales de un contaminante.

Muestra simple. La que se tome ininterrumpidamente durante el periodo necesario para completar un volumen proporcional al caudal, de manera que éste resulte representativo de la descarga de aguas residuales medido en el sitio y en el momento del muestreo.

Muestra compuesta. La que resulta de mezclar varias muestras simples.

Límite máximo permisible promedio diario. Los valores, intervalos y concentraciones de los parámetros que debe cumplir el responsable de la descarga en función del análisis de muestras compuestas de las aguas residuales.

Límite máximo permisible instantáneo. Los valores, intervalos y concentraciones de los parámetros que debe cumplir el responsable de la descarga, en función del análisis de muestras instantáneas de las aguas residuales.

En el apartado 5.1 de la NOM-CCA-031-ECOL/1993 se indica que no se deberán descargar o depositar en los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal, sustancias o residuos considerados peligrosos en las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes, sustancias sólidas o pastosas que puedan causar obstrucciones al flujo en dichos sistemas, así como los que puedan solidificarse y precipitarse o aumentar su viscosidad a temperaturas entre 5°C ( 278 K ) a 40°C (313 K ) o lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales.

En la NOM-CCA-031-ECOL/1993 se establece en el apartado 5.3 de condiciones particulares de descarga que los siguientes parámetros se deberán ajustar a las indicaciones de la SARH por medio de la CNA: color, fósforo total, sulfuros, nitrógeno total, alcalinidad/acidez, sólidos disueltos totales, tóxicos orgánicos, D Q O, D B O, sólidos suspendidos totales, metales pesados (no incluidos con anterioridad), hidrocarburos no incluidos en tóxicos orgánicos.

Otras definiciones que asume la Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-031-ECOL/1993

Aguas residuales de actividades agroindustriales. Las que provienen de las actividades de la elaboración de alimentos, crianza y reproducción ganadera, porcícola, avícola y establos.

Aguas residuales de los servicios. Proviene de servicios de reparación y mantenimiento automotriz, gasolineras, tintorerías, lavanderías, baños públicos, hospitales, hoteles, restaurantes, revelado de fotografías, etc.

Aguas residuales industriales. Proviene de procesos de extracción, beneficios, transformación o generación de bienes de consumo o de actividades complementarias.

En la Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-032-ECOL/1993 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola; se especifica en su apartado 5.2 de condiciones particulares de descarga que la temperatura, entre otros parámetros, debe ajustarse a lo que establezca la SARH a través de la CNA.

De acuerdo con el artículo 119 para la prevención y control de la contaminación del agua, del Título IV, Capítulo II denominado Prevención y Control de la Contaminación del Agua y de los Sistemas Acuáticos de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, algunas acciones que corresponden a la Secretaría de Desarrollo Social son las siguientes:

- Expedir en coordinación con la SARH y las demás autoridades competentes las Normas Técnicas para el vertimiento de aguas residuales en redes colectoras, cuencas, cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, así como para infiltrarlas en terrenos.

- Expedir las Normas Técnicas Ecológicas ( actualmente Normas Oficiales Mexicanas ) a las que se sujetará el almacenamiento de las aguas residuales con la intervención que en su caso compete a otras dependencias.

- Fijar las condiciones particulares de descarga cuando se trata de aguas residuales generadas en bienes y zonas de jurisdicción federal y de aquellas vertidas directamente en aguas de propiedad nacional.

- Fijar condiciones particulares de descarga a quienes generan aguas residuales captadas por sistemas de alcantarillado, cuando dichos sistemas verten sus aguas en cuencas, ríos, cauces, vasos y demás depósitos o corrientes de aguas de propiedad nacional, sin observar las Normas Técnicas Ecológicas o en su caso, las condiciones particulares de descarga.

En las Normas Técnicas Ecológicas que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales de origen industrial en cuerpos de agua (Vol I y II) publicadas por la antes SEDUE, hoy SEDESOL, se indica que el límite máximo permisible de temperatura es de 35°C para las aguas residuales de las siguientes industrias de proceso:

Industria química básica ( inorgánica ), petroquímica básica, petroquímica secundaria, resinas sintéticas, hule sintético y hules químicos, de adhesivos, de plaguicidas, de fertilizantes, de colorantes y pigmentos, de jabones y detergentes, farmacéutica, curtiduría.

El valor antes indicado así como el de los demás límites permisibles se obtuvo tomando promedios considerando una eficiencia global de la industria del 90% y una dilución de 1 a 2 por presencia de agua residual doméstica.

Si bien 35°C puede ser un valor alto para muchos organismos, al ocurrir la dilución en una relación 1 a 2, dará una temperatura promedio entre 15°C y 20°C.

El valor de 35°C como límite máximo permisible para la temperatura de una descarga de agua residual, también se consideraba en el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación del Agua, en su artículo 13 en el que se indicaba que los responsables de las descargas de aguas residuales no arrojadas en el alcantarillado de las poblaciones deberían ajustarlás en un plazo de tres años a partir del registro de la misma a los siguientes parámetros:

Máximos Tolerables	
Parámetro	Concentración
I. Sólidos Sedimentables	1.0 ml/l
II. Grasas y aceites	70 mg/l
III. Materia flotante	Ninguna que pueda ser retenida por malla de 3 mm de claro libre cuadrado
IV. Temperatura	35°C
V. Potencial Hidrógeno p H	4.5 - 10.0

El 13 de diciembre de 1989 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación (y en la Gaceta Ecológica No.6, enero de 1990) los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua en los que se precisan los niveles de los parámetros y de las sustancias que se encuentran en el agua o sus efectos como son el color, olor o sabor, p H y niveles permisibles, con estos valores las autoridades podrán calificar a los cuerpos de agua como aptos para ser utilizados como fuente de abastecimiento de agua potable, en actividades recreativas con contacto primario, riego agrícola, para uso pecuario, para uso de la acuicultura, o bien para desarrollo y conservación de la vida acuática. Dichos parámetros constituyen la calidad mínima requerida para el uso o aprovechamiento del agua en los casos mencionados.

En el Cuadro 3.30 se mencionan los valores de temperatura requeridos en el cuerpo de agua en estudio para considerarse apto para los diferentes usos, con base en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua.

Cuadro 3.30 Valores de temperatura requeridos en el cuerpo de agua en estudio para diferentes usos con base en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua

Uso	Temperatura [°C]
Fuente de Abastecimiento de Agua Potable	Condiciones naturales + 2.5°C
Recreativo con contacto primario	-
Riego agrícola	-
Pecuario	-
Protección de la vida acuática	
Agua dulce	Condiciones naturales + 1.5°C
Aguas marinas (áreas costeras)	Condiciones naturales + 1.5°C

Para la acuicultura se tienen los siguientes ámbitos de temperatura: \*

Especie	Temperatura (°C)
Tilapia	24-30
Carpa	20-30
Bagre	20-30
Trucha arcoiris	10-15
Langostino	18-34
Camarón	26-30

Si existen descargas de aguas residuales a un cuerpo receptor al que se le pretende dar un uso específico, la temperatura de la descarga debe ser tal que al ocurrir la dilución se cumpla con los límites permisibles indicados por los criterios ecológicos.

## Capítulo 4

## Capítulo 4

**APLICACION DE UN MODELO PARA LA DETERMINACION CUANTITATIVA DE LA DISIPACION DEL CALOR EN CUERPOS RECEPTORES**

La naturaleza polar de la molécula del agua y sus propiedades termodinámicas la hacen un elemento muy adecuado para la transferencia de calor de un sistema a otro.

Se presentan en este capítulo los procesos relacionados con el fenómeno de transferencia de calor así como algunas propiedades termodinámicas del agua, un modelo basado en un balance de energía para la determinación cuantitativa de la disipación del calor en cuerpos de agua receptores, además de un ejemplo de aplicación del mismo.

**4.1 Fenómeno térmico**

El fenómeno térmico juega un papel importante en la naturaleza, teniendo efectos más significativos en los sistemas acuáticos. Los cambios que ocurren en la temperatura del agua y en los parámetros de calidad del agua relacionados con ésta pueden afectar de manera importante los usos benéficos del agua.

El fenómeno térmico de principal importancia en un entorno acuático incluye los procesos de transporte de energía: conducción, convección, y radiación; así como los procesos de transformación de la energía como es la evaporación.

El contenido de energía térmica de un material se forma a partir de dos tipos de energía: calor sensible y calor latente.

El calor sensible se define como aquel que cuando es ganado o perdido por un cuerpo se refleja en un cambio de temperatura del cuerpo.

El calor sensible se calcula multiplicando el calor específico de un material por su temperatura, ecuación 4.1 .

$$Q_s = C_p m \Delta T \quad \dots \quad (4.1)$$

Donde:

$Q_p$  = calor sensible [ C ]

$c_p$  = calor específico a presión constante

$$c_p = \frac{\text{Calor}}{\text{masa} \cdot (\text{cambio de temp. del material})}$$

$m$  = masa del material [ M ]

$\Delta T$  = Cambio de temperatura del material [ T ]

El calor específico a veces también llamado capacidad calorífica de una sustancia, es la cantidad de energía requerida para elevar la temperatura de una unidad de masa en un grado.

A temperaturas normales ( de 0 a 100 °C ) el calor específico del agua es aproximadamente 1 cal/g.°C. Este valor indica lo grande de la capacidad calorífica de este líquido; cuando un gramo de agua absorbe una caloría ( cantidad de energía calórica) del sistema que va a enfriar, su temperatura aumenta sólo un grado Celsius a temperaturas normales.

El calor latente es aquel requerido para traer consigo un cambio de estado sin que ocurra un cambio de temperatura. Debido a que muchos cambios de estado tienen que ver con cálculos de calor referidos a la transición de un líquido a gas, es bastante empleado el término calor latente de vaporización.

Las cantidades de calor latente pueden calcularse con la expresión 4.2 .

$$Q_1 = \lambda m \quad \dots \quad ( 4.2 )$$

Donde:

$Q_1$  = calor latente [ C ]

$\lambda$  = calor latente unitario [ C M<sup>-1</sup> ]

$m$  = masa del material que cambia de estado [ M ]

Al igual que el calor específico, el calor latente es función de la temperatura.

A temperaturas normales ( 0 a 100°C ), el calor latente unitario de vaporización del agua es aproximadamente de 600- 0.6 T cal/g , donde T es la temperatura en grados Celsius a la cual ocurre el cambio de estado.

En un balance de energía térmica, es necesario considerar el contenido de energía de cada componente del sistema. Debido a que es imposible evaluar el contenido total de energía de un material, se selecciona un dato conveniente de temperatura y la energía total se calcula como la suma del calor sensible y latente obtenidos a partir de las expresiones 4.1 y 4.2 antes indicadas con la temperatura elegida como dato.

## 4.1.1 Conducción

La transferencia de calor por conducción involucra la transmisión de energía a través del movimiento molecular, la moléculas manteniendo su posición relativa y transfiriendo únicamente su energía. El flujo de calor de un extremo a otro de una barra metálica proporciona un ejemplo de transferencia de calor por conducción. La rapidez con que la energía térmica es transportada por conducción a través de una unidad de área de un material es proporcional al gradiente de temperatura, ecuación 4.3 .

$$B_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad \dots \quad (4.3)$$

Donde:

$B_x$  = tasa de transporte de energía térmica en la dirección x a través de un área unitaria normal a x [ C t<sup>-1</sup> L<sup>-2</sup> ]

$\frac{\partial T}{\partial x}$  = gradiente de temperatura en la dirección x [ T L<sup>-1</sup> ]

k = conductividad térmica [ C t<sup>-1</sup> L<sup>-1</sup> T<sup>-1</sup> ]

Si el gradiente de temperatura no varía con el tiempo, la rapidez o tasa de transporte de energía a través del material permanece constante y la ecuación 4.3 se puede escribir:

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad \dots \quad (4.4)$$

separando variables :

$$q dx = -k dT$$

integrando :

$$q \int dx = -k \int dT$$

se obtiene:

$$q = \frac{k}{x} \Delta T$$

donde:

q = flujo de energía térmica por unidad de tiempo [ C t<sup>-1</sup> L<sup>-2</sup> ]

$\Delta T$  = disminución de la temperatura a través del material [ T ]

La conductividad térmica es una propiedad del material a través del cual es conducida la energía y depende de su temperatura. En general, la variación de la conductividad es lineal con la temperatura; por ello se puede utilizar un promedio aritmético de las conductividades en ambos lados del material en la ecuación antes indicada.

En sistemas acuáticos el transporte térmico a través del movimiento molecular es probablemente insignificante comparado con el transporte que resulta de la ocurrencia de la turbulencia; en consecuencia para tener una representación cercana a la realidad de la conductividad térmica, se puede considerar para estos sistemas un término de dispersión.

#### 4.1.2 Convección

La transmisión de energía térmica por medio de mezclado o turbulencia es llamada convección. Debido a que las moléculas de los sólidos están relativamente fijas y no pueden moverse unas con respecto a otras, la convección se limita a los fluidos, donde ésta representa la mayor porción de la energía térmica transportada. La convección puede ser forzada o natural, dependiendo de si es inducida por agitación, mezclado o bombeo, o un fenómeno natural. A continuación se comentará la convección natural.

Cuando se toma en cuenta la convección en un sistema aire-agua, es conveniente considerar una película viscosa ficticia de aire como la existente en la interfase. El flujo de la energía térmica a través de la película se puede pensar como un proceso conductivo al cual la película proporciona la mayor resistencia al transporte térmico. Cuando el gradiente de temperatura permanece constante con el tiempo, el transporte de calor por convección puede representarse con la ecuación 4.5.

$$q_h = h \Delta T \quad \dots \quad (4.5)$$

Donde:

$q_h$  = flujo de energía térmica causado por convección [ C t<sup>-1</sup> L<sup>-2</sup> ]

$h$  = coeficiente de transferencia de calor [ C t<sup>-1</sup> L<sup>-2</sup> T<sup>-1</sup> ]

$\Delta T$  = disminución de la temperatura a través de la película [ T ]

El coeficiente de transferencia de calor  $h$  incluye no únicamente las propiedades internas de la película viscosa de aire, sino también su espesor. Cualquier turbulencia en el aire sobre la interfase puede considerarse que reduce su espesor y esto incrementa el valor del coeficiente  $h$ . En la realidad este concepto de la película es una suposición y no hay evidencia de que tal película exista.

Cuando se emplean datos meteorológicos para evaluar el transporte de energía térmica a través de una interfase aire-agua, la ecuación se puede escribir como:

$$q_h = C U_a (T_a - T_w) \dots (4.6)$$

donde:

$q_h$  = flujo de energía térmica causado por convección  
[ C t<sup>-1</sup> L<sup>-2</sup> ]

$U_a$  = velocidad del viento [ L t<sup>-1</sup> ]

$T_a$  = temperatura del aire , bulbo húmedo [ T ]

$T_w$  = temperatura del aire , bulbo seco [ T ]

$C$  = constante [ C L<sup>-3</sup> T<sup>-1</sup> ]

El flujo convectivo de energía térmica puede ser positivo o negativo dependiendo de la diferencia de temperatura entre el aire y el agua.

### 4.1.3 Evaporación

Cuando el agua y el aire están en contacto, algunas de las moléculas del agua tienen la suficiente energía para desprenderse de la superficie del agua y escapar al aire como vapor; al mismo tiempo, algunas de las moléculas de agua en el aire penetran en la superficie del agua para formar parte de la fase líquida. La evaporación es la tasa neta a la cual el agua líquida es transferida al aire. La Figura 4.1 ilustra el proceso evaporativo en una situación donde el aire poco saturado es sustituido continuamente a través de la superficie de agua por más aire, permaneciendo constantes la temperatura del aire y la humedad .

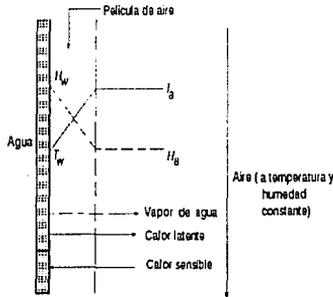


Figura 4.1 Evaporación en la superficie libre del agua

Asumiendo que la superficie del agua está a la temperatura del aire al inicio, la evaporación reduce inicialmente el calor sensible del agua. Al mismo tiempo, la diferencia resultante entre la temperatura del aire y la del agua provoca que energía térmica fluya del aire al agua. A medida que la evaporación continúa, la diferencia de temperatura llega a ser cada vez más grande hasta que se alcanza un gradiente en el que el flujo de la energía térmica del aire iguala a aquel que es liberado del agua a través de la evaporación. La temperatura, llamada la temperatura de bulbo húmedo, permanecerá constante.

Bajo condiciones establecidas la tasa o rapidez a la cual la energía térmica es removida a través de la evaporación puede ser encontrada a partir de la expresión:

$$Q_e = m_e \lambda_{T_w} \dots (4.7)$$

donde:

$q_e$  = flujo de energía térmica causado por la evaporación  
[ C t<sup>-1</sup> L<sup>2</sup> ]

$m_e$  = masa del agua evaporada por unidad de tiempo  
[ M t<sup>-1</sup> L<sup>2</sup> ]

$\lambda_{T_w}$  = calor latente de vaporización a temperatura de bulbo húmedo. [ C M<sup>-2</sup> ]

La tasa a la que el agua es evaporada puede determinarse de una expresión desarrollada para el concepto en el cual la tasa de difusión del vapor de agua es controlada por una película ficticia de aire en la interfase aire - agua:

$$W_e = K_G M_v (\bar{p}_w - \bar{p}_a) \dots (4.8)$$

donde:

$K_G$  = coeficiente de transferencia de masa, fase gaseosa.  
[ m t<sup>-1</sup> L<sup>2</sup> ]

$M_v$  = masa molecular del agua [ M m<sup>-1</sup> ]

$\bar{p}_w$  = presión de vapor del agua a temperatura de bulbo húmedo

$\bar{p}_a$  = presión parcial del vapor de agua en el aire

Sustituyendo la ecuación 4.8 en la ecuación 4.7, se tiene:

$$q_e = K_G M_v \lambda_{T_w} (\bar{p}_w - \bar{p}_a)$$

El coeficiente de transferencia de masa, como el coeficiente de transferencia de calor, está influenciado por la turbulencia en la fase del aire; varias relaciones semiempíricas han sido desarrolladas relacionando el flujo de energía térmica resultante de la evaporación a la velocidad del viento. Estas relaciones tienen la forma:

$$q_e = C \lambda_{T_w} U_a (\bar{p}_w - \bar{p}_a) \dots (4.8')$$

donde:

C = constante [ C L<sup>-3</sup> ]

U<sub>a</sub> = velocidad del viento [ L t<sup>-1</sup> ]

La constante generalmente se determina de estudios de pérdidas de agua para la situación particular de interés.

#### 4.1.4 Radiación

Dos tipos de radiación son de interés : la radiación solar ( o de onda corta ) y la radiación de onda larga. La cantidad de radiación solar incidiendo sobre una superficie horizontal variará dependiendo de la localización geográfica, la elevación, la estación y las condiciones meteorológicas. Las observaciones de la intensidad de la radiación solar son realizadas en diversas estaciones del U.S. Water Bureau en Estados Unidos. Los valores de energía de la porción visible de la radiación solar ( de 40000 a 70000 nm ) a ser esperadas en varias latitudes en el Hemisferio Norte durante el año son presentados en el Cuadro 4.1. Correcciones que se deben hacer por la elevación y nubosidad, se indican abajo del Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1 Valores probables de la energía solar visible en función de la latitud y el mes

LATITUD		MES											
		EN	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGT	SEP	OCT	NOV	DIC
0	max	255+	266	271	266	249	236	238	252	269	265	256	253
	min	210	219	206	188	182	103	137	167	207	203	202	195
10	max	223	244	264	271	270	262	265	266	266	248	228	225
	min	179	184	193	183	192	129	158	176	196	181	176	162
20	max	183	213	246	271	284	284	282	272	252	224	190	182
	min	134	140	168	170	194	148	172	177	176	150	138	120
30	max	136	176	218	261	290	296	289	271	231	192	148	126
	min	76	96	134	151	184	163	178	166	147	113	90	70
40	max	80	130	181	181	286	298	288	258	203	152	95	66
	min	30	53	95	125	162	173	172	147	112	72	42	24
50	max	28	70	141	210	271	297	280	236	166	100	40	26
	min	10	19	58	97	144	176	155	125	73	40	15	7
60	max	7	32	107	176	249	294	268	205	126	43	10	5
	min	2	4	33	79	132	174	144	100	38	26	3	1

\* De acuerdo con W.J. Oswald y H.B. Goetas, Photoynthesis in Sewage Treatment, Cuadro II, ASCE, Vol 8<sub>2</sub>, mayo de 1955.

+ Valores de S en Langley's = cal/cm<sup>2</sup> d

Corrección por nubosidad:

Corrección por elevación arriba de 10 000 pie :

$$S_c = S_{min} + r(S_{max} - S_{min})$$

$$S_c = S ( 1 - 0.01e )$$

donde:

r = horas totales de brillo del sol/horas totales posibles de brillo de sol

e = elevación en pie

La intensidad de la radiación de onda corta  $q_{r0}$  se reduce a medida que ésta pasa a través de un medio absorbente. La reducción en la intensidad puede pronosticarse por la ley de Beer :

$$I = I_0 e^{-ay} \quad \dots \quad (4.9)$$

donde:

$I_0$  = intensidad inicial [  $C t^{-1}$  ]

$a$  = coeficiente de absorción [  $L^{-1}$  ]

$y$  = distancia entre los puntos donde las intensidades son  $I_0$   
e  $I$  [  $L$  ]

El coeficiente de absorción  $a$  varía con la longitud de onda de la radiación y la naturaleza del medio absorbente. La presencia de sustancias disueltas y suspendidas en el medio absorbente incrementa el valor del coeficiente.

Todos los materiales a temperaturas por arriba del cero absoluto emiten energía como radiación electromagnética de onda larga. La radiación, formada por las longitudes de onda predominantemente en la región infrarroja del espectro, viaja en líneas rectas hasta que choca con otros materiales. Las sustancias reciben la radiación ya sea reflejándola, transmitiéndola o absorbiéndola. Esta porción de la radiación absorbida es convertida a energía térmica. Continuamente, el cuerpo radiado está emitiendo radiación de sí mismo a otros materiales. Existe un intercambio continuo de radiación entre todos los cuerpos que están cerca unos con otros.

La energía emitida por una superficie plana está dada por la expresión:

$$q_{r1} = \epsilon \sigma T_A^4 \quad \dots \quad (4.10)$$

donde:

$q_{r1}$  = flujo de energía térmica causada por la radiación de  
onda larga [  $C t^{-1} L^{-2}$  ]

$\epsilon$  = capacidad de emitir

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann [  $C t^{-1} L^{-2} T^{-4}$  ]

$T_A$  = temperatura absoluta del cuerpo [  $T$  ]

La capacidad de emitir  $\epsilon$  es el ratio de la energía emitida por la superficie en cuestión a la energía emitida por la superficie de un cuerpo negro, un material hipotético que absorbe el 100 por ciento de la radiación incidente. Debido a que el valor de  $q_{r1}$  es proporcional a energía de la temperatura absoluta elevada a la cuarta, un pequeño incremento en la temperatura de la superficie del agua incrementa grandemente la cantidad de radiación emitida.

La pérdida neta de energía térmica para una superficie de agua es igual a la diferencia entre la energía emitida por la superficie y la energía absorbida de la atmósfera:

$$q_{r1} = \sigma (\epsilon T_A^4 - \alpha T_{Aa}^4) \dots (4.11)$$

donde:

$\alpha$  = capacidad de absorción de la atmósfera

$T_{Aa}$  = temperatura absoluta del aire

#### 4.1.5 Regímenes térmicos

Dos tipos de regímenes térmicos resultan de las interacciones entre superficie de aguas y parámetros meteorológicos: el completamente mezclado o régimen homogéneo y el estratificado o régimen heterogéneo. El régimen homogéneo, que ocurre en corrientes, está caracterizado por el hecho de que no existe un gradiente vertical de temperatura; el régimen heterogéneo, que ocurre en lagos o depósitos de agua existentes en zonas templadas del planeta, se caracteriza por la existencia de un gradiente vertical de temperatura; como se observa en la Figura 4.2 .

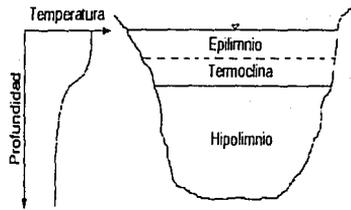


Figura 4.2 Estratificación de verano en lagos

## 4.2 Planteamiento del balance de energía térmica

Una buena aproximación a la determinación de la disipación del calor se basa en el establecimiento del principio de conservación de la energía que establece que:

$$\text{Energía Acumulada} = \text{Energía}_{\text{que entra}} - \text{Energía}_{\text{que sale}}$$

Una investigación detallada de varios términos del balance de energía del agua relacionados con parámetros meteorológicos se realizó en Lago Hefner, Oklahoma con el propósito inicial de hacer determinaciones de la evaporación en la superficie del agua. El estudio llevó a la obtención de datos básicos sobre pérdida de calor sin embargo, las mediciones micrometeorológicas impidieron aplicaciones generales basadas en registros de rutina del U.S. Weather Bureau.

Langhaar propuso un método para predecir las pérdidas de calor de lagunas de enfriamiento basándose en relaciones del balance de energía y en registros convencionales del U.S. Weather Bureau; su método permite un cálculo directo sin depender de mediciones de la temperatura del agua; algunas modificaciones a los planteamientos básicos de Langhaar permiten la determinación de las probabilidades de ocurrencia de registros meteorológicos a largo plazo utilizados.

En el planteamiento del balance de energía, cuatro mecanismos principales de la superficie del agua están involucrados en la transferencia de calor y cambio de temperatura cuando un cuerpo de agua está expuesto a la atmósfera. El calor es perdido a través de la evaporación, convección, radiación y ganado a través de la radiación solar. El calor se puede también transferir a la tierra cercana existente por contacto e infiltración, pero en muchas corrientes, lagos o depósitos impermeables esta pequeña pérdida se puede despreciar. En lagos y depósitos puede existir transferencia de calor asociada con influentes o efluentes del cuerpo acuático.

El balance de calor se representa como:

$$H = H_e + H_c + H_r - H_s - H_a \quad \dots \quad (4.12)$$

donde:

H es la pérdida neta de calor

$H_e$  es el calor perdido por evaporación

$H_c$  es el calor perdido por convección

$H_r$  es el calor perdido por radiación

$H_s$  es el calor ganado por radiación solar

$H_a$  es la transferencia neta por influentes o efluentes del cuerpo acuático.

Las pérdidas de calor por evaporación, convección y radiación pueden calcularse a partir de mediciones meteorológicas de la temperatura del aire, velocidad del viento y la presión de vapor.

## 4.2.1 Pérdida por evaporación

La pérdida de calor por evaporación ( $H_e$ ) se puede calcular con la fórmula de Meyer, que tiene amplia aceptación en la ingeniería práctica y es aplicable ya que está basada en observaciones de rutina del U.S. Weather Bureau. La fórmula de Meyer para la evaporación en cuerpos naturales de agua, expresada en pulgadas por mes es:

$$I = C_1 (1 + 0.1W) (V_w - V_a) \quad \dots \quad (4.13)$$

donde:

I = Evaporación del agua en plg/mes

W = velocidad del viento en millas por hora medida cerca de 25 pie por arriba de la superficie del agua o por arriba del área de tierra de los alrededores.

$V_w$  = es la presión de vapor de agua en pulgadas de mercurio correspondiente a la temperatura de la superficie del agua tomada cerca de un pie bajo la superficie.

$V_a$  = presión absoluta de vapor de agua prevaleciente en la capa de la atmósfera 25 pie por arriba de la superficie del agua o por arriba del área de tierra de los alrededores, en pulgadas de mercurio.

$C_1$  = constante que va de 10 a 15, dependiendo de la profundidad y exposición del cuerpo de agua y de la frecuencia de las mediciones meteorológicas.

Para lagos y depósitos de gran profundidad,  $C_1$  se toma cerca del valor más bajo y para lagos someros y acumulaciones superficiales  $C_1$  se toma como 15.

Para corrientes de profundidad y velocidad moderada,  $C_1$  se toma como 14.

Utilizando el calor latente de vaporización  $H_v$  para la temperatura del agua dada, la evaporación I en pulgadas por mes se convierte en pérdida de calor por evaporación en BTU/h pie<sup>2</sup> de superficie de agua mediante la expresión:

$$H_e = 0.00722 H_v C_1 (1 + 0.1W) (V_w - V_a) \quad \dots \quad (4.14)$$

Tabulaciones abreviadas del calor latente de vaporización  $H_v$  y la presión de saturación del vapor de agua  $V_a$  se presentan en los Cuadros 4.2 y 4.3 respectivamente.

Cuadro 4.2 Calor latente de vaporización  $H_V$ <sup>1</sup>

$T$ (°F)	$H_V$ (BTU/lb)	$T$ (°F)	$H_V$ (BTU/lb)
32	1075.8	100	1037.2
35	1074.1	105	1034.3
40	1071.3	110	1031.6
45	1068.4	115	1028.7
50	1065.6	120	1025.8
55	1062.7	125	1022.9
60	1059.9	130	1020.0
65	1057.1	135	1017.0
70	1054.3	140	1014.1
75	1051.5	145	1011.2
80	1048.6	150	1008.2
85	1045.8	155	1005.2
90	1042.9	160	1002.3
95	1040.1	165	999.3

<sup>1</sup> De acuerdo con Keenan y Keyes.

Cuadro 4.3 Presión de saturación del vapor de agua con humedad relativa = 100%  $v_a^1$  en pulgadas de mercurio

Temp. del aire [°F]	$v_a$ [plg Hg]	Temp. del aire [°F]	$v_a$ [plg Hg]	Temp. del aire [°F]	$v_a$ [plg Hg]	Temp. del aire [°F]	$v_a$ [plg Hg]
30	0.164	60	0.517	90	1.408	120	3.425
31	0.172	61	0.526	91	1.453	121	3.522
32	0.180	62	0.555	92	1.499	122	3.621
33	0.187	63	0.575	93	1.546	123	3.723
34	0.195	64	0.595	94	1.595	124	3.827
35	0.203	65	0.616	95	1.645	125	3.933
36	0.211	66	0.638	96	1.696	126	4.042
37	0.219	67	0.661	97	1.749	127	4.154
38	0.228	68	0.684	98	1.803	128	4.268
39	0.237	69	0.707	99	1.859	129	4.385
40	0.247	70	0.732	100	1.916	130	4.504
41	0.256	71	0.757	101	1.975	131	4.627
42	0.266	72	0.783	102	2.035	132	4.752
43	0.277	73	0.810	103	2.097	133	4.880
44	0.287	74	0.838	104	2.160	134	5.011
45	0.298	75	0.866	105	2.225	135	5.145
46	0.310	76	0.896	106	2.292	136	5.282
47	0.322	77	0.926	107	2.360	137	5.422
48	0.334	78	0.957	108	2.431	138	5.565
49	0.347	79	0.989	109	2.503	139	5.712
50	0.360	80	1.022	110	2.576		
51	0.373	81	1.056	111	2.652		
52	0.387	82	1.091	112	2.730		
53	0.402	83	1.127	113	2.810		
54	0.417	84	1.163	114	2.891		
55	0.432	85	1.201	115	2.975		
56	0.448	86	1.241	116	3.061		
57	0.465	87	1.281	117	3.148		
58	0.482	88	1.322	118	3.239		
59	0.499	89	1.364	119	3.331		

1 De acuerdo con Meyer.

#### 4.2.2 Pérdida por convección

La pérdida de calor por convección depende de la diferencia de temperatura entre el agua y el aire y de la velocidad del viento en la superficie del agua. En aire sin mucho movimiento, la pérdida por convección de una superficie plana varía de 0.5 BTU/h pie<sup>2</sup> para una diferencia de temperatura de pocos grados a 1.0 BTU/h pie<sup>2</sup> para diferencias de temperatura de 50 a 100°F (es decir de 32.4 a 122.4°C); un valor adecuado a utilizar es 0.8 Btu/h pie<sup>2</sup> °F. Cuando se reporta movimiento del aire en la superficie se incrementa la cantidad antes indicada por un coeficiente C<sub>2</sub> de 0.16 a 0.32 por cada milla/h de velocidad del viento. Para un cuerpo de agua prácticamente sin movimiento, Langhaar sugiere un valor promedio de 0.24. Para corrientes de velocidad moderada un valor más alto, aproximadamente de 0.32 puede ser razonable. El factor más grande de incertidumbre es la conversión de los registros para la velocidad del viento en la superficie del agua. La velocidad del viento puede variar ampliamente con la elevación de los instrumentos de registro por arriba de la superficie. Varias relaciones están propuestas para corregir al nivel de superficie; muy importante es la exposición relativa, que es un factor sumamente variable y es difícil de evaluar.

En la aplicación práctica la velocidad en la superficie puede tomarse como la mitad de la registrada en estaciones climatológicas.

La pérdida por convección para una superficie de agua está dada por:

$$H_c = (0.8 + C_2 \frac{W}{2}) (T_w - T_a) \quad \dots (4.15)$$

donde:

H<sub>c</sub> = Pérdida por convección en BTU/h pie<sup>2</sup>

T<sub>w</sub> = temperatura de la superficie del agua en °F

W = velocidad del viento en millas/h

T<sub>a</sub> = temperatura del aire en °F

C<sub>2</sub> = coeficiente de corrección por movimiento del aire en BTU/milla pie<sup>2</sup> °F

### 4.2.3 Pérdida por radiación

La pérdida de calor por radiación de la superficie del agua es prácticamente equivalente a aquella de un cuerpo negro. La pérdida por radiación en BTU/pie<sup>2</sup> h se puede calcular por medio de la ley de Stephan Boltzmann de:

$$H_r = 0.173 \times 10^{-8} (T_w + 460)^4$$

Contrario a esta pérdida de calor, el agua recibe radiación de la atmósfera y del terreno en cantidades que varían. Suponiendo que los objetos alrededor están a la misma temperatura del aire, Langhaar sugiere una aproximación de la pérdida neta por radiación para temperatura ordinaria como simplemente la diferencia de temperatura entre la superficie del agua y el aire.

$$H_r = (T_w - T_a) \quad \dots \quad (4.16)$$

### 4.2.4 Ganancia por radiación solar

La ganancia de calor de la radiación solar, directa y difusa, no se puede calcular por medio de factores meteorológicos y debe ser estimada o preferentemente medida. La medición debe incluir tanto la directa como la difusa o dispersa, radiación del cielo recibida por día sobre una superficie horizontal. La radiación difusa en relación al total varía radicalmente, dependiendo de la capa de nubes, vapor de agua, contaminación del aire, y sombras del follaje existente. En sitios a grandes elevaciones la radiación total es alta, y la radiación difusa del cielo sin nubes puede ser tan baja como el 5 por ciento del total; en regiones nubladas y alturas bajas la radiación total se reduce y la fracción difusa puede constituir más del 40 por ciento. En zonas altamente industrializadas y centros urbanos, la contaminación atmosférica, a veces prácticamente elimina la radiación directa y el componente principal es la fracción difusa. A lo largo de pequeñas corrientes, la sombra de los árboles puede reducir la fracción directa y la radiación total puede estar muy por debajo de los valores para corrientes grandes y cuencas abiertas.

Por lo tanto estimando  $H_0$  de un máximo posible brillo del sol; las cargas a evaluar que son muy altas, así como la cobertura local del cielo reduce radicalmente la radiación directa que alcanza la superficie del agua. El coeficiente de absorción de la superficie del agua es elevado, sobrepasando el 95 por ciento; en consecuencia el factor de control es la cobertura local del cielo.

### 4.3 Modelo para calcular la temperatura de equilibrio del agua

Un cuerpo de agua expuesto a una serie dada de condiciones meteorológicas con el tiempo llegará a alcanzar el equilibrio: las pérdidas de calor por evaporación, convección y radiación balancearán la ganancia de calor de la radiación solar. Bajo condiciones de equilibrio la pérdida neta de calor es igual a cero ( $H = 0$ ) y asumiendo que no hay transferencia neta por influentes o efluentes, de la ecuación obtenida del balance de energía antes planteada se obtiene:

$$H_e + H_c + H_r = H_s \quad \dots (4.17)$$

Bajo esas condiciones la temperatura del agua se aproximará también al equilibrio. Esta temperatura límite es a la que se le llama temperatura de equilibrio E y puede calcularse a partir de las mediciones de las condiciones meteorológicas prevalecientes en el sitio de la manera siguiente:

Sustituyendo las tres expresiones de pérdida de calor en la ecuación 4.1 se tiene lo siguiente:

$$H = 0.00722 H_v C_1 (1 + 0.1 W) (V_w - V_a) + (0.8 + C_2 \frac{W}{2}) (T_w - T_a) + (T_w - T_a) - H_s \quad \dots (4.18)$$

En el equilibrio :

$$H = 0, \quad T_w = E \quad \text{y} \quad V_w = V_g$$

Sustituyendo :

$$0 = 0.00722 H_v C_1 (1 + 0.1W) (V_E - V_a) + (0.8 + C_2 \frac{W}{2}) (E - T_a) + (E - T_a) - H_s$$

Haciendo operaciones y agrupando convenientemente, se obtiene la ecuación 4.19 para E y  $V_E$  en función de factores meteorológicos medibles:

$$(1.8 + C_2 \frac{W}{2}) E + 0.00722 H_v C_1 (1 + 0.1W) V_E$$

$$(1.8 + C_2 \frac{W}{2}) T_a + 0.00722 H_v C_1 (1 + 0.1W) V_a + H_s \dots (4.19)$$

La ecuación 4.19 es el modelo para la determinación de la temperatura de equilibrio de un cuerpo de agua bajo condiciones meteorológicas dadas.

No hay solución directa para obtener el valor de la temperatura de equilibrio E debido a que también la presión de vapor del agua  $V_E$  es desconocida y función de E; la solución a la ecuación es por aproximaciones sucesivas, proponiendo valores de E, se obtienen valores de  $V_E$  (aproximándolos a los valores de la presión de saturación del vapor de agua del Cuadro 4.3) así como de las constantes involucradas y con los datos conocidos se resuelven ambos miembros de la ecuación hasta que éstos sean aproximadamente iguales, cuando lo anterior se logre se habrá obtenido un valor adecuado de la temperatura de equilibrio E del cuerpo de agua analizado.

4.4 Ejemplo de aplicación del modelo para la determinación de la temperatura de equilibrio de un cuerpo de agua

Conocidos los factores meteorológicos de un sitio donde se localiza una corriente, determinar la temperatura de equilibrio de la misma.

Datos:

Factor	Registro
Temperatura del aire $T_a$	61.5°F
Velocidad del viento W	10.3 millas/h
Humedad relativa	71 %
Radiación solar registrada	331 langley langley = cal/cm <sup>2</sup> .día

Solución:

1. Determinación de datos complementarios:

Con  $T_a = 61.5$  °F, se interpola linealmente para obtener el valor de  $V_a$  para el 100% de humedad relativa, a partir del Cuadro 4.3:

Temp. del aire [ °F ]	$V_a$ [ plg de Hg ]
61	0.536
61.5	?
62	0.555

$$V_a = 0.536 + (61.5-61)(0.555-0.536) / (62-61)$$

$$V_a = 0.545 \text{ plg de Hg}$$

Debido a que se tiene el 71% de humedad relativa:

$$V_a = 0.545 \times 0.71$$

$$V_a = 0.387 \text{ plg de Hg}$$

Por otra parte, transformando la radiación solar registrada a ganancia de calor por radiación solar :

Radiación solar registrada= 331 langleys = 331 cal/cm<sup>2</sup>.día

Utilizando el factor de conversión:

$$1 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{día} = 0.1536 \text{ BTU/h.pie}^2$$

Ganancia de calor por radiación solar H<sub>o</sub> :

$$H_o = 331 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \cdot \text{día}} \times 0.1536 \frac{\text{BTU}}{\text{h.pie}^2} = 50.8 \text{ BTU/h.pie}^2$$

$$H_o = 50.8 \text{ BTU/h.pie}^2$$

Con T<sub>a</sub> = 61.5 °F, se obtiene el valor de H<sub>v</sub> a partir del Cuadro 4.2 :

Temp. [°F]	H <sub>v</sub> [ BTU/lb]
60	1059.9
61.5	?
65	1057.1

$$H_v = 1057.1 + (65 - 61.5)(1059.9 - 1057.1) / (65 - 60)$$

$$H_v = 1059.1 \text{ BTU/lb}$$

Asumiendo C<sub>1</sub> = 14 ( considerando corriente de moderada profundidad y velocidad)

$$C_2 = 0.32 \text{ ( para una velocidad moderada )}$$

## 2. Resolviendo la ecuación suponiendo valores de E

## 2.1 Primera suposición

Considerando  $E = 65^{\circ}\text{F}$ 

El valor de  $V_B$  se puede obtener también a partir del Cuadro 4.3 considerando que son valores de la presión de saturación del vapor de agua para una temperatura dada.

 $V_B = 0.616$  plg de Hg a  $65^{\circ}\text{F}$ 

Sustituyendo valores en la ecuación 4.19 :

$$(1.8 + 0.32 \frac{10.3}{2}) (65) + 0.0072 (1059.19) (14) [1+0.1(10.3)] (0.616)$$

$$(1.8 + 0.32 \frac{10.3}{2}) (61.5) + 0.00722 (1059.1) (14) [1+0.1(10.3)] (0.387)$$

+ 50.8

Haciendo operaciones:

1° miembro	2° miembro
------------	------------

$$3.448(65) + 217.319(0.616) = 346.95$$

$357.99 > 346.95$  Por lo tanto, el valor de E debe ser menor.

## 2.2 Segunda suposición

Proponiendo  $E = 63^{\circ}\text{F}$ ,  $V_B = 0.575$  plg de Hg

Sustituyendo en el 1° miembro :

$$3.448(63) + 217(0.575) = 342.18$$

Comparando con el 2° miembro:

$342.18 < 346.95$  Por lo tanto, el valor de E debe ser mayor

## 2.3 Tercera suposición

Considerando  $E = 63.5^{\circ}\text{F}$

Interpolando linealmente se obtiene el valor de  $V_B$  a partir de datos del Cuadro 4.3:

Temperatura [°F]	$V_B$ [ plg de Hg]
63	0.575
63.5	?
64	0.595

$$V_B = 0.575 + (63.5-63)(0.595-0.575)/(64-63)$$

$$V_B = 0.585 \text{ plg de Hg}$$

Sustituyendo valores en el 1° miembro:

$$3.448(63.5) + 217.319(0.585) = 346.08$$

Comparando con el 2° miembro:

$$346.08 < 346.95 \quad \text{Por lo tanto el valor de E es un poco mayor}$$

#### 2.4 Tercera suposición

Considerando  $E = 63.6^\circ\text{F}$ , el valor de  $V_B$  se obtiene de manera similar al calculado con anterioridad:

$$V_B = 0.575 + (63.6-63)(0.595-0.575)/(64-63)$$

$$V_B = 0.587 \text{ plg de Hg}$$

Sustituyendo en el 1° miembro:

$$3.448(63.6) + 217.319(0.587) = 346.86$$

Comparando con el segundo miembro:

$$346.86 = 346.95 \quad \text{Por lo tanto, se acepta que la temperatura de equilibrio E de la corriente de agua analizada es : } E = 63.6^\circ\text{F}$$

Valor que corresponde a  $17.56^\circ\text{C}$ .

El ejemplo que se ha planteado revela la sencillez con la que se puede aplicar el modelo antes expuesto, cuando son conocidos los datos meteorológicos antes indicados; para poder aplicar este modelo a algún problema particular de nuestro país, será necesario transformar los registros que se tengan a las unidades del sistema inglés para aplicar el modelo y después transformar los resultados a unidades del sistema métrico o del SI según sea utilizado uno u otro, para la interpretación de resultados. Lo anterior se debe a que en la ecuación a resolver existen constantes que se han deducido de estudios experimentales de otro país que se dan en unidades del sistema inglés, de tal manera que hacen posible la suma de los elementos de la ecuación.

4.5 Factores de conversión

Los factores de conversión a unidades del sistema métrico que se pueden utilizar así como aquellos para hacer transformaciones del S I al Sistema Inglés se presentan a continuación en forma de resumen:

Unidades de longitud

S I y Sistema métrico

Sistema inglés

25.4 mm	=	1 pulgada
0.3048 m	=	1 pie
1609 m	=	1 milla terrestre
1.609 km	=	1 milla terrestre

Unidades de área

10000 m <sup>2</sup>	=	1 hectárea
4046.873 m <sup>2</sup>	=	1 acre

Unidades de velocidad

1 m/s	=	2.2374 milla /h
1 km/h	=	0.6215 milla/h

Unidades de calor y energía

Sistema Métrico

Sistema inglés

252 cal	=	1 BTU
0.252 kcal	=	1 BTU

Sistema Internacional S I

1055 J	=	1 BTU
--------	---	-------

Unidades de transferencia de calor

Sistema Métrico

2.7125 kcal/h. m <sup>2</sup>	=	1 BTU/ h.pie <sup>2</sup>
1 langley = 1 cal/cm <sup>2</sup> .día	=	0.1536 BTU/ h.pie <sup>2</sup>

Sistema Internacional S I

3.1544 J/s.m <sup>2</sup>	=	1 BTU/h.pie <sup>2</sup>
3.1544 W/m <sup>2</sup>	=	1 BTU/h. pie <sup>2</sup>

Unidades de temperatura

$$^{\circ}\text{F} = (^{\circ}\text{C} + 32) (9/5)$$

$$\text{K} = 273.15 + ^{\circ}\text{C}$$

Para intervalos de temperatura:

$$5^{\circ}\text{C} = 9^{\circ}\text{F}$$

4.6 Perfil de la temperatura del agua

Teóricamente se requiere un tiempo infinito de exposición para que el agua alcance la temperatura de equilibrio. Además, se requeriría un área superficial infinita para que el agua con alta temperatura introducida en un río o cuenca se enfríe a la temperatura de equilibrio. Pero debido a que la disminución de la temperatura sigue un comportamiento casi logarítmico, una aproximación cercana a la temperatura de equilibrio se alcanza para tiempos y áreas superficiales razonablemente prácticos.

La relación entre el perfil de la temperatura del agua y el área superficial de enfriamiento involucra los conceptos de pérdida neta de calor H basados en condiciones meteorológicas observadas. Una diferencial de la disminución de la temperatura del agua  $dT_w$  por cada incremento de tiempo dt es igual al calor que se pierde del incremento del área superficial dividido por el peso del agua correspondiente a la profundidad b:

$$\frac{dT_w}{dt} = - \frac{H}{62.4b}$$

Separando variables e integrando:

$$\int_{T_1}^{T_2} dT_w = - \frac{H}{62.4b} \int_{t_1}^{t_2} dt$$

Si  $t_1 = 0$

$$\int_{T_1}^{T_2} dT_w = - \frac{H}{62.4b} t_2$$

Expresando t en horas, en términos del área A en pie<sup>2</sup>/ ( pie<sup>3</sup>/s) de corriente, se obtiene:

$$t = \frac{bA}{3600}$$

Sustituyendo este valor y despejando A :

$$A = -224640 \int_{T_1}^{T_2} dT_w \dots ( 4.20 )$$

De la ecuación 4.17 :

$$H_o = H_e + H_c + H_r$$

Cuando  $T_w = E$  y  $V_w = V_g$ , sustituyendo los valores de  $H_e$ ,  $H_c$  y  $H_r$  :

$$H_g = 0.00722 H_v C_1 (1 + 0.1W) (V_E - V_g) + (1.8 + C_2 \frac{W}{2}) (E - T_a) \dots (4.21)$$

Sustituyendo en la ecuación 4.18 se obtiene:

$$H = 0.00722 H_v C_1 (1 + 0.1W) (V_w - V_g) + (1.8 + C_2 \frac{W}{2}) (T_w - E) \dots (4.22)$$

Combinando la ecuación 4.22 con la ecuación 4.20 y haciendo:

$$\alpha = 0.00722 H_v C_1 (1 + 0.1W) \quad \text{y} \quad \beta = (1.8 + C_2 \frac{W}{2})$$

se obtiene:

$$A = -224640 \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT_w}{\alpha (V_w - V_g) + \beta (T_w - E)} \dots (4.23)$$

Aunque la ecuación anterior no se puede integrar directamente, es posible alcanzar soluciones sin recurrir a procedimientos empíricos dividiendo la diferencia de temperatura en un número de incrementos  $\Delta T_w$  y realizando la integración a través de sumas sucesivas, tomando  $T_w$  y su correspondiente  $V_w$  como el valor medio de cada incremento sucesivo de acuerdo con la expresión:

$$A = -224640 \sum_{T_1}^{T_2} \frac{\Delta T_w}{\alpha (V_w - V_g) + \beta (T_w - E)} \dots (4.24)$$

La suma de cuatro a ocho incrementos es usualmente adecuada y debido a que es recomendable el perfil completo de temperatura, los incrementos sucesivos proporcionan los puntos intermedios entre la temperatura inicial o total del agua  $T_1$  y la temperatura final  $T_2$ .

Donde se tengan registros climatológicos de varios años, es posible a partir de la ecuación 4.19 calcular la temperatura de equilibrio del agua esperada de cualquier probabilidad de ocurrencia de condiciones meteorológicas. El enfriamiento para cualquier nivel por arriba de la temperatura de equilibrio puede ser calculado por la ecuación 4.24. Conociendo el área superficial acumulativa a lo largo del curso de una corriente (o desde un punto de descarga de calor en un lago o depósito) se puede construir un perfil confiable de la temperatura del agua.

#### 4.7 Temperatura de la superficie del agua y gradientes verticales en depósitos profundos

El fenómeno de la estratificación térmica en lagos profundos y depósitos en climas templados se traduce en una sucesión estacional de gradientes de temperatura verticales que varían de una temperatura uniforme en la superficie a perfiles característicos de marcadas diferencias de temperatura de acuerdo con la profundidad.

El proceso se inicia después de que la primavera regresa, cuando el cuerpo de agua está mezclado a una temperatura baja uniforme. La temperatura mínima experimentada cuando la primavera regresa depende del clima local pero es generalmente por arriba de los 4°C, la temperatura de la densidad máxima del agua. Por arriba de los 4°C la densidad del agua disminuye a cada incremento en la temperatura, como se indicó en el segundo capítulo, y la tasa de decremento en el valor de la densidad se incrementa a medida que la temperatura se eleva. Estas relaciones temperatura-densidad proporcionan patrones de circulación y estratificación a través de las estaciones.

Si el agua en el momento del volcamiento es transparente, sin turbiedad, el incremento de la radiación solar podría ser absorbida exponencialmente con la profundidad y podría calentar el agua de tal manera de producir un gradiente de temperatura exponencial. Dos factores principales impiden que tal proceso se presente: la pérdida de calor a la atmósfera enfriará las capas superficiales y establecerá corrientes de convección y el viento creará disturbios en la superficie y generará movimiento turbulento con transporte de calor hacia abajo.

La distribución de la temperatura resultante toma una forma característica. En lagos y depósitos con suficiente profundidad el agua se divide, en una capa que es la más alta de calor uniforme, circulación turbulenta; denominada epilimnio y en una región profunda, fría y casi sin disturbios llamada hipolimnio. La región en la que se tiene una rápida disminución de la temperatura y que separa las capas anteriores es la termoclina. Esta estratificación característica se acentúa al transcurrir las estaciones más calurosas y se atenúa en la temporada fría. A medida que la superficie del agua se enfría, la capa densa más alta se hunde. Con este movimiento el ciclo se completa y el cuerpo de agua vuelve a tener una temperatura uniforme a lo largo de su profundidad.

Bajo condiciones meteorológicas dadas, el tamaño y profundidad del cuerpo de agua son los factores más significativos de la estratificación térmica, pero muchos factores pueden alterar la forma característica y desarrollo de los perfiles verticales de la temperatura. Los factores principales incluyen la configuración del depósito y del terreno, el área, el volumen, relaciones de campo, la orientación de los vientos que rigen y las características hidrológicas del influente y efluente.

Grandes plantas generadoras de energía eléctrica a partir de vapor aprovechan la estratificación térmica extrayendo agua de circulación para el condensador del hipolimnio frío y descargando el agua del condensador con elevada temperatura en el epilimnio. Es necesario en la aplicación práctica predecir la sucesión de gradientes verticales de temperatura a través de las estaciones.

Debido a que se trata de una situación dinámica en función de muchos factores y variaciones en la climatología, es de suponerse que cualquier método basado en condiciones promedio está sujeto en cualquier momento a quedar obsoleto y tener desviaciones inducidas por variaciones anormales en períodos de tiempo cortos.

Un método de predicción basado en condiciones promedio mensuales, en el que se analizan aspectos de hidrología, meteorología y del flujo neto de calor, es satisfactorio para muchas aplicaciones prácticas.

El primer paso en el procedimiento es establecer la hidrología del depósito para el año de diseño o serie de años. El análisis estadístico de los gastos promedio mensuales aplicables al área tributaria de drenaje define la probabilidad del gasto influente. Un análisis secuencial del influente y efluente establece las condiciones de operación del depósito y representa el período de registro e identifica los años normales y críticos.

Quando se ha establecido la hidrología, es necesario determinar para cada mes del año climatológico en cuestión las relaciones para flujo neto de calor de acuerdo con las temperaturas promedio mensuales de la superficie del depósito. El flujo neto de calor es la radiación solar mensual promedio ( $H_a$ ) registrada para el mes específico del año de diseño menos la pérdida de calor total de la superficie  $H_c$ ,  $H_e$  y  $H_r$  calculadas de la climatología específica promedio mensual a partir de las ecuaciones antes presentadas, utilizando los coeficientes para grandes depósitos que se ajusten a las condiciones locales. En estas ecuaciones aparece la pérdida de calor que puede expresarse como una función de la temperatura de la superficie del agua después de que se ha realizado la sustitución para las condiciones climatológicas dadas. Por lo tanto es posible trazar para cada mes del año de diseño el flujo neto de calor expresado en unidades de flujo neto de calor tales como acre pie  $^{\circ}F$  contra temperatura de la superficie del agua, como lo muestra la Figura 4.3 .

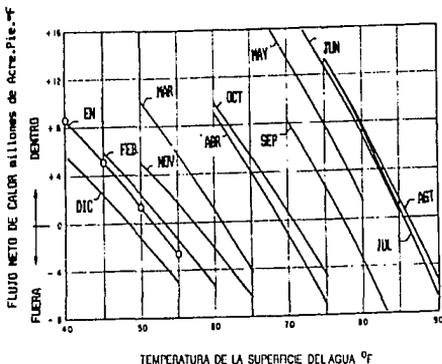


Figura 4.3 Diagrama muestra de flujo de calor

## 4.8 Depósitos profundos empleados con fines de enfriamiento

Con relación a los depósitos profundos que son utilizados como un aparato de enfriamiento por ejemplo para las instalaciones de una planta grande generadora de energía eléctrica empleando vapor, el procedimiento para el cálculo de temperaturas de la superficie del agua y gradientes verticales es similar a cuando se tienen condiciones de exposición natural; tomando en cuenta la modificaciones necesariamente involucradas con la carga térmica inducida y el agua de condensador tomada y descargada. La profundidad de mezcla, excepto cuando es cambiada por retroceso del perfil de la temperatura, es asumida inicialmente como una constante, generalmente de 3.048 m a 4.572 m (10 a 15 pie). Esta suposición refleja la fuerte tendencia de la descarga de calor a estratificar en el epilimnio en la estación fría tanto como en la estación caliente, en contraste a la profundidad de mezclado que ocurre en esas estaciones bajo una exposición natural. La conductividad térmica en el hipolimnio es insignificante en relación a la disminución rápida de las capas superficiales por la remoción de la toma de agua de condensador de las aguas más frías de la profundidad.

## 4.9 Consideraciones de aplicación práctica

### 4.9.1 Variación en factores meteorológicos e hidrológicos

En la aplicación de las ecuaciones básicas a una situación práctica, el criterio en la aplicación de factores meteorológicos e hidrológicos es casi tan importante como el uso de ecuaciones y coeficientes. La temperatura del aire, velocidad del viento, presión de vapor de agua de la atmósfera, la radiación solar y el flujo de la corriente son variables dinámicas. Aunque estos factores varían radicalmente con el tiempo, dentro del establecimiento natural la variación es ordenada y se puede definir por métodos estadísticos aplicados a registros de largos períodos de observaciones reportadas por las estaciones climatológicas encargadas; dichos registros constituyen una guía para la variación meteorológica local.

Además, para definir un perfil de la temperatura del agua en una corriente en el que existe una descarga de calor, es esencial definir las características del canal: ancho, profundidad, área superficial, volumen del canal y el tiempo de recorrido. Cada régimen de gasto produce sus correspondientes características de canal. De manera similar, en depósitos deben establecerse relaciones área-volumen-época del año.

La naturaleza estadística del cambio meteorológico induce un equilibrio dinámico. Las condiciones estables para un mes podrían resultar en temperaturas cercanas al equilibrio. En corrientes y lagos profundos las tendencias de las desviaciones de la temperatura general estacional pueden esperarse con ciclos diurnos; en cuerpos de agua grandes estas desviaciones son menos notables. Una condición meteorológica sostenida para un período de una semana, puede inducir una pequeña desviación temporal de la tendencia general estacional. En depósitos grandes y profundos donde ocurre la estratificación, la acción del viento induce el mezclado a varias profundidades, dependiendo de la intensidad, dirección y duración, que puede provocar desviaciones temporales en los patrones normales de temperatura. La conductividad y circulación debido a diferencias de densidad entre capas más calientes y elevadas y capas más frías y bajas provocan desviaciones y retrasos con respecto a lo normal. Por lo tanto la interpretación de las temperaturas del agua observadas o calculadas podrían realizarse para las dinámicas actuales, considerando la posibilidad de estimar las desviaciones de corto término. Debido a que se van obteniendo mejores resultados en la medida que

se quede dentro del ámbito de variación meteorológica e hidrológica, los cálculos teóricos deben afinarse a partir de consideraciones prácticas. El analista debe ser conservador en la selección de una base de probabilidad, por ejemplo esperar la ocurrencia del evento una vez en 5, 10 ó 20 años.

#### 4.9.2 Patrón estacional esperado de la temperatura natural de equilibrio del agua

Debido a que hay pocos registros que cubran varios años de datos de la temperatura del agua observada sobre los que pudieran haberse realizado de manera directa estudios de probabilidad, es necesario desarrollar el patrón estacional de los valores de equilibrio calculados utilizando la ecuación 4.19. Idealmente la temperatura de equilibrio del agua podría calcularse para cada mes sobre el período de años para los cuales se tienen disponibles registros simultáneos de temperatura del aire, velocidad el viento, presión de vapor y radiación solar. Sin embargo, los registros de corto plazo de la radiación solar que están disponibles para muchas áreas limitan esta aproximación. Por supuesto, no todas las situaciones requieren el tiempo y labor involucrados en el cálculo de las temperaturas de equilibrio del agua sobre una base mensual.

#### 4.9.3 Desviación inducida por una hidrología poco común

En algunas cuencas de ríos la temperatura del agua se desvía de la temperatura de equilibrio que se podría esperar bajo los factores meteorológicos prevalentes. Esta desviación está asociada inicialmente con una ubicación hidrológica desacomodada donde el gasto de la corriente es alimentado por nieve acumulada en regiones montañosas o por contribuciones de manantiales grandes y fuentes subterráneas extensas.

Esas diferencias en la temperatura usualmente se disipan rápidamente después de que el influente frío tributario alcanza una corriente principal más grande y descubierta, tendiendo nuevamente la temperatura a aproximarse a las condiciones de equilibrio.

Se deben hacer verificaciones de las ecuaciones básicas y de los métodos de aplicación práctica, comparando lo calculado con las condiciones observadas en lagunas de enfriamiento y en corrientes en las que se tiene una descarga de calor de desecho.

#### 4.10 Perfil de la temperatura de un río

Para verificar el perfil calculado de temperatura de un río es esencial que las condiciones meteorológicas e hidrológicas permanezcan relativamente estables por un período razonable antes y durante el tiempo de estudio de la temperatura del río. Del mismo modo debe ser conocida y permanecer relativamente estable la carga de calor que induce el perfil de temperatura para el mismo período.

Para ilustrar lo anterior se presenta el estudio del río Tittabawassee, Michigan, en el período de Septiembre 9 al 19, del año 1953. Las condiciones meteorológicas prevalentes para este período como se reflejaron en la estación cercana East Lansing del Weather Bureau fueron las siguientes:

Temperatura del aire $T_a$	61.5°F
Velocidad del viento $W^a$	10.3 millas/h
Presión de vapor del agua	
$V^a$	0.387 plg de Hg
Radiación solar $H_0$	50.8 BTU/plg <sup>2</sup> .h

A partir de los datos anteriores y considerando las constantes  $C_1 = 14$  y  $C_2 = 0.32$ , además de obtener los datos complementarios a partir de expresiones antes indicadas, la temperatura de equilibrio del agua antes de la descarga de calor, calculada con la ecuación 4.19 es de 63.6°F (17.6°C).

El gasto medido en un punto en la corriente aguas abajo de la descarga de calor, fue en promedio de 394 pie<sup>3</sup>/s (11.16 m<sup>3</sup>/s), con incrementos menores añadidos a lo largo de la corriente. Las características del canal para este gasto se pudieron obtener a partir de sondeos detallados de la sección transversal a intervalos de 500 pie (152.4 m) a lo largo del curso del río. Con base en esas condiciones y una descarga de calor predominante de  $1.312 \times 10^3$  millones de BTU/h, el perfil de la temperatura del río calculado con la ecuación 4.24 se muestra en la curva A de la Figura 4.4. De la curva A resalta el hecho de que la carga de calor induce un incremento de temperatura de 14.8°F, de 63.6 a 78.4°F (de 17.6 a 25.78°C, corresponde a un incremento de 8.18°C), que está seguido de una rápida disipación de calor, con disminución de la temperatura a 72.5°F (22.5°C) a 19.24 millas (30.96 km) y a 64.4°F (18°C) en la boca del río, nuevamente aproximándose en 0.8°F (0.4°C) a la temperatura de equilibrio.

También se puede comentar que las mediciones limitadas de temperatura observadas son bastante similares a las calculadas en el perfil de la temperatura a lo largo del río; del mismo modo las temperaturas del río observadas a 24.2 millas (38937.8 m) arriba del punto de la carga de calor corresponden a la temperatura de equilibrio del agua calculada 63.6°F (17.6°C).

Reconociendo la sensibilidad y carácter dinámico del perfil de temperatura, estas verificaciones garantizan el uso de las ecuaciones básicas en pronóstico de perfiles de temperatura del agua esperados bajo otros flujos de corriente natural o reguladas y descargas de calor.

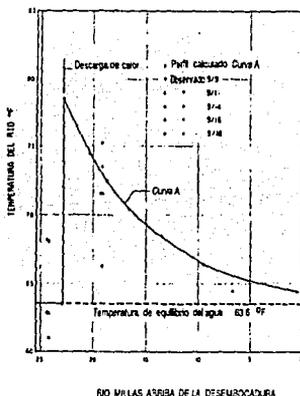


Figura 4.4 Comparación de perfiles de la temperatura del Río Tittabawassee calculados y observados.

4.11 Ejemplo de cálculo del perfil de temperatura de un río

Para la determinación del perfil mostrado en la Figura 4.4 se emplearon los siguientes datos y cálculos, correspondientes al río Tittabawassee, Michigan:

Datos	
Gasto	394 pie <sup>3</sup> /s ( 11.16 m <sup>3</sup> /s)
Descarga de calor de desecho	1.312 x 10 <sup>9</sup> BTU/h ( 330.6 x 10 <sup>6</sup> kcal/h)
Temperatura de equilibrio (S)	63.6 °F ( 17.6 °C)
V <sub>B</sub> a 63.6 °F	0.587 plg de Hg ( 14.91 mm de Hg )

$$T_{w0} - T_B = \frac{1.312 \times 10^9 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}}{394 \frac{\text{pie}^3}{\text{s}} \times 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \times 62.4 \frac{\text{BTU}}{\text{°F} \cdot \text{pie}^3}} = 14.8 \text{°F}$$

T<sub>w0</sub> = 63.6 + 14.8

T<sub>w0</sub> = 78.4 °F ( 25.78 °C)

T<sub>a</sub> = 61.5 °F ( 16.39 °C)

W = 10.3 millas/h  
( 4.60 m/s)

V<sub>a</sub> = 0.387 plg de Hg  
( 9.83 mm de Hg)

H<sub>0</sub> = 50.8 BTU/pie<sup>2</sup> · h  
( 137.80 kcal/m<sup>2</sup> · h)

C<sub>1</sub> = 14

C<sub>2</sub> = 0.32

Empleando la ecuación 4.24

Debido a que  $T_{w0} - T_{wB} = 14.8^{\circ}\text{F}$ , se consideran 7 valores del incremento de la temperatura del agua  $\Delta T_w = 2^{\circ}\text{F}$  o una disminución total de  $14^{\circ}\text{F}$ .

	$T_w$ [°F]	$\Delta T_w$ [°F]	$T_w$ [°F] (promedio)	$V_w$ [plg Hg] (promedio)
$T_{w0}$	78.4	2	77.4	0.939
$T_{w1}$	76.4	2	75.4	0.878
$T_{w2}$	74.4	2	73.4	0.821
$T_{w3}$	72.4	2	71.4	0.767
$T_{w4}$	70.4	2	69.4	0.717
$T_{w5}$	68.4	2	67.4	0.670
$T_{w6}$	66.4	2	65.4	0.625
$T_{w7}$	64.4			

Considerando  $\alpha = 0.00722 \times 1059.1 \times 14 ( 1 + 0.1(10.3) ) = 217.2$

10.3

$$\gamma \beta = \frac{1.8 + (0.32 \times 10.3)}{2} = 3.45$$

El incremento de área en pie<sup>2</sup> será :

$$A (\text{pie}^2) = \frac{224\,640 \times 2 \times 394}{\alpha (V_w - V) + \beta (T_w - E)}$$

$$A (\text{pie}^2) = \frac{177 \times 10^6}{217.2 (V_w - V_g) + 3.45 (T_w - E)}$$

Los valores de los incrementos de área A requeridos para cada incremento de temperatura del agua y del área acumulada en pie<sup>2</sup> x 10<sup>6</sup> se presentan a continuación:

	Incremento de Área requerido [pie <sup>2</sup> x 10 <sup>6</sup> ]	Σ Area [pie <sup>2</sup> x 10 <sup>6</sup> ]
de T <sub>w0</sub> a T <sub>w1</sub> :		
A <sub>1</sub> =	$\frac{177 \times 10^6}{217.2(0.939-0.587) + 3.45(77.4-63.6)}$ = 1.428	1.428
de T <sub>w1</sub> a T <sub>w2</sub> :		
A <sub>2</sub> =	$\frac{177 \times 10^6}{217.2(0.878-0.587) + 3.45(75.4-63.6)}$ = 1.704	3.132
de T <sub>w2</sub> a T <sub>w3</sub> :		
A <sub>3</sub> =	$\frac{177 \times 10^6}{217.2(0.821-0.587) + 3.45(73.4-63.6)}$ = 2.092	5.224
de T <sub>w3</sub> a T <sub>w4</sub> :		
A <sub>4</sub> =	$\frac{177 \times 10^6}{217.2(0.767-0.587) + 3.45(71.4-63.6)}$ = 2.682	7.906
de T <sub>w4</sub> a T <sub>w5</sub> :		
A <sub>5</sub> =	$\frac{177 \times 10^6}{217.2(0.717-0.587) + 3.45(69.4-63.6)}$ = 3.672	11.578

Incremento de  
 Area requerido  $\Sigma$  Area  
 [pie<sup>2</sup> x 10<sup>6</sup>] [pie<sup>2</sup> x 10<sup>6</sup>]

de T<sub>w5</sub> a T<sub>w6</sub> :

$$A_6 = \frac{177 \times 10^6}{217.2(0.670-0.587) + 3.45(67.4-63.6)} = 5.691 \quad 17.269$$

de T<sub>w6</sub> a T<sub>w7</sub> :

$$A_7 = \frac{177 \times 10^6}{217.2(0.625-0.587) + 3.45(65.4-63.6)} = 12.292 \quad 29.561$$

El área superficial a lo largo de la corriente está calculada a partir de las secciones transversales del canal y está graficada como un área acumulativa contra el recorrido del río desde la descarga de calor de desecho a la desembocadura del río. Las coordenadas correspondientes para el perfil de la temperatura del río (con base en el área superficial requerida calculada) se han interpolado de la gráfica acumulativa como se presenta a continuación:

Area superficial del río requerida [ pie <sup>2</sup> x 10 <sup>6</sup> ]	Recorrido del río en millas aguas arriba de la desembocadura	Temperatura del agua del río calculada [°F]
0 ( descarga de calor de desecho)	23.0	78.4
1.428	21.7	76.4
3.132	20.4	74.4
5.224	18.7	72.4
7.906	16.7	70.4
11.578	13.6	68.4
17.269	9.5	66.4
29.561	0.4	64.4

#### 4.12 Distribución de la descarga de calor de desecho

##### 4.12.1 Factores que causan modificaciones en corrientes receptoras

Como todo tipo de contaminación, la distribución de la descarga de calor de desecho en una corriente rara vez es uniforme a lo largo de la sección transversal del canal. Lo completo de la mezcla depende del diseño de la descarga, la configuración del canal, ancho y profundidad, las características hidráulicas de velocidad, turbulencia y tasas de descarga relativas. La tendencia hacia una distribución desigual con el calor de desecho se acentúa porque el agua caliente de condensado tiene una densidad más baja que el agua más fría de la corriente. Por lo tanto es necesario evaluar el patrón de distribución esperado para las condiciones específicas. Cuando se presenta una distribución desigual muy marcada es necesario realizar ajustes en los parámetros de las ecuaciones de disipación de calor. En algunas corrientes la distribución del calor de desecho casi es completa a lo largo de la sección transversal del canal, verticalmente y lateralmente, en una distancia relativamente corta aguas abajo del sitio de descarga; en otros sitios la descarga con alta temperatura puede ser canalizada a lo largo del cuerpo receptor, entremezclándose muy poco con el flujo de la corriente a través de extensos alcances a lo largo del curso; incluso en otras situaciones la distribución lateral puede ser uniforme, mientras que la estratificación vertical es pronunciada, es decir se tiene agua más caliente por encima del gasto de la corriente que está más frío.

El período crítico es la estación de clima caluroso con poco gasto, porque es cuando ocurre la máxima sobre-elevación de la temperatura. Durante las estaciones más frías de más alto gasto una desigual distribución es más pronunciada, pero es de menores consecuencias. Durante el período de sequía todo o la mayoría del gasto es utilizado como agua de circulación, la velocidad de la corriente es más baja, la profundidad y ancho son menores y la oportunidad de canalización es menor.

En corrientes muy amplias el grado de canalización depende para dar alguna referencia, del diseño del desagüe de la descarga de calor de desecho. La alta velocidad de la descarga, vanos guía, descargas múltiples y la ubicación adecuada en la configuración del canal son ayudas para la distribución lateral. Si la sobre-elevación de la temperatura del agua de circulación es moderada, la canalización puede ser de hecho una ventaja, suministrando el flujo natural de la corriente a lo largo de la orilla contraria como un desvío para los peces y los organismos acuáticos. Si tal canalización está razonablemente bien definida, se puede manejar como una corriente dentro de una corriente. De manera similar, si es llevada a cabo una buena distribución lateral pero ocurre una estratificación vertical en una corriente profunda, la más alta sobre-elevación inicial de la temperatura de la superficie acelera la disipación de calor y la temperatura del agua más baja resulta en un alcance aguas abajo después de que la estratificación vertical se ha roto.

#### 4.12.2 Factores que causan modificaciones en lagunas

La ecuación 4.24 que describe la disminución de temperatura con el incremento del área es aplicable a una laguna de enfriamiento de flujo continuo, puede tratarse de un lago grande con un patrón de flujo claramente identificado moviéndose desde la salida de la descarga del agua de condensado hacia un punto distante de toma. Bajo estas condiciones el comportamiento de la laguna o lago es similar al de un río; lo factores que rigen el mezclado lateral y vertical en el lago se pueden tomar como si se tratara de un río. Los lagos profundos son bastante sensibles a la acción del viento, además pueden ocurrir patrones de corriente y flujo que no se pueden predecir. Estas irregularidades se pueden minimizar guiando el flujo por medio de estructuras apropiadas como diques o subdividiendo el embalse; creando una laguna caliente primaria receptora de la descarga del agua de condensado, seguida por una laguna secundaria conduciendo a la planta térmica la toma de agua de condensado. El agua de la laguna caliente es descargada a la parte más fría por medio de un vertedor invertido, así se asegura que el enfriamiento ocurre de una manera bien definida. Otro tipo de laguna, que puede llamarse laguna completamente mezclada, es aquella en la cual la disminución de la temperatura ocurre en una distancia relativamente corta. La acción del viento y las corrientes de densidad interna mantienen a este tipo de cuerpo receptor muy bien mezclado, produciendo una temperatura más uniforme sobre la laguna completa. En lagos o lagunas de este tipo la temperatura estará a un nivel por encima de la de equilibrio de tal manera que la adición neta de calor de la planta de energía iguala en forma aproximada a la transferencia neta de calor hacia la atmósfera.

Si se comparan ambos tipos de lagunas con base en la temperatura del agua de la toma, se puede demostrar que para soportar la misma toma térmica, la laguna mezclada podría requerir un área superficial más grande. Lo anterior se debe a que una laguna de flujo continuo disipa más calor en unas cuantas unidades de área, lo cual las lagunas completamente mezcladas no logran.

Muchas de las lagunas de enfriamiento podrían caer entre estos dos tipos a menos que se tomen precauciones especiales para asegurar un flujo de corriente a través de la laguna.

#### 4.12.3 Factores que causan modificaciones en depósitos

Aunque el patrón de distribución del calor de desecho de plantas térmicas usualmente es bidimensional, lateral y longitudinal, en depósitos profundos la dimensión vertical puede estar involucrada. El mecanismo básico para predecir la distribución de temperatura y gradientes verticales proporciona la condición promedio esperada. Hay factores que pueden inducir desviaciones del promedio normal. Estos factores son la topografía y la forma del depósito, la acción del viento, el sistema influente-efluente, las corrientes de densidad interna y los arreglos de la planta de energía térmica.

Los modelos teóricos para predecir la distribución de calor de desecho de las plantas térmicas ubicadas cerca de depósitos son más confiables para aquellos de forma regular y profundidad uniforme. Los depósitos que cuentan con muchos brazos y ramificaciones de profundidad desigual presentan mayor incertidumbre, debido a que en alguna parte de ellos puede dar mucho el sol no siendo tan efectiva para los propósitos de enfriamiento, particularmente durante los periodos en los que baja mucho el nivel del depósito.

La acción del viento sobre la superficie de un depósito ejerce un rompimiento de la tensión en la interfase aire-agua que induce corrientes superficiales del orden de 1 a 3 por ciento de la velocidad del viento. La acción de onda pesada

también incrementa la profundidad del mezclado vertical y el intercambio entre el epilimnio y el hipolimnio. Un viento estable a lo largo de un eje mayor de un depósito produce una pequeña elevación del agua a un extremo y una disminución de la misma en el otro extremo. Cuando el viento disminuye, el depósito y los gradientes de temperatura vertical regresarán a la normalidad en una serie de movimientos oscilatorios. Si un viento de tal naturaleza se presenta sobre un depósito donde la toma a la planta térmica no es lo suficientemente profunda, podría presentarse una variación considerable en la temperatura del agua de la toma.

Dependiendo de la ubicación relativa de la toma y descarga del agua de condensado de la planta térmica, además de la dirección, duración e intensidad del viento, podría ocurrir un corto circuito entre la descarga caliente del condensador y la toma. Las modificaciones asociadas con la acción del viento son por lo regular de corta duración; los depósitos regresan rápidamente y por completo a los patrones de distribución normal estacional de temperatura.

Si son añadidas grandes cantidades de agua a un depósito con temperatura o turbiedad diferentes a las del depósito, se presentarán fuertes corrientes de densidad interna y alterarán los patrones de estratificación normal. En depósitos termales un análisis similar debe tomar cuenta la energía turbulenta asociada con salidas repentinas grandes o influentes que pueden provocar fuertes oscilaciones y, dependiendo de la capacidad del depósito y de la ubicación de las llegadas o salidas, tender a romper la estratificación normal.

En depósitos grandes y profundos utilizados para la disipación de calor de plantas térmicas el objetivo es sacar agua fría de circulación de condensado y descargar el agua con alta temperatura al epilimnio. El éxito de prevenir un corto circuito de la descarga de agua de condensado con temperatura elevada a la toma de la planta de un sistema que utiliza las dos capas de un depósito, depende de muchos factores hidráulicos. En el sitio donde la toma y descarga están muy cerca y la profundidad del depósito está limitada, son instaladas paredes desnatadoras para prevenir el descenso de la superficie del agua con alta temperatura. Si ocurre algún corto circuito, la temperatura de la descarga de condensado no se puede incrementar de manera indefinida, el incremento de la diferencia de densidad finalmente trae consigo la separación.

Las características predominantes de diseño y los factores locales que podrían provocar cortos circuitos son la diferencia de temperatura a través de los condensadores, la profundidad de la toma, la tasa del flujo del agua de circulación de condensado, la velocidad de la toma y de manera importante la geometría del depósito local en la cercanía a la toma. Esto último determina la restricción del patrón de flujo aproximado, ya sea confinado a una estrecha aproximación bidimensional o a un patrón completamente sin restricciones de 360° radial, tridimensional. Generalmente algunos grados de restricción al aproximar el patrón de flujo entre formas idealizadas bi o tridimensionales dependerán de la geometría local. En forma similar el gradiente de temperatura vertical en un depósito profundo en las cercanías de la toma y descarga del agua de condensado y canales que intervengan está influenciado por la geometría local, sitio del depósito y los patrones de operación asociadas con facilidades termales. El gradiente de temperatura usualmente cae entre un sistema completamente estratificado de dos capas y un gradiente continuo de la superficie al fondo; esta complejidad impide la predicción precisa de las condiciones bajo las cuales podrá o no ocurrir un corto circuito. Algunas aproximaciones teóricas y estudios de modelos de laboratorio desarrollados para condiciones idealizadas proporcionan una guía general.

Un ejemplo de estas aproximaciones es la formulación de Debler que se basa en un patrón de flujo bidimensional y un gradiente de temperatura continuo. Su trabajo experimental ha mostrado que cuando el número de Froude es menor que 0.28 el patrón de flujo para una línea de corriente del fondo se divide en dos regiones, una región más elevada casi estática y una zona activa más abajo que contribuye al flujo completo. Para números de Froude mayores que 0.28 la capa más alta cada vez más contribuye hasta que en toda la profundidad hay un flujo activo. El número de Froude, en canales es:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gY}}$$

donde:

V = Velocidad del flujo en la sección analizada

Y = Tirante hidráulico =  $\frac{A}{B}$

A = Area hidráulica en la sección analizada

B = Ancho del canal en la sección ( en la superficie)

El número de Froude , de acuerdo como lo utiliza Debler se obtiene como sigue:

$$F = \frac{q}{d^2} \sqrt{\frac{h\rho_0}{g\Delta\rho}}$$

donde:

F = número de Froude en función de la densidad

d = profundidad del cuerpo receptor

$\rho_0$  = densidad al fondo del tanque

$\Delta\rho$  = en la diferencia de densidad entre la superficie y el fondo.

g = es la aceleración de la gravedad

q = gasto por unidad de ancho.

Esta expresión se puede utilizar para predecir el espesor de una capa retirada de cualquier depósito que se aproxima al criterio de la geometría y profundidad que se necesita para un patrón de flujo bidimensional y que tiene la entrada en el fondo. Sustituyendo el valor del número de Froude de 0.28 y reacomodando la expresión anterior se obtiene:

$$d^4 = \frac{g^2 h}{(0.28)^2 g'}$$

donde:

$$g' = g \left( \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \right)$$

El autor Harleman se basa en un patrón de flujo tridimensional en un punto sumergido y fluido estratificado en dos capas. La máxima profundidad de separación de la capa más baja sin una separación simultánea de la capa más alta para una aproximación radial de 360° se determina por la ecuación:

$$d^5 = \frac{16Q^2}{4.2\pi^2 g'}$$

donde:

Q = flujo total en el conducto de descarga

Para flujos que se aproximan a un ángulo cerca de 90° el gasto Q debe multiplicarse por un factor de 4; para flujos de un ángulo de 60°, el factor será 6.

Las expresiones teóricas de los autores Debler y Harleman se han desarrollado para dos extremos opuestos idealizados de un patrón de flujo y gradientes de temperatura y definen un intervalo dentro del cual se esperan condiciones actuales. Sin embargo las condiciones locales y la geometría del depósito son difíciles de relacionar a expresiones matemáticas rígidas, las predicciones teóricas se deben afinar con el criterio profesional en función de la experiencia práctica.

#### 4.13 Temperatura natural e inducida en depósitos profundos

La determinación del efecto de la descarga térmica en un depósito profundo sigue siendo inexacta. Además de las variables climatológicas, existen otros factores generadores de modificaciones que no se pueden medir con tanta precisión. Aunque un cuerpo de conocimiento científico esté disponible para evaluar situaciones idealizadas, se debe reconocer que en la evaluación de cualquier situación práctica es necesario hacer ciertas suposiciones y juicios acerca de la influencia de esos factores menos precisos de medir. El avance actual de la ciencia no logra obtener una solución directa; se deben realizar numerosos cálculos bajo suposiciones lógicas para definir una gama de condiciones resultantes dentro de la cual se puedan elaborar juicios.

#### 4.14 Consideraciones de dos o más fuentes de desechos con alta temperatura

A medida que la tendencia hacia la concentración del desarrollo de grandes plantas termoeléctricas de energía continúe, se tomarán ventajas de depósitos grandes y profundos para agua de condensado y para la disipación del calor de desecho. También es de esperarse que dos o más plantas termoeléctricas se localicen en un solo depósito o en un sistema interconectado. La capacidad de reserva para la disipación de las descargas adicionales de calor de desecho es adecuada si se toma ventaja de sitios lejanos para prevenir un traslape grave de perfiles de la temperatura superficial.

Aunque el efecto de descargas de calor de desecho múltiples se puede calcular teóricamente a partir de varias suposiciones de distribución de calor y el área efectiva del depósito, no hay un método confiable, hasta que algunas de las unidades térmicas estén realmente operando y se puedan realizar mediciones de campo. Debido a que la construcción de algunas plantas se programa para realizarse en un período determinado de años se tiene la posibilidad de verificar la influencia de factores locales registrando las temperaturas y los patrones de flujo de los depósitos afectados.

Para lograr un buen programa de registro, debe establecerse al menos una estación climatológica en un lugar apropiado para determinar la temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento. El desplazamiento vertical y horizontal del depósito para perfiles de temperatura y los gradientes deben tomarse bajo condiciones estables a través de las estaciones, tanto antes como durante la operación de las unidades térmicas. Luces infrarrojas sobre el depósito también ayudan a definir sus fronteras, la temperatura de la superficie del agua y perfiles.

A medida que se tienen disponibles datos de mediciones de campo, se pueden refinar la aplicación de cálculo teóricos, reduciendo suposiciones y mejorando la precisión. Tales estudios, combinando medidas de campo y análisis teóricos, podrían formar la base para la selección del sitio de otra planta térmica y las limitaciones en la capacidad de plantas termoeléctricas adicionales.

## Capítulo 5

## Capítulo 5

**MEDIDAS PARA MITIGAR EL IMPACTO POR DESCARGAS DE AGUAS  
RESIDUALES CON ALTA TEMPERATURA**

El calor de desecho contenido en el efluente principalmente de la industria generadora de energía que emplea combustibles fósiles, así como de las industrias que utilizan condensadores se disipa de manera natural en los diferentes cuerpos receptores; pero esperar únicamente que lo anterior ocurra no representa una condición favorable para los cuerpos receptores.

Es conveniente considerar la posibilidad de disminuir el efecto negativo de las descargas de aguas residuales con alta temperatura, particularmente las que resultan del proceso de enfriamiento. En este capítulo se presentan algunas medidas de mitigación para el impacto por descargas de agua con alta temperatura.

**5.1 Aprovechamiento y control de desechos**

Cuando se tienen desechos producto de una actividad humana el hombre puede hacer alguna de las siguientes tres acciones:

a) Puede verterlos, sin ningún tratamiento, en el medio apropiado más cercano, como el aire o en un cuerpo receptor como un río o un lago, también puede depositarlos en la tierra, en un pozo o en el mar.

b) Puede depositarlos y tratarlos en un sitio destinado al aprovechamiento de desechos ambientales (parque de desechos), en el que algunos sistemas biológicos de tratamiento como lagunas de oxidación, bosques de irrigación por aspersión y rellenos de tierra realizan la mayor parte de la acción de degradación, estabilización y recirculación.

c) Tratarlos en sistemas artificiales químicos-mecánicos de regeneración.

La primera opción está basada en la idea de que "la solución de la contaminación está en la dilución"; ha sido y es la manera principal de eliminación de desechos que se utiliza en casi todos los lugares. De esta manera, se ha observado la tendencia de algunas industrias y ciudades a establecerse a lo largo de corrientes superficiales que proporcionan un alcantarillado gratuito. Esta solución no debería practicarse por mucho tiempo más porque las alteraciones en los ecosistemas particularmente en el sitio de las descargas pueden ser muy severas, debiéndose tomar con reservas su realización, mediante un análisis previo de impacto ambiental.

La segunda opción se considera uno de los métodos más económicos para evitar la contaminación ambiental producida por el volumen de desechos que en la actualidad reducen la calidad del espacio en que vive el hombre y ponen en peligro su salud. El empleo de áreas laterales grandes para el tratamiento seminatural de los desechos deja al mismo tiempo un valioso espacio libre que protege no únicamente la calidad ambiental en general sino que proporciona además usos como son la producción de alimentos y de fibras, el intercambio de gases atmosféricos, recreo, etc. Dos ejemplos de la disposición de un parque de desechos se presentan en las Figuras 5.1 y 5.2; en la primera se muestra la manera en que los desechos de refinerías de petróleo son tratados por medio de lagunas o depósitos en serie, en la segunda se presenta un proyecto hipotético para el tratamiento de la contaminación térmica de una planta nueva de generación de energía. En ambos casos, el agua sale del área delimitada de tratamiento y se dirige al cuerpo o medio receptor libre de contaminación; en muchas ocasiones los tanques de desechos se diseñan por sí solos para que puedan resistir la concentración de contaminantes que ingresen, requiriendo un grado mínimo de ingeniería y atención por parte del hombre. Es necesario el empleo de grandes extensiones de área y de agua para que la naturaleza realice su trabajo; las nuevas industrias y las plantas municipales de tratamiento no deben seguirse instalando en las márgenes de ríos o en medio de áreas muy pobladas, sino que deberían ubicarse en medio de áreas naturales lo suficientemente grandes para el tratamiento de todo tipo de desechos.

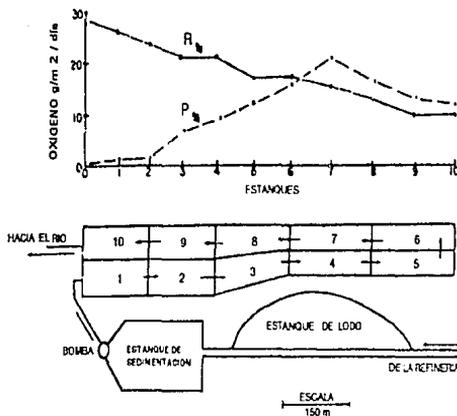


Figura 5.1 Ejemplo de parque de aprovechamiento de desechos que combina los tratamientos seminatural, secundario y terciario de los desechos de una refinería.

Notas con respecto a la figura 5.1:

El tratamiento de desechos de una refinería de petróleo de Oklahoma se efectúa a bajo costo haciendo circular los líquidos de salida de la refinería lentamente a través de lagunas y estanques operando en serie (diagrama inferior en la Figura 5.1). Como se puede observar en la gráfica de la Figura 5.1, la vigilancia de la producción de oxígeno (P) y su utilización (R) en cada estanque demuestra que las comunidades de estanque natural "auto diseñadas" degradan la materia orgánica y establecen un buen equilibrio entre P y R en el momento en que el agua llega al décimo depósito y es reconducida a los cuerpos acuáticos cercanos. (Copeland y Dorris, 1964).

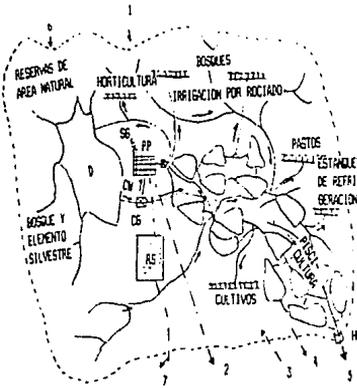


Figura 5.2 Diseño esquemático de un parque de aprovechamiento de desechos de una planta generadora de energía (PP), situada en la cuenca de una vertiente natural.

Notas con respecto a la figura 5.2:

El calor de desecho en el agua de refrigeración del condensador (CW) que sale de un gran depósito de almacenamientos es disipado totalmente por refrigeración de evaporación de la red de estanques de poca profundidad y de sistemas de irrigación por rociado. Los estanques con temperatura elevada podrían utilizarse para la piscicultura, la pesca deportiva u otras actividades recreativas. La irrigación de partes de la vertiente terrestre aumenta el rendimiento de productos forestales o agrícolas útiles, al paso que hace recircular de manera simultánea el agua a través del "filtro viviente" de la tierra, reconduciéndola en los ríos, estanques y el nivel freático. Los desechos sólidos (RS) ubicados en un terraplén son trasladados hacia rellenos sanitarios para su disposición final; la corriente del río y los gases generados son vigilados continuamente por vertederos hidrológicos (HW) y sistemas de control de gases acumulados (SG) con la finalidad de que no exista ninguna contaminación en el área controlada. Las entradas y salidas principales de este sistema ambiental comprenden :

- 1.- Entrada de luz solar y precipitación pluvial
- 2.- Corriente de alta tensión a las ciudades y sitio de demanda.
- 3.- Entrada de combustible fósil y otros.
- 4.- Salida de alimento, fibras, aire puro, etc.
- 5.- Corriente río abajo de agua pura para la agricultura, la industria, las ciudades, etc.
- 6.- Uso público y profesional para recreo, enseñanza e investigación ecológica.
- 7.- Transporte de residuos sólidos a disposición final

El tamaño del parque completo de aprovechamiento de desechos de esta clase dependerá del clima y topografía regional, así como de la cantidad de energía eléctrica que se genere; una extensión del orden de 4000 hectáreas ( $4 \times 10^6 \text{ m}^2$ ) para una central de 2500 MW será la mínima que se requeriría para asegurar un control del 100% de la contaminación, considerando los accidentes y descomposturas mecánicas posibles. Semejante capacidad de tratamiento de desechos podría soportar también una cierta cantidad de industria ligera dentro del parque; sin embargo la industria pesada deberá situarse dentro de su propio parque de aprovechamiento de desechos.

En el pasado, los planificadores urbanos consideraban que de 12 a 25 hectáreas (12 x 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup> a 25 x 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>) constituían un espacio apropiado para un parque industrial; para un aprovechamiento de desechos en conjunto se podrían requerir de manera aproximada de 250 a 2500 hectáreas (250 x 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup> a 2500 x 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>) para un complejo industrial grande.

Los mayores obstáculos para operar con la naturaleza son de carácter legal, económico y político; si la industria privada y los municipios no proyectan por anticipado o no pueden hacerlo (debido a una legislación inadecuada), el hombre se verá obligado cada vez más a orientarse hacia la tercera opción, más costosa y técnicamente difícil del tratamiento artificial; por supuesto, el tratamiento y la recirculación abióticos son necesarios para algunos tipos de desechos, especialmente en áreas industriales densamente pobladas.

5.2 Utilización del calor de desecho

El agua contaminada únicamente por alta temperatura se puede emplear en grandes cantidades para diferentes usos; puede mejorar las condiciones de crecimiento en grandes invernaderos; los costos del invernadero y de los sistemas de manipulación del agua son elevados, así que la rentabilidad podría depender del arreglo que pueda lograrse entre los agricultores y las compañías generadoras de energía. Desafortunadamente los invernaderos no demandan agua caliente en verano, que es la época en que las demandas de energía para aire acondicionado son altas, y los efectos nocivos de la contaminación térmica sobre los ecosistemas acuáticos tienden a ser más graves.

El empleo de agua con temperatura elevada para el riego de cultivos al aire libre puede tener muchos beneficios; el agua con alta temperatura que circula en tubos cerrados se puede utilizar para calentar el suelo sin regarlo, lo cual trae consigo un aumento en el rendimiento tal como lo ilustra el Cuadro 5.1 en el que se presentan los efectos del calentamiento del suelo sobre la producción de hortalizas en una localidad de Alabama.

Cuadro 5.1 Efectos del calentamiento del suelo sin irrigación sobre la producción de hortalizas en Muscle Shoals, Alabama

Planta	Rendimiento (ton/ha)	
	Con calor	Sin calor
Habichuelas verdes	6.9	2.7
Maz: tierno	6.2	3.2
Calabaza de verano	20.6	17.6

Debido a que algunas plantas industriales añaden venenos químicos al agua para eliminar la formación de algas en los condensadores no se recomienda el uso de esta agua para la irrigación, pero sí se puede emplear en un sistema cerrado para el calentamiento del suelo; debe considerarse que si una generadora de energía deja de operar en alguna época de frío, el flujo de agua caliente se detendría y podría perderse una cosecha completa.

Se ha establecido que una elevación de la temperatura del agua trae consigo trastornos en las especies acuáticas, pero no en todas, algunos peces principalmente en la etapa de desarrollo, tienen una tasa de crecimiento mayor cuando la temperatura es cuidadosamente controlada. Los promotores de la piscicultura, que es la ciencia y práctica de la crianza de peces en estanques o piscinas controladas con medios artificiales, sostienen que es posible obtener una alta producción de alimentos si se dispone de agua caliente barata; por ejemplo, los piscicultores japoneses mantienen hasta 3,5 millones de kilogramos de carpa por hectárea ( $10^4 \text{ m}^2$ ), de acuerdo con los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua los ámbitos de temperatura permisibles para esta especie es de 20 a 30°C. De esta manera se observa que una descarga de agua con alta temperatura puede ser perjudicial para un ecosistema entero pero puede traer beneficios a una determinada especie; pero se tienen problemas similares a los que se generan en los invernaderos ya que deben eliminarse de alguna manera cantidades importantes de agua contaminada con alta temperatura.

Otro posible uso del agua con alta temperatura es bombearla en radiadores de edificaciones en la época invernal; aunque puede ser demasiado costosa esta alternativa debido a que generalmente los habitantes de la ciudad prefieren establecerse en lugares distantes de las centrales de energía eléctrica y los grandes costos y pérdidas de calor que trae consigo la distribución de agua con alta temperatura por tuberías a lugares distantes pueden ser excesivos. También, la instalación de un sistema subterráneo de vapor sería una tarea muy complicada en una ciudad grande, ya construida; esta propuesta podría practicarse en zonas recién construidas. Además debe considerarse que las demandas de máxima energía no coinciden con las demandas máximas de calefacción; es decir, el consumo máximo de energía eléctrica se presenta en la tarde, en tanto que durante la horas de la noche la demanda es baja. Se requeriría algún servicio de almacenamiento o un generador auxiliar de vapor con el fin de proporcionar calor al atardecer y por la noche. A pesar de las dificultades anteriores la perspectiva de calor gratuito es atractiva, y en algunos sitios las propuestas al respecto se están analizando de manera cuidadosa.

El agua residual contaminada únicamente por alta temperatura se puede utilizar también para acelerar el proceso de descomposición de otras aguas residuales (sin existir contacto entre estas aguas), o también para desalar el agua de mar; también debe hacerse un análisis detallado de los costos de estas propuestas.

También se puede mitigar el problema de la contaminación por aguas residuales con alta temperatura en los cuerpos receptores si se piensa en eliminar el calor en el aire. La capacidad del aire por unidad de volumen para absorber el calor es muy inferior a la del agua, de tal manera que la acción directa del aire como medio refrigerante no es muy favorable; debido a lo anterior las centrales termoeléctricas se ubican cerca de alguna corriente de agua, que es el único elemento refrigerante disponible. Pero se puede hacer que el agua pierda algo de su calor y lo lance hacia la atmósfera para después, ya con una temperatura baja, ser reciclada en el condensador; existen varios dispositivos que efectúan ese intercambio.

Dos técnicas de bajo costo se basan en el hecho de que la evaporación del agua es un proceso refrigerante. Algunas centrales de energía se limitan a sus propios lagos poco profundos denominados estanques de enfriamiento. El agua con alta temperatura se envía mediante bombas al estanque o depósito, en donde la evaporación y el contacto directo con el aire la enfrían; el agua fría es conducida al condensador desde algún punto distante del tubo de desagüe. Debe añadirse periódicamente agua de fuentes externas para compensar el agua perdida por evaporación y mantener la profundidad del depósito.

Los depósitos de enfriamiento se deben ubicar donde el terreno no sea muy caro, una central de 1 000 000 kW necesita una superficie de 400 a 800 hectáreas ( $4 \times 10^6$  a  $8 \times 10^6$  m<sup>2</sup>), de manera que el costo de la tierra puede ser excesivo.

La torre de enfriamiento que puede sustituir al depósito o estanque es una estructura grande, en promedio de 180 m de diámetro en su base y 150 m de altura. El agua caliente es conducida a la parte alta de la torre mediante bombeo y es rociada sobre una malla de madera; el aire es introducido en la torre con ayuda de grandes ventiladores o por corrientes de convección, es decir la circulación producida por el movimiento continuo del aire caliente hacia arriba y del aire frío hacia abajo, y pasa por el vapor de agua. Se produce enfriamiento por evaporación y el agua fría se recolecta en el fondo de la torre.

Es así como el agua con alta temperatura no se agrega a los ecosistemas acuáticos; pero se presenta la desventaja de que la torre de enfriamiento pierde más de 3.8 millones de litros de agua diarios debido a la evaporación. También los vapores generan nubosidades alrededor de estos dispositivos que reducen la luz solar en las áreas vecinas; la reacción del vapor de agua con emisiones de sulfuros provenientes de centrales que funcionan con carbón puede producir aerosoles de ácido sulfúrico presentes en el aire.

Se pueden mitigar los problemas ambientales que se generarían si en lugar de torres de enfriamiento húmedas, como la de la Figura 5.3, se utilizan torres de enfriamiento secas, como la presentada en la Figura 5.4, que son una versión en grande de un radiador de automóvil, instalado en una torre para favorecer un flujo rápido de aire por los tubos de enfriamiento. Este tipo de torres son poco económicas debido a que se requieren grandes cantidades de tubería.

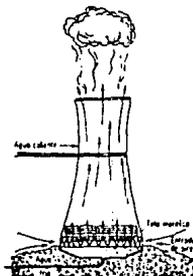


Figura 5.3 Torre de enfriamiento húmeda.

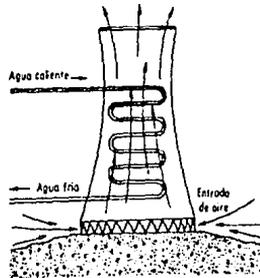


Figura 5.4 Torre de enfriamiento seco.

Costos relativos de los tres servicios de enfriamiento en Estados Unidos de América se presentan en el Cuadro 5.2.

Cuadro 5.2 Costos del control de la contaminación por agua residual con alta temperatura para una central que utiliza combustible fósil

Clase de control	Costo medio calculado [mil/kW.h]
Estanque de refrigeración	0.08
Torre húmeda, tiro mecánico	0.10
Torre húmeda, tiro natural	0.18
Torre seca, tiro mecánico	0.81
Torre seca, tiro natural	0.99

\* Valores obtenidos considerando un costo de la electricidad de aproximadamente un centavo de dólar por kW.h para consumidores que gastan 1 000 kW.h por mes, suponiendo que no se utilice agua recirculada alguna para el enfriamiento. Las cifras de esta columna representan, por lo tanto, el costo añadido por el control de la contaminación por agua residual con alta temperatura.

un mil = una décima de centavo de dólar.

### 5.3 Sistemas de enfriamiento para Plantas Termoeléctricas

Los sistemas de enfriamiento pueden ser abiertos o cerrados; los primeros son aquellos en los que el agua de enfriamiento que pasa por los condensadores no vuelve a circular por los mismos, mientras que los sistemas de enfriamiento cerrados son los que requieren de un sistema disipador de calor que permita recircular en corto tiempo el agua para los condensadores, es decir, el agua que circula por los condensadores, una vez utilizada, debe ser enfriada para volver a ser usada como enfriador.

#### 5.3.1 Sistemas abiertos

Para el tratamiento de sistemas abiertos en los que se puede emplear el mar o ríos como disipadores de calor, se debe hacer énfasis en la determinación del gradiente de temperatura en la región cercana a las descargas.

En una termoeléctrica situada junto al mar, se requiere considerar la ubicación, tipo y la geometría particular de la obra de toma y descarga. En el diseño deberá evitarse, hasta donde sea económicamente conveniente, la recirculación de agua caliente por la toma y la entrada de arena y sedimentos por la misma.

Se considerará el impacto que cada alternativa produce al ecosistema y al turismo. Si es factible se debe aprovechar para enfriamiento el agua más fría, la cual se encuentra a mayor profundidad en caso de existir estratificación.

En una descarga superficial de agua con alta temperatura debe calcularse tanto la velocidad como la distribución horizontal y vertical de temperaturas con el fin de establecer :

a) El grado de recirculación de agua con alta temperatura que existirá por la obra de toma para determinar el efecto que ese incremento de temperatura tendrá sobre el rendimiento de la planta.

b) El impacto ambiental, verificando al mismo tiempo si se está cumpliendo con las leyes de protección ambiental relativas a descargas térmicas.

Para determinar la velocidad y el gradiente de temperatura, es necesario conocer las profundidades ( batimetría) del sitio, la historia de la temperatura en las cercanías de la toma y descarga , así como los siguientes parámetros meteorológicos en promedios mensuales: temperatura del aire, velocidad, dirección del viento, humedad relativa, radiación solar y nubosidad. Si la descarga es en un río, el gradiente de temperatura se puede calcular de manera unidimensional.

#### Descargas submarinas

La descarga del agua de enfriamiento de los condensadores se efectuará mediante emisores submarinos cuando lo impongan las siguientes circunstancias:

1. Que por razones de protección ambiental no se permita alterar la temperatura del agua en las cercanías de la costa.
2. Que por razones de espacio sea imposible alejar lo suficiente la toma de la descarga por no exceder un límite máximo de recirculación de agua caliente por la toma.
3. Que otras razones lo aconsejen.

La descarga submarina consiste en una o varias tuberías enterradas en el fondo del cuerpo receptor que rematan en uno o varios difusores.

La obra de descarga más económica en un sistema marino es la descarga al mar por medio de un canal abierto. En la zona cercana a la descarga casi todo el enfriamiento es por mezclado del chorro con el agua del mar. Después de que la pluma con la temperatura elevada recorre una distancia no muy grande, el enfriamiento será principalmente por intercambio de calor con la atmósfera y prácticamente nulo por intercambio de calor con el agua de mar sobre la cual flota.

### 5.3.2 Sistemas cerrados

Los sistemas cerrados más comunes son:

- Estanques de enfriamiento
- Torres de enfriamiento

En los primeros ocurre un intercambio de calor entre la superficie del estanque y la atmósfera por medio de radiación, evaporación y convección. En las torres de enfriamiento, el agua caliente es elevada mediante bombas a la parte superior de una torre desde donde se deja caer en forma de lluvia en contracorriente con un flujo de aire; el enfriamiento en este caso es principalmente por evaporación.

En un circuito cerrado, la cantidad de calor entregada al agua en el condensador es siempre igual a la cantidad de calor disipado en el enfriador, que puede ser una torre o un estanque. Esto quiere decir que si a una planta termoeléctrica que genere 1000 MW y disipe al condensador unas  $10^9$  kcal/h con un incremento de temperatura en los condensadores de  $8^{\circ}\text{C}$ , se le pone como disipador de calor un estanque artificial; el tanque siempre disipará a la atmósfera  $10^9$  kcal/h y tendrá una diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de  $8^{\circ}\text{C}$ . Esto sucede aunque el estanque tenga 1, 10 ó 1000 ha ( $10000$ ,  $10 \times 10^4$ ,  $1000 \times 10^4 \text{ m}^2$ ) de superficie, es decir es independiente del tamaño del estanque (o de la torre). En un buen diseño lo que interesa conocer es la temperatura del agua de enfriamiento que entra al condensador para así obtener el rendimiento de la planta.

#### Estanques de enfriamiento

Una alternativa eficiente y económica para enfriar en circuito cerrado el agua utilizada en los condensadores es el uso de depósitos de enfriamiento.

Un estanque de enfriamiento es un cuerpo de agua grande donde se toma el agua para enfriamiento de los condensadores, la descarga de agua caliente se efectúa al mismo estanque donde se enfría por intercambio de calor con la atmósfera.

Los estanques de enfriamiento se clasifican en naturales y artificiales; los estanques artificiales son los que se construyen mediante diques perimetrales o aprovechando la topografía y provocando un embalse mediante una pequeña presa, con el fin principal de servir para el enfriamiento de plantas termoeléctricas. Los estanques naturales son los ya existentes (lagos, embalses para riego o generación hidroeléctrica) y que en forma secundaria se aprovechan para enfriamiento de una planta termoeléctrica.

El estudio y diseño de un estanque de enfriamiento se centra en determinar la temperatura del agua a la entrada de los condensadores y el consumo de agua inducido por la planta termoeléctrica.

Con el fin de reducir el costo de un estanque de enfriamiento, se puede utilizar un cuerpo de agua ya existente, por ejemplo un lago; pero surgen los siguientes problemas:

a) Se aumentará la temperatura natural del lago lo que trae consigo alteración en los ecosistemas acuáticos.

b) Se hará circular prácticamente toda el agua del lago por los condensadores al cabo de un cierto tiempo, lo que implica provocar un cambio súbito de temperatura y presión al pasar por el sistema de enfriamiento a todo el plancton del lago.

c) La evaporación del agua producida por la descarga térmica alterará el balance hidrológico, lo que puede generar variaciones importantes en los niveles del lago.

Si se tienen lagos suficientemente grandes se sugiere aislar un extremo del lago, por medio de un bordo, para no implicar a todo el cuerpo de agua en el proceso.

Otra manera de reducir costos es producir de manera artificial un embalse, construyendo una presa pequeña en una corriente con fines de enfriamiento de una termoeléctrica, en este caso se tendría las siguientes situaciones:

a) La cantidad de agua consumida por la termoeléctrica será la debida a la evaporación natural en el nuevo embalse, más la que se evapora por aumento de temperatura generado por la planta y la que se infiltra por inundación en zonas de alta permeabilidad.

b) El terreno inundado formará parte del costo de la planta.

c) La presa deberá contar con un sistema de regulación de niveles para que se almacene agua en época de lluvias. Debe tomarse en cuenta que en un estanque de enfriamiento deberán evitarse variaciones de nivel excesivas, porque éstas afectan la operación de las bombas.

Con respecto a este último caso se podría considerar como estanque de enfriamiento las presas construidas con fines de generación hidroeléctricas o de riego. Debido a que en una presa existen fuertes gradientes de temperatura vertical, se puede aprovechar el agua fría del fondo y descargar el agua con alta temperatura en la superficie.

Un estanque artificial puede ser el medio más económico y seguro para el enfriamiento de plantas termoeléctricas, especialmente en sitios en los que son más eficaces que las torres de enfriamiento por las condiciones climatológicas (por ejemplo en el norte del país); así como en suelos que no requieran impermeabilización para impedir infiltraciones.

Una ventaja de los estanques de enfriamiento sobre las torres es que no producen neblina intensa, tampoco hay arrastre de gotas hacia la atmósfera, que puede ser dañino para la subestación o posibles sembradíos existentes en las cercanías de la planta.

Un estanque de enfriamiento se puede utilizar con fines recreativos y para la crianza de peces que se adapten a las condiciones de temperatura y oxígeno disuelto durante la operación.

Un grave inconveniente de este tipo de sistema de enfriamiento es el generado por las variaciones de nivel del vaso. Las bombas de agua de circulación deben operar dentro de un intervalo de presión en la succión muy reducido lo que a veces no se puede lograr, pudiéndose generar cavitación en la tubería.

#### Torres de enfriamiento

El arreglo más común para enfriar el agua de circulación de una planta termoeléctrica son las torres de enfriamiento; se prefieren porque son sencillas de montar y operar además de que su comportamiento se puede predecir con gran exactitud.

Algunas variedades de torre de enfriamiento para plantas termoeléctricas son las torres húmedas de tiro inducido con ventiladores y flujo cruzado, de arreglo rectangular; la mayoría de las plantas termoeléctricas que emplean torres de enfriamiento las tienen de flujo cruzado; su costo, materiales y arreglos varían según el fabricante.

Cuando es escasa la disponibilidad de agua se emplean torres secas combinadas con torres húmedas; la planta opera en forma normal con torres secas y en las horas de mayor calor se auxilia con una torre húmeda.

Se debe considerar que todo sistema de enfriamiento produce algún impacto sobre el ambiente debido a que siempre se estará generando calor de desecho a una tasa de 130 partes de calor por cada 100 partes de electricidad que se genere, como mínimo.

Se debe tomar en cuenta el impacto de la toma de agua utilizada. Para un diseño normal, por la toma podrán circular en forma aproximada  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  por cada 100 MW instalados. Lo anterior implica un flujo permanente de miles de microorganismos vivos (plancton) que pasarán por los rodets de las bombas de agua de circulación durante toda la vida de la planta; posteriormente los microorganismos presentes en el agua de circulación se someterán a un incremento brusco de la presión e inmediatamente después un cambio repentino de la temperatura en unos  $8^\circ\text{C}$  y finalmente regresarán a su medio ambiente, en ocasiones acompañados de una dosis considerable de cloro.

Es importante tener estudios de la distribución estacional del plancton en las cercanías de los sitios probables de ubicación de la toma; de esta manera se podrá seleccionar el sitio donde se produzcan los menores impactos en flora y fauna acuática, particularmente aquella más sensible a los cambios de presión y temperatura.

La descarga de agua caliente a un cuerpo receptor, por ejemplo el mar, alterará el medio ambiente en los sitios cercanos a ella. En el caso del mar, algunas veces la poca profundidad y corrientes marinas transversales provocan que el efluente de aguas residuales se ubique en las playas. En el caso antes mencionado el daño puede ser muy severo debido a que la zona perimetral a la costa es generalmente la más fértil, además de que se presenta una disminución en el enfriamiento por mezclado, por la baja profundidad, y una ampliación de la zona afectada por una temperatura elevada.

Otros posibles efectos contaminantes de las descargas, diferentes a los efectos que pueden presentarse en el mar son los siguientes:

a) Cuando se realizan descargas a estanques naturales la temperatura del cuerpo de agua completo se verá afectada. Ya se ha establecido que pueden producir alteraciones significativas en la flora y la fauna; además de que la descarga térmica incrementará la evaporación lo que modificará el balance hidrológico.

b) Cuando se emplean torres de enfriamiento se produce contaminación por el ruido producido por los ventiladores que éstas emplean, por la pluma de vapor que sale de la parte superior y que provoca, bajo ciertas condiciones meteorológicas, espesas neblinas que pueden dificultar el tráfico en caminos de acceso a la planta.

c) El arrastre de gotitas de agua con una concentración alta de sales, puede afectar los cultivos de las cercanías e incluso puede propiciar la formación de depósitos salinos en aisladores de la subestación cercana.

Cuando se ha decidido utilizar un sistema cerrado de enfriamiento en una planta termoeléctrica, es necesario comparar las ventajas entre torre y estanque. Esta comparación debe hacerse considerando, entre otros, los siguientes puntos:

a) Rendimiento térmico de la planta, generalmente el rendimiento de una planta utilizando una torre es casi el mismo que el obtenido empleando un estanque.

b) Consumo de agua. En un estanque el consumo de agua es por la evaporación natural y también por la evaporación generada por la descarga térmica y el consumo total es muy similar o en ocasiones inferior al de una torre.

c) Energía consumida. La energía consumida por bombeo y ventiladores es considerablemente mayor en una torre que en un estanque.

d) Costo inicial. El costo inicial de la inversión está afectado por el costo del terreno y por el tipo de suelo que podría traer consigo o no la necesidad de impermeabilizar el fondo del tanque, el costo también está afectado por la importancia que se le asigne durante el análisis a la mano de obra empleada y otros componentes que son de importancia.

e) Mantenimiento. En un estanque el mantenimiento es mínimo excepto cuando se llega a reproducir maleza acuática que altere el enfriamiento y la evaporación además de obstruir las rejillas en la succión de las aguas de circulación.

#### 5.4 Consideraciones en la evaluación de técnicas para controlar las descargas de aguas residuales con alta temperatura en plantas termoeléctricas

A continuación se establecen algunas consideraciones con respecto a las descargas de aguas residuales con alta temperatura:

1. Las descargas no controladas de aguas residuales con alta temperatura pueden provocar alteración en el medio circundante.
2. Las descargas térmicas pueden ser controladas, tal control debe ser factible de realizar técnica y económicamente.
3. El control de las descargas térmicas puede provocar otros efectos ambientales: daños en instalaciones mecánicas de la planta analizada, daños químicos, etc.

Los sitios potenciales para realizar una descarga térmica deben ser evaluados de manera cuidadosa, la descarga debe manejarse de tal manera de que cause la menor cantidad de impactos ambientales tanto por la contaminación térmica como otros efectos; la descarga debe cumplir con los criterios de calidad del agua que establecen las normas, además de ajustarse a las condiciones particulares establecidas.

Deberán considerarse además los siguientes aspectos:

- Selección del sitio
- Sistemas de enfriamiento abiertos
- Sistemas de enfriamiento cerrados

##### 5.4.1 Selección del sitio

En la evaluación de los métodos alternativos para el control de las descargas con altas temperaturas, debe reconocerse que las características del sitio de la planta de energía determinan las alternativas factibles; la disponibilidad del agua de enfriamiento es únicamente uno de los varios factores que deben considerarse en la selección del sitio.

El proceso para seleccionar un sitio para una planta termoeléctrica es muy complejo; se requiere tomar decisiones de carácter económico, social, técnico, legal y político.

Algunos parámetros a considerar en la selección del sitio son:

- a) Factores de localización
- b) Requerimientos de agua de enfriamiento
- c) Factores meteorológicos.

### a) Factores de localización

Los factores primarios que definirán la ubicación son:

*Localización del combustible.* Para plantas que operan con combustibles fósiles la distancia de la fuente de combustible es un criterio muy importante para la selección del sitio. Disminuyendo la distancia entre la planta y el abastecimiento de combustible se pueden tener beneficios económicos y ambientales.

*Distancia al centro distribuidor de la energía generada.* La transmisión de la energía eléctrica es costosa; los costos directos incluyen el del derecho de vía, torres de transmisión y líneas de energía, así como los costos de construcción. También quedan incluidos los costos de operación y mantenimiento; las pérdidas en la línea eléctrica disminuyen la energía total para el consumo. Todos estos factores se combinan para que sea preferible la generación de energía en el sitio más cercano posible al consumidor o centro distribuidor. La distancia del centro distribuidor será un parámetro importante de selección del sitio.

*Acceso al sitio.* La construcción de grandes estaciones de energía requiere importantes cantidades de materiales y equipo; la facilidad del acceso al sitio de la planta, por vía férrea, acuática o terrestre es un factor a considerar en los costos de construcción.

*Disponibilidad del suelo.* Las plantas termoeléctricas modernas requieren grandes áreas de tierra para ubicarlas. El área total mínima para una estación carboceléctrica de 1 000 MW es cercana a los  $607.03 \times 10^3 \text{ m}^2$  a  $809.37 \times 10^2 \text{ m}^2$  ( 150-200 acres), incluyendo el espacio para el almacenamiento del carbón, laguna para la disposición de cenizas y estación del interruptor. Las torres de enfriamiento podrían requerir un área adicional de  $80.94 \times 10^2 \text{ m}^2$  a  $161.87 \times 10^2 \text{ m}^2$  (20-40 acres) y los requerimientos de área de una laguna o estanque de enfriamiento son casi del orden de  $8\ 093.75 \times 10^2 \text{ m}^2$  ( 2 000 acres). No hay una guía bien establecida para estimar los requerimientos de área para las plantas, sin embargo se estima que  $4\ 046.873 \times 10^2 \text{ m}^2$  ( 1000 acres ) son suficientes en la mayoría de los casos.

Debido a que las plantas de energía requieren grandes terrenos, el costo de la tierra es un parámetro importante en la selección del sitio, también es importante en la evaluación de las alternativas de enfriamiento, por ejemplo los tamaños de los depósitos de enfriamiento y sus costos pueden variarse para minimizar los costos totales de la planta de energía.

Las condiciones del suelo también son importantes en la selección del terreno en donde se ubicará una planta de energía, como en toda estructura grande se deben construir cimentaciones apropiadas. Si el sitio corresponde a una zona sísmica deben tenerse consideraciones especiales de diseño. La permeabilidad del suelo también es importante en la selección de un sitio para lagunas receptoras de cenizas y de enfriamiento.

*Uso de la tierra.* Quedará a criterio de las autoridades la utilización de ciertos terrenos para establecer una planta generadora de energía; la utilización de tierra que antes tenía fines recreativos para el establecimiento de una planta de energía debe ser evaluado cuidadosamente; deben tomarse precauciones para no elegir y dañar sitios de valor geológico, histórico, o de un escenario ambiental importante. Es necesario un cuidadoso balance de las condiciones a favor y en contra de las alternativas de uso de la tierra, considerando que una de ellas puede ser la construcción de una planta de energía.

b) Requerimientos de agua de enfriamiento

Las grandes plantas de energía requieren cantidades enormes de agua con fines de enfriamiento; la disponibilidad del agua de enfriamiento es un factor primordial en la selección del sitio de la planta. La cantidad de agua requerida por una planta se basa en factores que incluyen el tamaño de la planta, la eficiencia térmica, la elevación de la temperatura a través del condensador y el tipo de sistema de enfriamiento.

En unidades del sistema inglés el calor específico del agua es de 1 BTU/lb°F ( es decir, por cada BTU de calor desechado en el condensador una libra de agua de enfriamiento eleva 1 °F su temperatura). En consecuencia para determinar la cantidad total de agua requerida para una planta analizada, se requiere información del calor total desechado al agua de enfriamiento y la elevación de la temperatura del agua de enfriamiento.

El calor de desecho absorbido por el agua de enfriamiento se puede determinar a partir del conocimiento de la eficiencia térmica de la planta. La eficiencia térmica total (  $\eta_c$  (%) ) de una planta termoeléctrica se calcula de la siguiente manera:

$$\eta_c (\%) = \frac{\text{Energía eléctrica producida}}{\text{Energía térmica de entrada}} \quad (5.1)$$

Para un kW-h :

$$\eta_c (\%) = \frac{3413 \text{ (BTU/kW h)}}{3413 \text{ (BTU/kW h)} + \text{Calor de desecho (BTU/kW h)}} \times 100 \quad (5.2)$$

El denominador de la ecuación 5.2 de la eficiencia representa "la tasa de calor" de una planta, que se define como la suma promedio de calor requerido para producir un kW-h de electricidad. No todo el calor de desecho indicado en el denominador de la expresión 5.2 pasa al agua de enfriamiento, por las pérdidas en el proceso . El diseño de la planta y datos de operación indican que el 15% de la entrada de calor es una aproximación razonable a esas pérdidas para plantas que utilizan combustibles fósiles; para cálculos basados en un kW-h esto iguala el 15% de la tasa de calor, así que la expresión resultante aplicable a plantas que utilizan combustible fósil resulta:

$$\text{Calor hacia el agua de enfriamiento (BTU/kW h)} = 0.85 \times \text{tasa de calor} - 3413 \quad (5.3)$$

Por ejemplo para una planta moderna que utiliza combustible fósil y que funciona con un 40% de eficiencia, la tasa de calor y el calor que va hacia el agua de enfriamiento son los siguientes:

$$\begin{array}{r} 3413 \text{ (BTU/kW.h)} \\ \text{Tasa de calor} = \frac{\quad}{\quad} = \frac{3413 \text{ (BTU/kW.h)}}{\quad} \\ \eta_c \qquad \qquad \qquad 0.40 \\ \hline 100 \end{array}$$

Tasa de calor = 8533 BTU/kW.h

Calor hacia el agua de enfriamiento = 0.85(8533) - 3413 = 3800 BTU/kW.h

La relación entre el tamaño de la planta, el flujo de agua de enfriamiento, la elevación de la temperatura y el calor de desecho hacia el agua de enfriamiento se puede expresar de la siguiente manera:

$$Q = 0.00445 \frac{(WH)(P)}{(\Delta T)(C_p)} \qquad (5.4)$$

Donde:

WH = Calor de desecho hacia el agua de enfriamiento en BTU/kW.h

P = Tamaño de la planta, MW<sub>e</sub>

Δ T = Elevación de la temperatura del agua de enfriamiento en °F

C<sub>p</sub> = Calor específico del agua = 1 BTU/lb°F

Q = Flujo de agua de enfriamiento en pie<sup>3</sup>/s

En la Figura 5.5 se muestra una representación gráfica para esta ecuación. A partir de ella se puede observar que una planta de 1000 MW<sub>e</sub> que utiliza combustible fósil requiere 840 pie<sup>3</sup>/s, que corresponden a 23.79 m<sup>3</sup>/s, de agua de enfriamiento para una elevación de la temperatura del agua de 20°F (11°C).

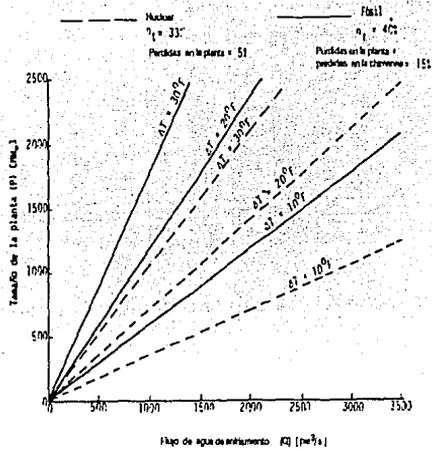


Figura 5.5 Requerimientos de agua de enfriamiento para plantas de energía que utilizan combustible fósil y plantas que utilizan combustible nuclear.

La Figura 5.5 también proporciona información de la cantidad de agua que debe circular por el condensador; para plantas que utilizan un sistema de enfriamiento abierto, esta cantidad corresponde a la suma de agua requerida en el sitio porque no hay recirculación. Para plantas que utilicen un sistema cerrado, el agua de enfriamiento es recirculada y únicamente debe obtenerse agua del sitio para reponer las pérdidas del sistema. Las torres de enfriamiento requieren para su construcción agua igual a cerca de 2 a 3% del flujo de agua de circulación. De esta manera los requerimientos del sitio de una planta de energía son de 30 a 50 veces más grandes para plantas que utilizan sistemas abiertos de enfriamiento que para las que usan sistemas cerrados con torres de enfriamiento húmedo. Si se utiliza un sistema de enfriamiento seco, los requerimientos de agua del sitio son nulos.

La recirculación del agua de enfriamiento en sistemas de enfriamiento cerrados es la manera más efectiva de reducir los requerimientos de agua en el sitio de la planta de energía. Otro medio para lograr este objetivo es utilizar equipo de generación de energía que no requiera agua de enfriamiento; las turbinas de gas son mucho menos eficientes que las turbinas de vapor e incluso aunque su uso se ha ido incrementado, se limita a la generación de energía cuando se tienen las mayores demandas. Con la combinación de la flexibilidad y rápido inicio del uso de turbinas de gas con una comprobada seguridad y eficiencia del ciclo de vapor, los requerimientos de agua de enfriamiento se pueden reducir y se pueden obtener altas eficiencias térmicas.

Pueden utilizarse plantas de energía de ciclo combinado; mediante la utilización de una turbina de gas de escape en el ciclo de vapor, se pueden lograr tasas de calor de 9000 BTU/kW h. Estas plantas de ciclo combinado son utilizadas tanto para las mayores demandas como para cargas de demanda moderadas, para tamaños de 125 a 250 MW<sub>e</sub>. Otra ventaja de la planta de ciclo combinado es el tiempo de construcción relativamente corto comparado con el de plantas termoeléctricas grandes.

En resumen, la disponibilidad de volúmenes grandes de agua en el sitio de una planta de energía puede o no ser un factor importante en la selección del sitio. Si se considera un sistema de enfriamiento abierto son necesarios grandes volúmenes de agua, si se usa un sistema cerrado con recirculación del agua de enfriamiento se necesita menos agua; también las plantas de ciclo combinado reducen bastante los requerimientos de agua de enfriamiento.

### c) Factores meteorológicos

El clima desempeña un papel muy importante en la operación de una planta termoeléctrica, es un factor que influye en la determinación de la energía requerida para la planta. Los días calurosos de verano y la gran demanda de aire acondicionado asociada a ellos obligan a las plantas a trabajar a su máxima capacidad; por otra parte los inviernos severos incrementan la demanda de calefactores y también se presentan valores pico en la demanda de energía eléctrica.

Las condiciones meteorológicas en el sitio son importantes en el diseño y operación de la planta por numerosas razones:

i. La dispersión de contaminantes potenciales del aire. Se deben evaluar cuidadosamente las condiciones del viento en el sitio para poder predecir la distribución de cenizas, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> de plantas que utilizan combustible fósil; el vapor de agua de torres de enfriamiento.

Los lugares abiertos, con buena ventilación son preferibles a los sitios encerrados en valles o en zonas en que se presentan severas inversiones atmosféricas a lo largo del año.

ii. El posible daño debido a un clima severo. Se deben tomar consideraciones especiales de diseño en áreas que tienen una historia de eventos meteorológicos severos tales como inundaciones, tornados o huracanes.

iii. La eficiencia del sistema de enfriamiento. La operación de los aparatos utilizados para disipar el calor de desecho depende principalmente del clima. Por lo tanto, se requiere saber de datos meteorológicos precisos y deben tomarse en cuenta las variaciones significativas en los factores climáticos con respecto a la estación.

La naturaleza del fenómeno de transferencia de calor con un aparato de enfriamiento en particular utilizado para disipar calor a la atmósfera determina los datos meteorológicos requeridos para ese aparato. Una recopilación de los mecanismos de transferencia de calor y sus datos meteorológicos asociados requeridos para los métodos de disipación de calor se proporcionan en el Cuadro 5.3.

Cuadro 5.3 Datos Meteorológicos requeridos para Métodos de Enfriamiento

Método de Enfriamiento	Mecanismo de Transferencia	Dato Meteorológico Requerido
Torres de Enfriamiento Evaporativo	Convección	Temperatura de bulbo seco
	Evaporación	Humedad relativa
Lagunas de enfriamiento	Radiación	Radiación Solar
	Convección	Temperatura de bulbo seco
	Evaporación	Humedad relativa* Velocidad del viento Nubosidad
Canales de enfriamiento por rocío	Evaporación	Temperatura de bulbo seco
	Convección	Humedad relativa Velocidad del viento
Torres de enfriamiento en seco	Convección	Temperatura de bulbo seco

\* Bulbo húmedo o temperatura del punto de rocío también se puede emplear.

### 5.4.2 Sistemas de enfriamiento abiertos

Un atributo común de todos los sistemas utilizados para disponer del calor de desecho de plantas termoeléctricas es que el calor finalmente es transferido a la atmósfera. Los sistemas abiertos que carecen de aparatos de enfriamiento utilizan el agua de ríos, lagos, estuarios o mares para absorber el calor de desecho antes de transferirlo a la atmósfera. Son los sistemas de enfriamiento más comunes que se utilizan en plantas termoeléctricas; en el pasado era poca la preocupación causada por la potencial contaminación térmica de estos sistemas; posteriormente se generaron técnicas de control para prevenir la recirculación de la descarga con alta temperatura hacia la toma; también se diseñaron tomas para optimizar el flujo del agua fría a la planta. Las técnicas empleadas incluían:

1. Muros desnatadores, situados en la cabeza del canal de la toma; estos aparatos obstruyen el flujo de las aguas superficiales con altas temperaturas y permiten el paso del agua profunda, fría hacia la planta.

2. Presas aguas abajo, ubicadas en los ríos inmediatamente aguas abajo del canal de la toma. Las presas constituyen una barrera para el agua fría y profunda, permitiendo que el agua con alta temperatura fluya aguas abajo y desviando al agua fría al canal de toma de la planta.

3. Diseño de la descarga para prevenir la recirculación. El método más factible es separar físicamente la descarga de la toma con la suficiente distancia; cuando no es posible, la descarga se puede diseñar para que se presente una rápida mezcla de la descarga del agua con alta temperatura con el ambiente de tal manera de reducir la diferencia de temperatura o permitir que la descarga de agua con alta temperatura flote en la superficie del agua receptora y utilizar muros desnatadores en la toma para prevenir su entrada a la planta.

La variedad de técnicas utilizadas en el diseño de la descarga de la toma, muestra que incluso cuando se utiliza un sistema de enfriamiento abierto el manejo de la descarga térmica es práctico, tal control ha sido practicado en algunos sitios para mantener una alta eficiencia en la planta de energía cuando se evita que el agua con alta temperatura entre a la toma.

El diseñador debe estar al tanto en la prevención de los efectos térmicos adversos y al mismo tiempo debe encontrar el compromiso previo para maximizar la eficiencia de la planta.

Estas dos metas son compatibles debido a que la reducción en la recirculación proporciona la reducción en el flujo de calor de desecho al medio acuático.

La metas del diseñador en la prevención de efectos térmicos debidos a las descargas de agua de enfriamiento son:

- Permitir una vía de paso para la migración de peces.
- Minimizar el área de la superficie y el volumen de agua afectado por el exceso de temperatura.
- Proteger la existencia de organismos valiosos dentro de la pluma con alta temperatura descargada.
- Reducir el número de organismos valiosos que pasan a través de la planta.

Estas metas deben ser alcanzadas a través de una selección sensata de la ubicación de las estructuras de toma y descarga, así como a partir de varias alternativas de diseño.

Las estructuras de toma normalmente se localizan en las orillas de ríos, pero en lagos y océanos su mejor localización es en la profundidad. Los organismos se pueden proteger de entrar a la toma utilizando un bloque mecánico con rejillas o mallas y reduciendo la velocidad de la toma por debajo de 0.3048 m/s. Tal medida se ha probado con éxito que evita la entrada de peces, no obstante el plancton y algunos huevecillos pelágicos generalmente están a merced de las corrientes y estos generalmente sí pasan a través de la planta.

#### 5.4.3 Sistemas de enfriamiento cerrados

Quando un cuerpo receptor es incapaz de soportar los efectos térmicos e hidráulicos de un sistema de enfriamiento abierto, es necesario utilizar un sistema de enfriamiento cerrado. Esta situación se presenta en muchos ríos y estuarios y puede también ocurrir en grandes cuerpos de agua en áreas donde existe ya un impacto ambiental o donde el ecosistema es frágil: por ejemplo, en áreas donde cargas de contaminantes han provocado cambios ecológicos, otro impacto por descargas con alta temperatura puede ser intolerable. También los sitios de importancia ecológica como áreas de desove de peces, bancos de mariscos o áreas con una flora acuática benéfica pueden dañarse por la descarga de un sistema abierto.

Ya se ha mencionado que existen varios dispositivos que son sistemas de enfriamiento cerrados que se pueden utilizar en plantas termeléctricas, se pueden incluir lagunas de enfriamiento, sistemas de enfriamiento por rocío, torres de enfriamiento húmedas, torres de enfriamiento en seco.

Las lagunas o lagos de enfriamiento son las más simples de los sistemas actualmente en uso. Se tienen lagos en los que se presentan los procesos naturales de intercambio de calor como son la evaporación, radiación y conducción-convección para transferir el calor de desecho a la atmósfera. Pueden requerirse para estos dispositivos de 4046.873 m<sup>2</sup> a 8093.746 m<sup>2</sup> (1-2 acres) por cada MW de capacidad de la planta. Además de considerarse un dispositivo de tratamiento del agua, también tiene un uso potencial para la recreación (nado, pesca, navegación, etc.) y para la piscicultura.

También se pueden utilizar sistemas de enfriamiento por rocío o goteo; muchos de esos sistemas operan bombeando y elevando el agua hacia unas boquillas y de esta manera generan gotitas que se enfrían por evaporación a medida que caen de regreso a la superficie. Algunos sistemas utilizan discos giratorios que impulsan a las gotitas en el aire.

Las torres de enfriamiento húmedo cuentan con la transferencia de calor evaporativa como el mecanismo primario para la remoción del calor de desecho; las torres húmedas promueven el movimiento del aire por medio de ventiladores o chimeneas y el agua pasa por material empaquetado ya sea para descomponerla en gotitas o para permitir un flujo laminar. La torre se puede diseñar como un aparato de flujo cruzado donde el aire se mueve horizontalmente a través del agua que cae, o de contraflujo donde el aire se mueve hacia arriba. El aparato de enfriamiento más común empleado hoy en día es la torre de flujo cruzado de tiro mecánico.

Todos los aparatos de enfriamiento húmedo emplean la transferencia de calor evaporativa como el principal vehículo para la remoción de calor de desecho; lo anterior trae consigo pérdidas de agua no benéficas; las torres de enfriamiento en seco únicamente emplean la transferencia de calor sensible y son apropiadas en sitios sin agua o con poca agua. Existen dos tipos de torres de enfriamiento en seco:

- El condensador de aire directo en el que el vapor de la turbina se condensa por el aire y no se utiliza agua de enfriamiento.

- Torres tipo Heller en el que son utilizados condensadores de rocío o goteo directo, el agua de enfriamiento y el vapor son mezclados, el agua caliente resultante es conducida a través de un intercambiador de calor con el aire, de esta manera no hay un sistema de separación del agua de enfriamiento.

El condensador de aire directo se limita a plantas de 200 MW o menos, mientras que el sistema tipo Heller es apropiado para plantas más grandes.

Todos los aparatos de enfriamiento son factibles desde el punto de vista de la transferencia de calor, sin embargo también se deben considerar los posibles impactos ambientales de los sistemas de enfriamiento incluyendo: la neblina, las pérdidas no benéficas de agua, el arrastre y derrame. La ubicación, diseño operación y selección de un aparato de enfriamiento no debe realizarse sin tomar en cuenta los impactos ambientales.

La neblina local se puede o no afectar por los dispositivos de enfriamiento. Algunas experiencias indican que la neblina local no ocurrirá por la presencia de sistemas cerrados de enfriamiento, sin embargo las condiciones meteorológicas de humedad alta, baja temperatura y alta estabilidad atmosférica propician la formación de niebla y los lugares en los que se tengan tales condiciones deben ser evaluados cuidadosamente antes de la selección.

Con excepción de las torres de enfriamiento en seco, todos los dispositivos de enfriamiento pueden producir neblina. Las lagunas o lagos de enfriamiento pueden producir vapor de niebla; este fenómeno normalmente ocurre sobre la superficie de la laguna y no crea problemas de neblina local. Las torres de enfriamiento producen plumas visibles; sin embargo no hay problema a menos que éstas alcancen al terreno y de esta manera provoquen niebla, únicamente cuando se presente niebla sobre áreas habitadas existirá problema. Se debe tener especial cuidado de que la niebla no obstruya la visibilidad en carreteras o cerca de aeropuertos.

Bajo condiciones normales las plumas de las torres de enfriamiento se elevan debido a su velocidad inicial y fuerza y en raras ocasiones alcanzan al terreno antes de disiparse. Bajo algunas condiciones las plumas también pueden penetrar a través de las inversiones atmosféricas. Las torres de tiro natural producen menos condiciones de neblina local, siendo preferidas sobre las unidades de tiro mecánico.

Todos los aparatos de enfriamiento húmedo consumen agua por evaporación, estando la tasa de evaporación en función de las condiciones meteorológicas y de la concentración del calor de desecho. Se deben reconocer dos cosas en la evaluación de los datos disponibles sobre las pérdidas de agua por evaporación de las torres de enfriamiento y de lagunas:

1. La evaporación bajo las condiciones de diseño de verano es de 50 a 150 veces más alta que para las condiciones promedio anuales.
2. El enfriamiento con un sistema cerrado también produce elevadas tasas de evaporación.

Un estudio realizado para evaluar sistemas de enfriamiento alternativos para plantas de 1000 MW alimentadas por combustible fósil cerca del Lago Michigan proporciona los datos indicados en el Cuadro 5.4 ; se observa que las lagunas de enfriamiento experimentan tasas de evaporación más altas que las torres de enfriamiento, esto se debe a que además de disipar la carga de calor de desecho las lagunas deben disipar el calor por el calentamiento solar.

Cuadro 5.4 Tasas de evaporación  
[pie<sup>3</sup>]

Sistema de Enfriamiento	Condición de Diseño	Promedio Anual
Torre de tiro mecánico	16.1	10.6
Torre de tiro natural	16.1	10.6
Laguna de enfriamiento (sistema abierto)	37.1	15.2
Sistema de enfriamiento por rocío	16.1	10.6
Enfriamiento abierto	-	8.2

La torre de enfriamiento o el sistema de tiro por goteo acarrearán sobre el agua líquida gotitas del flujo de agua de enfriamiento que tienen las mismas características del agua; de esta manera si se utiliza agua salada o salmuera el arrastre puede causar problemas cuando se deposita en la tierra de los alrededores. Las torres de enfriamiento utilizan eliminadores del arrastre para reducir este impacto; los dispositivos de enfriamiento evaporativo requieren que una pequeña porción del agua de circulación sea eliminada del sistema para evitar el crecimiento de material disuelto indeseable, a este líquido se le llama derrame. Además del material disuelto, el derrame también tiene anticorrosivos, y otros productos químicos agregados al agua de enfriamiento; de esta manera el derrame es un desecho industrial y debe tratarse como tal.

El derrame se puede controlar mediante:

- La selección de los químicos de tratamiento del agua.
- El incremento del ciclo de la concentración a través del pretratamiento del agua o filtros a los lados de la corriente.
- El tratamiento físico o químico del efluente.

**5.5 Lista de métodos para resolver el problema de contaminación por descargas de aguas residuales con alta temperatura producidas por plantas generadoras de energía y de las industrias que demandan agua con fines de enfriamiento**

En general, se pueden identificar cinco métodos que sirven para mitigar los impactos previamente identificados ocasionados por la generación de aguas residuales con altas temperaturas:

1. El manejo de la fuente contaminante mediante dilución, dispersión, agitación por medios artificiales en el cuerpo receptor para incrementar la aireación y el enfriamiento mediante el uso de lagunas o estanques de almacenamiento de agua que se ha usado con el mismo fin.
2. Mejorar la eficiencia de las plantas termoeléctricas mediante el uso de un circuito cerrado ( evaporativo) de enfriamiento.
3. El uso del calor de desecho, como en un proceso de calentamiento, desalando el agua, en la calefacción de edificaciones, etc.
4. Disposición del calor de desecho a la atmósfera, en torres de enfriamiento por evaporación o en canales de desvío, etc.
5. Utilizando nuevos métodos de generación de energía eléctrica, por ejemplo empleando plantas hidroeléctricas en que las turbinas no son accionadas por vapor; o utilizando condensadores enfriados por aire.

#### **5.6 La opción de utilizar plantas hidroeléctricas**

Entre los recursos naturales que se utilizan en el mundo como energéticos para producir electricidad están las caídas de agua de las plantas hidroeléctricas. En estas plantas la energía potencial del agua se transforma haciendo girar una turbina acoplada a un generador eléctrico; el recurso empleado, el agua, es renovable y su disponibilidad depende de la frecuencia e intensidad de las lluvias así como de la capacidad de las presas.

Las características de estas plantas les proporcionan una significativa ventaja sobre otras fuentes de generación debido a que las hidroeléctricas no utilizan combustibles fósiles no renovables ni presentan problemas por la disposición de residuos contaminantes.

La hidroelectricidad se ha desarrollado en nuestro país de tal forma que hasta 1990 se tenía una potencia instalada de casi 8 millones de kW lo que representa casi el 30% de la generación total.; el 70% restante se distribuye entre las plantas termoeléctricas de vapor, ciclo combinado, turbogas, combustión interna, geotermoeléctricas, carboeléctricas y nucleoeeléctricas.

## Capítulo 6

## Capítulo 6

## CONCLUSIONES

De acuerdo con los temas desarrollados se puede concluir lo siguiente:

1. Los principales impactos producidos por las descargas de aguas residuales con alta temperatura en corrientes, lagos y depósitos son la aceleración en las reacciones químicas, con su consecuente incremento en la DBO, parámetro de calidad del agua de gran importancia relacionado con la presencia de materia orgánica en el cuerpo de agua analizado; disminución en el oxígeno disuelto y en general de la solubilidad y difusión de los gases; posible reducción del oxígeno a menos de 5 mg/l lo que trae consigo la muerte de peces; alteración en el desarrollo, procesos metabólicos y disminución de la resistencia a sustancias tóxicas en especies acuáticas; alteración de la circulación vertical en lagos por la disminución de la densidad ante el incremento de temperatura, alteración en la evaporación y transpiración que forman parte del ciclo hidrológico.

Los cambios que ocurren en la temperatura del agua y en los parámetros de calidad relacionados con ésta, pueden afectar de manera importante sus usos benéficos.

2. Las actividades industriales identificadas como más significativas cuyas aguas residuales reportan una temperatura elevada por utilizarse principalmente con fines de enfriamiento y en condensadores son:

a) La industria siderúrgica con una demanda de agua de 240 m<sup>3</sup>/ton procesada, reportándose temperaturas hasta de 49°C, con una tasa de calor en sus descargas de 3780 kcal/h ton a 5040 kcal/h ton de producción;

b) La industria azucarera, que si bien no aparece dentro de las que demanda mayores cantidades de agua, sí es una de las industrias cuya demanda de agua es en mayor porcentaje destinada para fines de enfriamiento y uso en condensadores; particularmente en la fabricación de azúcar refinado con 101.20 m<sup>3</sup>/ton (enfriamiento), 4 m<sup>3</sup>/ton (en calderas), siendo atribuidas las mayores temperaturas de sus aguas residuales a la fabricación de azúcar estándar (37°C) y para el azúcar refinado (36°C);

c) La industria química con sus mayores demandas de agua en operaciones de enfriamiento con o sin contacto teniendo el 30% del total de la demanda en la rama correspondiente a plaguicidas y el 26.9% en la rama correspondiente a la industria farmacéutica; la mayor temperatura se observó en los efluentes de la rama de sales, ácidos y bases con 31.5°C;

d) en la industria petrolera del porcentaje total de la demanda de agua el 60% corresponde a enfriamiento y el 30% para la generación de vapor, la temperatura más elevada que se identificó fue de 37.5°C en aguas

residuales procedentes de la elaboración de productos de una refinería. Por último se identifican como más significativas en la contaminación térmica a las industrias que generan energía eléctrica utilizando combustibles fósiles, tal es el caso de las centrales termoeléctricas, en donde la demanda promedio es de 46 l/s para los sistemas de enfriamiento que es casi 50 veces mayor que la utilizada para otros fines. De una planta de 4000 mW, se estiman  $4435.2 \times 10^6$  kcal/h de calor de desecho y 139 000 l/s de requerimiento de agua para el condensador, en cuenta a la eficiencia en una planta de estas características de cada 100 unidades de calor, el 40% se emplea para generar energía eléctrica, el 50% es calor de desecho y el 10% es calor que va hacia la atmósfera.

La legislación federal vigente en materia de protección de la calidad del agua establece en su NOM-CCA-031/1993 relativa a los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales proveniente de la industria, actividades agroindustriales, de servicios y el tratamiento de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal que el parámetro temperatura no debe rebasar los 40°C; por lo que aparentemente únicamente la industria siderúrgica tendría problemas con sus descargas; pero lo anterior no se debe considerar válido porque se deben analizar muchos factores que pueden influir en la alteración del cuerpo en que se realicen las descargas; anteriormente en el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación del Agua se establecía que 35°C era la temperatura máxima que se permitiría en las descargas de aguas residuales, siendo más conservador.

3. Las propiedades termodinámicas del agua como son su capacidad calorífica, calor específico, calor latente de vaporización, hacen al agua un elemento muy adecuado para la transferencia de calor. Los procesos de transporte de energía: conducción, convección, radiación y el cambio de estado físico denominado vaporización son los elementos principales que se emplean en el balance de energía térmica para la determinación cuantitativa de la disipación de calor en cuerpos de agua a partir de la obtención de la temperatura de equilibrio entre un cuerpo de agua natural y la atmósfera. El modelo matemático de tipo iterativo presentado en este trabajo utiliza determinaciones meteorológicas de temperatura del aire, velocidad del viento y presión de vapor y permite calcular la temperatura de equilibrio de una corriente; una vez calculada esta temperatura de equilibrio bajo condiciones meteorológicas dadas, se puede tener un registro de la misma y más adelante, bajo condiciones meteorológicas similares se puede tomar la temperatura del cuerpo de agua y si es superior a la que en teoría corresponde a la temperatura de equilibrio, se tendrá sospecha de contaminación por agua residual con alta temperatura; si a lo anterior se agrega la existencia de una industria como las antes descritas, la sospecha se confirmará y se tendrán que tomar las medidas correctivas pertinentes.

Si además de la temperatura de equilibrio del agua de cualquier probabilidad de ocurrencia de condiciones meteorológicas, se obtiene el área superficial acumulativa necesaria para el enfriamiento desde el sitio de descarga de calor hasta que se obtiene la temperatura de equilibrio, se puede construir un perfil confiable de la temperatura de una corriente.

En lagos y depósitos de debe tomar en cuenta la temperatura de la superficie del agua y los gradientes verticales que se generan por la estratificación térmica que cambia en cada época del año (por cambios en la densidad del agua) y que varían con la profundidad y tamaño del cuerpo de agua.

Debe considerarse que en la aplicación de ecuaciones básicas a una situación práctica, el criterio en la utilización de factores meteorológicos e hidrológicos es casi tan importante como el uso de factores y coeficientes.

4. Los impactos por aguas residuales con alta temperatura se pueden mitigar aplicando en forma preferente medidas preventivas como son el darle uso a los efluentes de aguas residuales contaminadas únicamente por calor por ejemplo en la piscicultura, en la horticultura favoreciendo el desarrollo de algunos vegetales, utilizándola para acelerar el proceso de descomposición de otras aguas residuales o para fines de desalinización de aguas marinas; se puede hacer también uso del calor del agua residual que además de alta temperatura posee desechos tóxicos, si se utiliza un sistema de tuberías para evitar el contacto de esta agua con el proceso en el que se utilice.

Otra opción, aplicable a las aguas residuales de las industrias antes mencionadas, es la utilización de sistemas de enfriamiento cerrados tales como estanques artificiales de enfriamiento, torres de enfriamiento húmedo o seco ( estas últimas más costosas pero con menos efectos nocivos al ambiente ) y con mayores reservas los sistemas de enfriamiento abiertos que involucran las descargas directas a cuerpos de agua natural y descargas submarinas.

La determinación del sistema más adecuado involucra un análisis y evaluación ambiental así como económica sujeta a la normatividad en materia de protección ambiental existente en el sitio de interés.

En general se puede enfatizar que la manera en que el calor de desecho afecta al medio es de interés para los estudios de ingeniería ambiental, debiéndose hacer verificaciones de las ecuaciones básicas y de los métodos de aplicación práctica que se utilicen, comparando lo calculado con las condiciones observadas en lagunas o depósitos de enfriamiento y en las corrientes en las que se tenga una descarga de calor de desecho.

## **Bibliografía**

## BIBLIOGRAFIA

1. American Society for Testing and Materials  
Manual de Aguas para Usos Industriales  
Ed. Limusa. México, 1976
2. CFE. Instituto de Investigaciones Eléctricas  
Manual de Diseño de Obras Civiles. Hidrotecnia A.2.14  
Obras de Toma y Sistemas de Enfriamiento para Plantas  
Termoeléctricas.  
Editado por el autor. México, 1983
3. Diario Oficial de la Federación. 18 de octubre de 1993  
Secretaría de Desarrollo Social  
Normas Oficiales Mexicanas en Materia de Protección  
Ambiental.  
Editado por el autor. México, 1993
4. Fair, G.M., Geyer, J.C., Okun, D.A.  
Abastecimiento de Agua y Remoción de Aguas  
Residuales, Vol.1  
Ed. Limusa. México, 1983
5. Falcón Briseño, Yolanda  
Control de la Contaminación del Agua. Seminario de  
Evaluación  
Editado por el autor. México, 1986
6. Gieck, Kurt  
Manual de Fórmulas Técnicas  
Ed. Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A.  
México, 1981
7. Linvil, G. Rich  
Water Resources and Environmental Systems Engineering  
Ed. Mc Graw-Hill. USA, 1973
8. Lund, Herbert F.  
Manual para el Control de la Contaminación Ambiental.  
Ed. Mc Graw-Hill. USA, 1974
9. Masters M. Gilbert  
Introduction to Environmental Engineering and Science  
Ed. Prentice-Hall. USA, 1991
10. Middlebrooks, E. Joe  
Industrial Pollution Control. Vol I: Agro-Industries  
Wiley Interscience Publication. USA, 1979
11. Murguía Vaca, Ernesto  
Evaluación, Efectos y Solución de la Contaminación del  
Agua  
Editado por el autor. México, 1983

12. Odum, Eugene P.  
Ecología  
Nueva Editorial Interamericana. México, 1971
13. SARH. Dirección General de Protección y Ordenación  
Ecológica  
Manual del Curso de Aguas y Aguas de Desecho. Curso B  
Vol. I  
Editado por el autor. México, 1979
14. SEDUE  
Gaceta Ecológica Vol I No. 1  
Editada por el autor. México, 1989
15. SEDUE  
Gaceta Ecológica Vol II No. 6  
Editada por el autor. México, 1990
16. SEDUE  
Manual sobre Aspectos de Control de Contaminación  
del Agua en el Sector Industrial  
Editado por el autor. México, 1983
17. SEDUE, Dirección General de Normatividad y Regulación  
Ecológica, Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados  
del IPN  
Normas Técnicas Ecológicas que Establecen los Límites  
Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas  
de Aguas Residuales de Origen Industrial en Cuerpos de  
Agua. Vol I y II  
Editado por los autores. México
18. SEDUE, Dirección General de Prevención y Control de la  
Calidad del Agua  
Ponencia: Calidad del agua  
Editada por el autor. México, 1983
19. SEDUE  
Reglamento para la Prevención y Control de la  
Contaminación del Agua. Serie: Normatividad Ecológica  
Editado por el autor. México, 1986
20. Shen, Hsieh Wen  
Environmental Impact of Rivers ( River Mechanic III )  
Editado por el autor. USA, 1973
21. Tebutt, Thu  
Fundamentos de Control de la Calidad del Agua  
Ed. Limusa. México, 1990
22. Turk, Amos, Turk, Jonathan, Wittes, J.T.  
Tratado de Ecología  
Nueva Editorial Interamericana. México, 1981
23. UNAM. Instituto de Ingeniería  
Memorias I Simposio Nacional sobre Ingeniería Ambiental  
Editado por el autor. México, 1988
24. Velz, Clearence.  
Applied Stream Sanitation  
Ed. Wiley Intersciencie. USA, 1970

25. Yurrieta Valdés José, Zurita Esquivel Miguel M.  
Fascículo 2 Sistemas de Unidades  
Editado por la Facultad de Ingeniería, UNAM  
Ciudad Universitaria, México 1986.