



**UNIVERSIDAD DEL NORESTE  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

**“METODOLOGÍA PARA REDUCIR EL  
CONSUMO DE AGUA Y LOS EFLUENTES EN  
UNA PLANTA QUÍMICA**

**Que como requisito parcial para optar al grado de**

**MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Presenta**

**LUIS ALBERTO LUNA BLANCO**

**Tampico, Tamaulipas**

**Octubre de 2006**

**METODOLOGÍA PARA REDUCIR EL USO DE AGUA Y  
EFLUENTES EN UNA PLANTA QUÍMICA**

**TESIS DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTADA POR**

**LUIS ALBERTO LUNA BLANCO**

**Aprobada en forma, estilo y contenido, por**

---

MC Pedro Escamilla Ramírez  
Presidente del Comité

---

Dr. Fernando Pérez Escobar  
Secretario del Comité

---

MC Noé Sosa Domínguez  
Vocal del Comité

---

Dr. Víctor Manuel Escobar Meza  
Director de Estudios de Postgrado

Tampico, Tamaulipas, Octubre de 2006

## RESUMEN

“Metodología para reducir el uso de agua y los efluentes en una planta química (Octubre de 2006)

Luís Alberto Luna Blanco

Presidente del Comité, MC Pedro Escamilla Ramírez.

El desarrollo industrial en los últimos años ha sido muy acelerado y ha generado diversos problemas que la ingeniería debe enfrentar para encontrar una solución rápida y definitiva; dentro de los problemas que han surgido se encuentran dos que alcanzan magnitudes alarmantes; uno es el problema de la contaminación ambiental y el otro es el uso desmedido de los recursos naturales.

Para reducir estos riesgos, la ingeniería ambiental enfoca sus propósitos en dar solución a estos problemas, proponiendo metodologías para un uso eficiente de los recursos naturales y disminuir el consumo de agua.

El agua es usada en la industria de proceso en gran cantidad, como agua de proceso o agua de servicio y posteriormente enviarla a un tratamiento o como muchas industrias hacen, es desechada directamente al medio ambiente causando severo impacto en los seres vivos.

En la actualidad se establecen leyes y regulaciones para la disposición de aguas residuales lo cual genera gastos adicionales que se cargan a los costos de producción, un ejemplo de lo anterior es la NOM-001-ECOL-1996, que regula las descargas industriales a mantos acuíferos y cuyo incumplimiento causa severas multas a las industrias.

Uno de los propósitos es encontrar métodos cuya aplicación nos permitan reducir el consumo de agua mediante la reutilización de la misma dentro de un proceso, lo cual significa, utilizar el agua que sale de un proceso para satisfacer la demanda de otro, con la finalidad de reducir el consumo de agua total del proceso.

Este trabajo tiene el objetivo de establecer un método que sea aplicado a cualquier industria que utilice agua para sus procesos y fomentar una cultura de ahorro de agua que beneficiara a las empresas.

## **DEDICATORIA.**

A mi esposa: Maria Aurora Melo Raya

Por todos esos momentos compartidos que hacen que la vida, valga la pena.

A mis hijas: Rosa Mariana, Diana Elizabeth y Luisa Aurora

Por que son TODO para mí.

A la memoria de mis padres:

Camerino Luna Rangel †

Margarita Edwiges Blanco Cobos †

A quienes les debo la vida.

A mis hermanos: Raúl Alejandro, Sergio, Beatriz Elena, Luz Maria, Maria Elena y  
Angélica Quintina

A mis compañeros de generación.

A todas las personas que me han apoyado en los momentos difíciles de mi vida y me han  
dado a conocer lo más hermoso de la vida

## **AGRADECIMIENTOS.**

A mis padres por todo el amor y apoyo que siempre me brindaron, en esos justos momentos en los que los necesite. Mi eterno amor y agradecimiento.

Al Biol. Pedro Escamilla Ramírez, por su inestimable e incondicional amistad de siempre.

A la Universidad del Noreste y Comité Directivo por apoyarme en mi formación profesional.

A todas y cada una de las personas que han tocado mi vida, en este paso transitorio, de mi existencia.

A mi **Dios** porque es más grande que todos mis problemas, y a todos, Muchas Gracias.

## **CONTENIDO.**

RESUMEN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
CONTENIDO.....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES.....	3
III. HIPÓTESIS.....	10
IV. OBJETIVO GENERAL.....	10
IV.1 Objetivos particulares.....	10
V.- DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	11
V.1. Aspectos abióticos.....	11
V.1.1. Climatología.....	11
V.1.2. Precipitación Promedio Anual.....	12
V.1.3. Suelos.....	12
V.1.4. Hidrología Superficial.....	13
V.2. Aspectos bióticos.....	14
V.2.1. Vegetación.....	14
V.2.2. Fauna.....	14
V.2.3. Fauna silvestre del área de estudio.....	15
V.3. Medio Socioeconómico.....	15
V.3.1. Demografía.....	15
V.3.2. Tasa de crecimiento de población.....	15

V.4. Descripción de Torres de Enfriamiento.....	17
A) PRINCIPIO DE OPERACIÓN .....	17
B) CLASIFICACIÓN DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO:.....	19
1.- TIRO MECANICO CONTRACORRIENTE.....	19
2.- TIRO MECANICO CRUZADO. ....	20
3.- TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO NATURAL. ....	20
4.- TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO FORZADO. ....	21
5.- TORRES HÍBRIDAS. ....	22
6.- TORRES MODULARES EN MATERIALES PLÁSTICOS. ....	23
VI. METODOLOGÍA. ....	24
VII. RESULTADOS .....	25
a).- Identificación Taxonómica de Plantas Acuáticas. ....	25
b).- Establecer el origen de las semillas de las plantas acuáticas. ....	29
c).- Determinar si la falta de mantenimiento a los basines de las torres de enfriamiento, favorece el desarrollo de plantas acuáticas dentro de ellos. ....	32
d).- Recomendaciones pertinentes para evitar el desarrollo de plantas acuáticas dentro de los basines de las torres de enfriamiento. ....	35
VIII. DISCUSIÓN.....	36
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	38
X. ANEXOS.....	41
CLAVES PARA LA IDENTIFICACIÓN TAXONÓMICA.....	41
GLOSARIO DE TÉRMINOS .....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura I.	Esquema de distribución de las partes de una torre de enfriamiento tipo.	10
Figura II.	Torre de enfriamiento Tipo Tiro Mecánico Contracorriente o Cruzado	11
Figura III.	Torre de enfriamiento Atmosférica	12
Figura IV.	Torre de enfriamiento Tipo Contracorriente y Tiro Inducido	13
Figura V.	Torre de enfriamiento Tipo Tiro Mecánico Cruzado.	14
Figura VI.	Torre de enfriamiento Tipo Tiro Natural.	16
Figura VII.	Torre de enfriamiento Tipo Tiro Mecánico a Contracorriente.	17
Figura VIII.	Torre de enfriamiento Tipo Torres Modulares Tiro Cruzado	18
Figura IX.	Torre de enfriamiento en medio de un entorno ecológico y sus afectaciones.	19
Figura X.	Diagrama de usos de agua de la planta Química.	22
Figura XI.	Modelo de contacto a Contracorriente.	23
Figura XI.	Representación de la operación de uso de agua	24
Figura XIII.	Perfil de agua límite	24
Figura XIV.	Representación del modelo a contracorriente desde la operación 1 hasta la operación n	25
Figura XV.	Perfil de agua límite de la operación <i>i</i> .	28
Figura XVI.	Perfil de agua límite para las cuatro operaciones de uso de agua.	30
Figura XVII.	Representación del sistema sin reuso de agua.	32
Figura XVIII.	Diagrama de bloques sin reuso de agua.	32
Figura XIX.	Curva compuesta de concentración.	32
Figura XX	Diagrama de malla.	44
Figura XXI	Diagrama de Malla Simplificado.	45
Figura XXII	Diagrama de contenido de masa.	46
Figura XXIII	Diseño de la red con reuso de agua.	47
Figura XXIV	Sistema centralizado de tratamiento de efluentes.	48
Figura XXV	Sistema distribuido de tratamiento de efluentes.	49
Figura XXVI	Curva compuesta de concentración.	51
Figura XXVII	Curva compuesta de concentración, Caso I	54
Figura XXVIII	Diagrama de un sistema de tratamiento de efluentes para un contaminante y un proceso.	56
Figura XXIX	Curva compuesta de concentración, Caso II	58

Figura XXX	Diagrama del sistema de tratamiento de efluentes para un contaminante y varios procesos.	59
Figura XXXI	Curva compuesta del contaminante A	61
Figura XXXII	Curva compuesta del contaminante B	62
Figura XXXIII	Curva compuesta del contaminante A con línea media de tratamiento.	63
Figura XXXIV	Curva compuesta de concentración para el contaminante A con líneas de tratamiento individuales para los procesos I y II.	64
Figura XXXV	Curva compuesta de concentración para el contaminante B con líneas de tratamiento individuales para los procesos I y II.	65
Figura XXXVI	Diagrama de un sistema de tratamiento de efluentes que no cumple con los límites ambientales de concentración con un flujo procesado de 159.66 ton/h	66
Figura XXXVII	Diagrama de un sistema de tratamiento de efluentes que si cumple con los límites ambientales de concentración con un flujo procesado de 177.65 ton/h	67
Figura XXXVIII	Diagrama de un sistema de tratamiento de efluentes que si cumple con los límites ambientales de concentración con un flujo procesado de 164.59 ton/h	68
Figura XXXIX	Reuso de agua	70
Figura XL	Reuso con regeneración.	71
Figura XLI	Recirculación con regeneración.	72
Figura XLII (a) y (b)	Representación de las operaciones de uso de agua.	73
Figura XLIII	Recirculación y Regeneración.	75
Figura XLIV	Curva compuesta de concentración.	77
Figura XLV	Red final de distribución de uso de agua.	80
Figura XLVI	Diagrama de flujo inicial de las operaciones de uso de agua de la planta química de especialidades, utiliza 140 ton/h de agua fresca y descarga 110 ton/h de aguas residuales.	82
Figura XLVII	Diagrama de flujo de los servicios de la planta química de especialidades.	82
Figura XLVIII	Red de uso de agua sin recirculación.	87
Figura XLIX	Red de uso de agua con recirculación.	88
Figura L	Diagrama de flujo modificado de la planta de especialidades.	89
Figura LI	Muestra de plantas acuáticas encontradas en el fondo de los basines	91

Figura LII	Muestra de plantas acuáticas encontradas en el fondo de los basines	92
Figura LIII	Planta industrial junto a un cuerpo de agua permanente.	96
Figura LIV	Plantas del género <i>Echinodorus</i> desarrollándose en un cuerpo de agua.	98
Figura LV	Plantas del género <i>Echinodorus</i> desarrollándose en un cuerpo de agua.	99
Figura LVI	Plantas del género <i>Echinodorus</i> desarrollándose en un cuerpo de agua.	100
Figura LVII	Vista de las torres de enfriamiento	101

## **I.- INTRODUCCIÓN:**

El concepto de tecnología del punto de pliegue se aplicó, en las últimas dos décadas del siglo pasado, a la integración energética de los procesos, para minimizar el consumo de agua de enfriamiento y la generación de vapor.

La estructuración de este trabajo contempla los principios necesarios para identificar el punto de pliegue de agua fresca, para con ello determinar el flujo mínimo en las operaciones de uso de agua, en una planta química.

Se presentan las herramientas de la tecnología del punto de pliegue para el diseño de redes de uso de agua y diseño básico de los sistemas de tratamiento de efluentes.

En la siguiente sección se retoma la minimización de efluentes a través del reuso, regeneración y recirculación.

Por ultimo, el capítulo VII contiene el análisis de resultados de las diferentes aplicaciones expuestas a lo largo del presente trabajo.

## **II.-ANTECEDENTES:**

**Históricamente:** el concepto de tecnología del punto de pliegue se aplicó, en las últimas dos décadas del siglo pasado, a la integración energética de los procesos, para minimizar el consumo de agua de enfriamiento y la generación de vapor.

En 1994 Wang y Smith en dos publicaciones “Wastewater Minimization” Chem. Eng. Sci. 49-981 y “Design of distributed effluent treatment System”. Chem. Eng. Sci. 49-3127, Hicieron el primer estudio de aplicación de la tecnología del punto de pliegue a las operaciones del uso del agua en una refinería.

En 1995 la compañía Monsanto, aplicando esta tecnología, logro ahorrar hasta un 30 % de agua fresca y diseñar un sistema distribuido de tratamiento de efluentes.

En 1996 se publico un estudio realizado por Tripathi para la industria papelera que resulto en un ahorro de 800000 dls. Anuales. En 1997 se aplico a un complejo petroquímico en Taiwán.

En 1999 Mann & Liu publican la sistematización de la tecnología de punto de pliegue para todas las opciones de minimización de efluentes y consumo de agua industrial e inclusive para el diseño de los sistemas de tratamiento de efluentes.

### **III.-HIPOTESIS:**

La tecnología de “PUNTO DE PLIEGUE” desarrollada para redes de intercambio de calor, se aplica para procesos donde se lleva a cabo un intercambio de masa entre dos corrientes. La finalidad de la tecnología es encontrar el flujo mínimo de una corriente “pobre” que logre retirar la cantidad de masa del contaminante de la corriente “rica”, ya sea para alcanzar los requerimientos de pureza impuestos por las normas ecológicas, para recuperar compuestos que puedan ser reutilizados o para disminuir los consumos de ciertos servicios dentro de un proceso.

Debido al gradiente de concentraciones que se presenta en el momento en que las dos corrientes entran en contacto, el agua retira cierta cantidad de masa de la corriente de proceso adquiriendo a la salida una concentración mayor, por lo tanto se necesita encontrar un punto en donde la cantidad retirada sea máxima, y por ende, este asociada con un flujo que permita que la transferencia de masa sea posible, a este punto se le conoce como “PUNTO DE PLIEGUE DE TRANSFERENCIA DE MASA” o “WATER PINCH”.

#### **IV.- OBJETIVO GENERAL.**

- Proponer un método que permita reducir el consumo de agua mediante el reuso de la misma en un proceso.
- Fomentar una cultura de tratamiento de aguas residuales, lo que permitirá un ahorro para la industria y un beneficio para el entorno ecológico.

#### **IV.1.- OBJETIVOS PARTICULARES**

- Optimizar el consumo de agua y el mínimo que requiere un proceso.
- Obtener los parámetros que limitan el diseño de una nueva red de consumo de agua o el mejoramiento de una red existente.
- Aplicar el tratamiento mínimo que se le debe dar a una corriente.
- Diseñar un nuevo sistema de tratamiento de corrientes, o mejorar un sistema existente, para alcanzar un rango mínimo de tratamiento.
- Maximizar el reuso de agua y minimizar la generación de agua de desperdicio.

**V.- DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.**

V.1 Aspectos abióticos:

<b>Rasgos Físicos</b>	
Límites geográficos N: Papantla S: Coatzintla E: Papantla O: Tihuatlán	
Superficie	230.31 Km <sup>2</sup>
Porcentaje de la superficie respecto al Estado	0.32 %
Altitud	51 msnm
Clima predominante	Cálido
Precipitación pluvial media anual	1,103.0 mm
Temperatura promedio anual máxima	34.9°C
Temperatura promedio anual mínima	14.7°C
Coordenadas geográficas	
Latitud Norte	20°29'28"
Longitud Oeste del meridiano de Greenwich	97°27'18"

<b>Hidrología Superficial</b>	
A la margen izquierda se encuentran los arroyos:	Totalapa Acuatempa
A la margen derecha se encuentran los arroyos:	Hueléque Salsipuedes Cocinero Mollejón Del Maíz
Extensión del Río Cazones	227.1 Km.
Escurrimiento anual	1,853 millones m <sup>3</sup>
Región hidrológica a la que pertenece el río Cazones :Tuxpan-Nautla	Tiene un gasto de: 336.75 m <sup>3</sup> /seg

V.2 Aspectos bióticos:

V.2.1.- Vegetación:

<b>Flora:</b>
Su vegetación es de tipo bosque o bajo subtropical perennifolio entre las especies arbóreas que forman este tipo de bosque se encuentran el guanímbo ó chancarro, jonotes, guanacastle, sangreado y encinal.

Pastizal cultivado:

<b>Estrato (metros)</b>	<b>Nombre común</b>
0.15-0.40	Pasto guinea Estrella mejorada
0.10-0.20	Pangola

Vegetación secundaria arbustiva:

<b>Estrato (metros)</b>	<b>Nombre común</b>
0.50	Pesmilllo
1.20	Mala mujer
2.5-4.0	Chote Huisache Guácima Capulín Ortiga
4.0-30	Chaca

V.2.2.- Fauna:

<b>Fauna:</b>
Representada por organismos invertebrados y vertebrados, destacando su abundancia y diversidad dentro del grupo de los invertebrados los insectos y arácnidos y dentro del grupo de vertebrados, las aves y mamíferos; en forma secundaria, especies acuáticas asociadas a los cuerpos de agua .

V.2.3.- Fauna silvestre:

<b>Las especies de mayor interés dentro de la fauna terrestre asociada a los mantos de vegetación son:</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anfibios: representada por ranas y sapos</li> <li>• Reptiles: son las serpientes, nauyaca y el coralillo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aves: loro, perico, zopilote, golondrina, tordo, picuí, gavián, búho, codorniz, chachalaca.</li> <li>• Mamíferos: murciélago, mapache, tlacuache, conejo, liebre.</li> </ul>

V.3.- Medio Socioeconómico:

<b>Servicios básicos con los que cuenta la ciudad de Poza Rica, Ver.</b>	
• Agua potable	• Policía
• Drenaje sanitario	• Tránsito
• Electrificación	• Telégrafos
• Correo	

<b>Rasgos Socio-Económicos</b>		
Viviendas particulares	<b>Abs.</b>	<b>%</b>
Con agua entubada	28,200	85.29
Con drenaje	29,707	89.85
Con energía eléctrica	30,721	92.92

Viviendas particulares:

<b>Material predominante en techos</b>	<b>Absoluto</b>	<b>%</b>
<b>Total</b>	33,061	100.00
Láminas de cartón	7,416	22.43
Palma, tejamanil o madera	162	0.49
Lámina de asbesto o metálica	8,349	25.25
Teja	243	0.74
Losa de concreto, tabique o ladrillo	16,647	50.35
Otros materiales	144	0.44
No especificado	100	0.30

<b>Material predominante en paredes</b>		
	<b>Absoluto</b>	<b>%</b>
<b>Total</b>	33,061	100.00
Lámina de cartón	647	1.96
Carrizo, bambú, palma	258	0.79
Embarro o bajareque	75	0.23
Madera	8,446	25.54
Lámina de asbesto o metálica	195	0.59
Adobe	54	0.16
Tabique, ladrillo, block, piedra	22,904	69.27
Otros materiales	383	1.16
No especificado	99	0.30

<b>Material predominante en pisos</b>		
	<b>Abs.</b>	<b>%</b>
<b>Total</b>	33,061	100.00
Tierra	4,007	12.12
Cemento o firme	17,810	53.87
Madera, mosaico y otros recubrimientos	11,157	33.75
No especificado	87	0.26
Promedio de ocupantes por vivienda	4.52	

#### V.4 DESCRIPCIÓN DE TORRES DE ENFRIAMIENTO:

Las torres de enfriamiento, cualquiera que sea su tipo ó su construcción, tienen por objeto enfriar por recirculación el agua de un sistema; eliminando el calor que trae consigo al hacerla pasar por un conjunto escalonado de rejillas, que hacen que el agua caliente que cae, a través de un distribuidor en la parte superior de la torre, y con ayuda de una corriente de aire frío impulsada, se provoque su enfriamiento. El aire a contracorriente hace que el agua pierda gran parte de calor antes de llegar a la presa de la torre y al pasar al foso de succión de las bombas, esté lista para nuevamente ser recirculada e ir a absorber calor en ese proceso continuo.

Siendo las torres de enfriamiento un sistema abierto, habrá pérdida de agua en el sistema de recirculación, porque al enfriarse el agua caliente, una parte se evapora con el aire, lo que origina pérdida, tanto por ese motivo como por las purgas periódicas en el sistema. Ese volumen de agua debe ser repuesto en forma continua.

##### A).- PRINCIPIO DE OPERACIÓN:

En las torres de enfriamiento se consigue disminuir la temperatura del agua caliente que proviene de un circuito de refrigeración mediante la transferencia de calor y materia al aire que circula por el interior de la torre. A fin de mejorar el contacto aire-agua, se utiliza un entramado denominado "relleno". El agua entra en la torre por la parte superior y se distribuye uniformemente sobre el relleno utilizando pulverizadores. De esta forma, se consigue un contacto óptimo entre el agua y el aire atmosférico.

El relleno sirve para aumentar el tiempo y la superficie de intercambio entre el agua y el aire. Una vez establecido el contacto entre el agua y el aire, tiene lugar una cesión de calor del agua hacia el aire. Ésta se produce debido a dos mecanismos: la transmisión de calor por convección y la transferencia de vapor desde el agua al aire, con el consiguiente enfriamiento del agua debido a la evaporación.

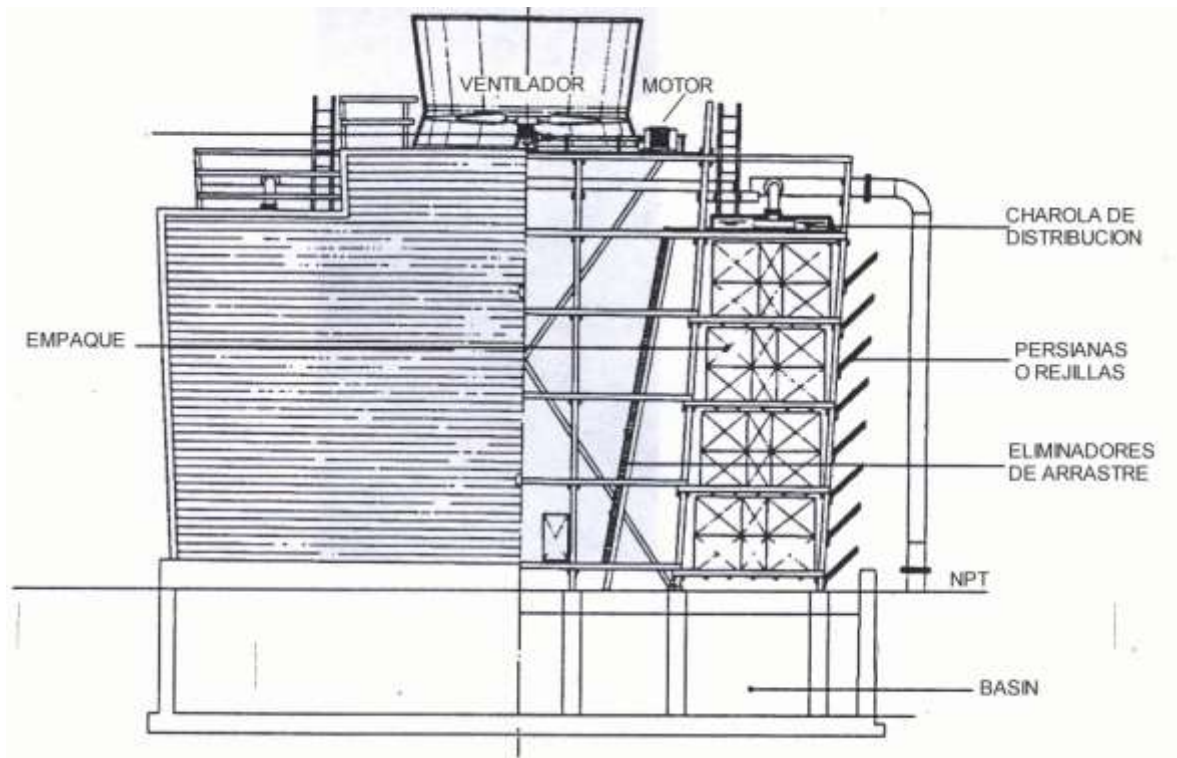


Figura I.- Distribución de las partes de una torre de enfriamiento.

En la transmisión de calor por convección, se produce un flujo de calor en dirección al aire que rodea el agua a causa de la diferencia de temperaturas entre ambos fluidos.

La tasa de enfriamiento por evaporación es de gran magnitud en las torres de enfriamiento; alrededor del 90 % es debida al fenómeno difusivo. Al entrar en contacto el aire con el agua se forma una fina película de aire húmedo saturado sobre la lámina de agua que desciende por el relleno. Esto es debido a que la presión parcial de vapor de agua en la película de aire es superior a la del aire húmedo que circula por la torre, produciéndose una cesión de vapor de agua (evaporación). Esta masa de agua evaporada extrae el calor latente de vaporización del propio líquido. Este calor latente es cedido al aire, obteniéndose un enfriamiento del agua y un aumento de la temperatura del aire. La diferencia de temperaturas del agua a la salida y la temperatura húmeda del aire se llama "acercamiento" o "aproximación", ya que representa el límite termodinámico de enfriamiento al que puede llegar el agua.

B).- CLASIFICACIÓN DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO:

La forma más simple y usual de clasificar las torres de enfriamiento es según la forma en que se mueve el aire a través de éstas. Según este criterio, existen torres de circulación natural y torres de tiro mecánico. En las torres de circulación natural, el movimiento del aire sólo depende de las condiciones climáticas y ambientales. Las torres de tiro mecánico utilizan ventiladores para mover el aire a través del relleno.

1.- TORRES DE TIRO MECÁNICO:

Las torres de tiro mecánico proporcionan un control total sobre el caudal de aire suministrado. Se trata de torres compactas, con una sección transversal y una altura de bombeo pequeñas en comparación con las torres de tiro natural. En estas torres se puede controlar de forma precisa la temperatura del agua de salida, y se pueden lograr valores de acercamiento muy pequeños (hasta de 1 o 2 °C, aunque en la práctica acostumbra a ser de 3 o 4 °C). Si el ventilador se encuentra situado en la entrada de aire, el tiro es forzado. Cuando el ventilador se ubica en la zona de descarga del aire, se habla de tiro inducido.



lugares muy despejados, de forma que ningún obstáculo pueda impedir la libre circulación de aire a través de la torre. Tienen un costo inicial alto debido a su gran tamaño, pero el costo de mantenimiento es reducido, al no existir

partes mecánicas móviles. La temperatura media del agua fría obtenida con una torre atmosférica será inferior a la que se obtendría con una torre de tiro mecánico diseñada para las mismas condiciones de uso. La temperatura de salida del agua siempre dependerá de la velocidad y de la dirección del viento. Con este tipo de torre no es posible lograr un acercamiento pequeño. Actualmente, las torres atmosféricas están en desuso.

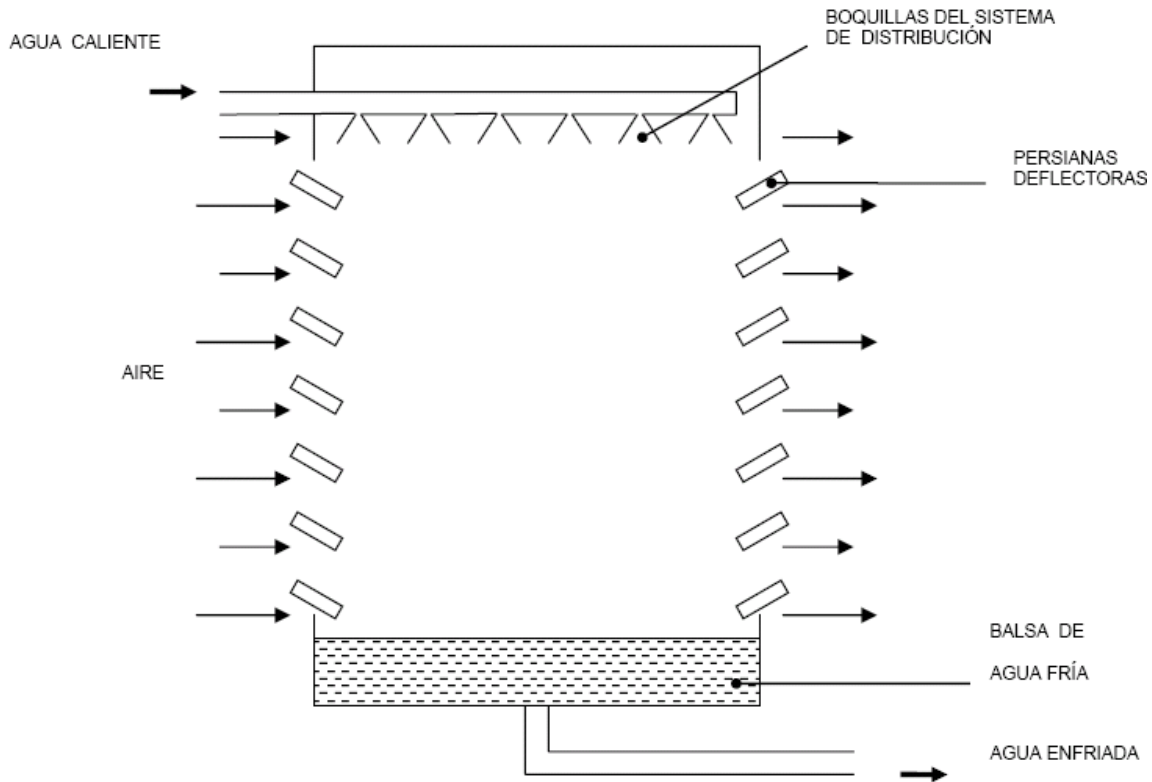


Figura III.- Esquema de una torre atmosférica.

### 3.- TORRE DE TIRO MECANICO A CONTRACORRIENTE:

Las torres de tiro inducido de flujo a contracorriente o de flujo cruzado. El flujo a contracorriente significa que el aire se mueve verticalmente a través del relleno, de manera que los flujos de agua y de aire tienen la misma dirección pero sentido opuesto. La ventaja que tiene este tipo de torres es que el agua más fría se pone en contacto con el aire más seco, lográndose un máximo rendimiento. El

aire puede entrar a través de una o más paredes de la torre, con lo cual se consigue reducir la altura de la entrada de aire. Además, la elevada velocidad con la que entra el aire hace que exista el riesgo de arrastre de suciedad y cuerpos extraños dentro de la torre. La resistencia del aire que asciende contra el agua que cae se traduce en pérdida de presión estática y en un aumento de la potencia de ventilación en comparación con las torres de flujo cruzado.

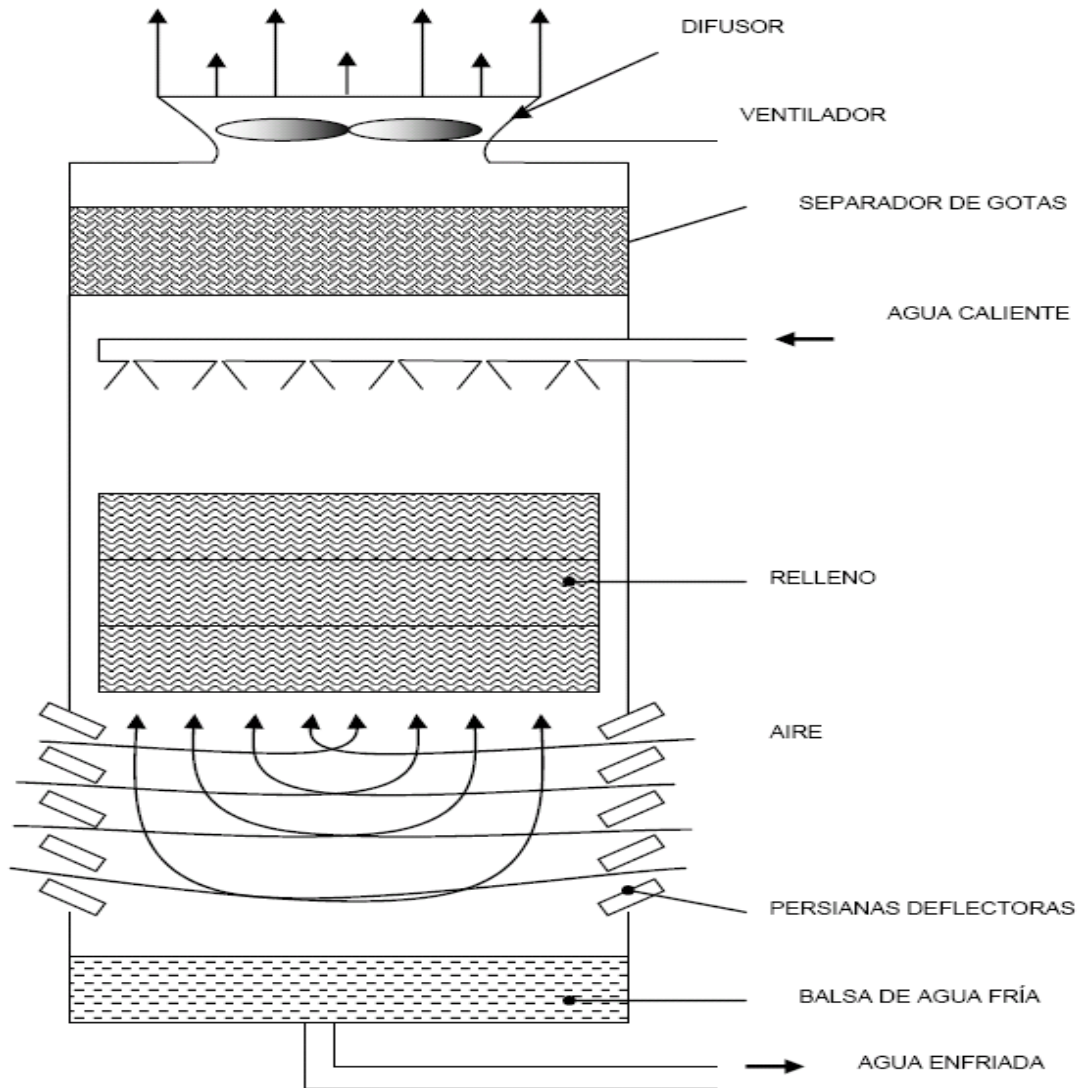


Figura IV.- Torre de flujo a contracorriente y tiro inducido.

#### 4.- TORRE DE ENFRIAMIENTO DE FLUJO CRUZADO:

En las torres de flujo cruzado, el aire circula en dirección perpendicular respecto al agua que desciende. Estas torres tienen una altura menor que las torres de flujo a contracorriente, ya que la altura total de la torre es prácticamente igual a la del relleno. El mantenimiento de estas torres es menos complicado que en el caso de las torres a contracorriente, debido a la facilidad con la que se pueden

inspeccionar los distintos componentes internos de la torre. La principal desventaja de estas torres es que no son recomendables para aquellos casos en los que se requiera un gran salto térmico y un valor de acercamiento pequeño, puesto que ello significará más superficie transversal y más potencia de ventilación, que en el caso de una torre de flujo a contracorriente.

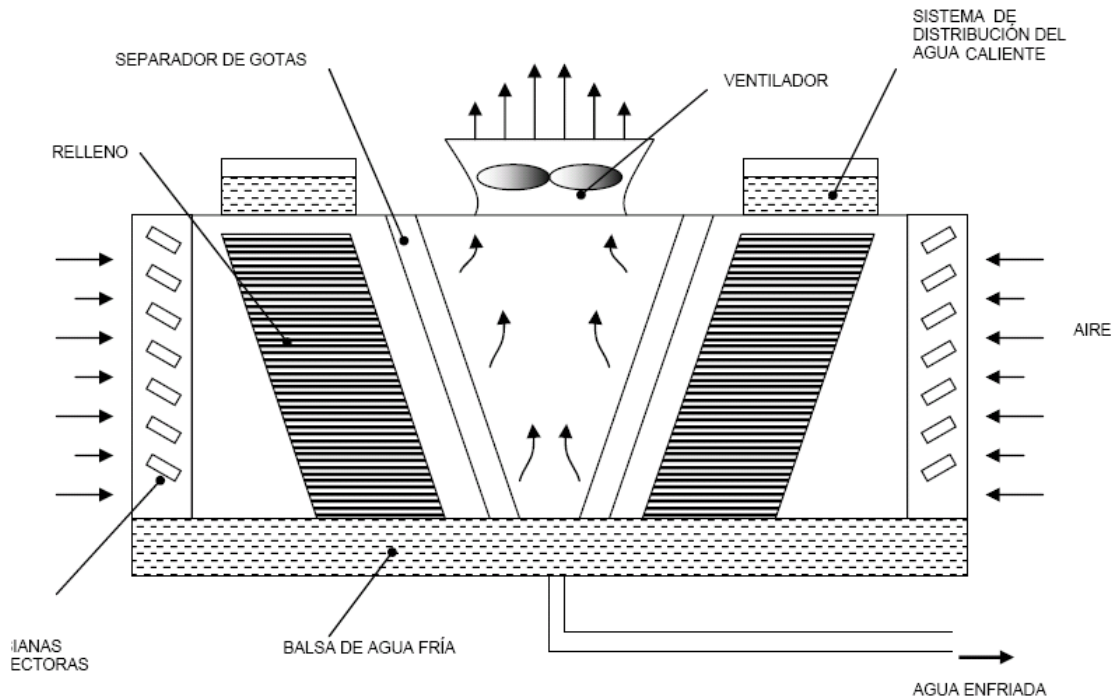


Figura V.- Torre de flujo cruzado (tipo tiro mecánico cruzado)

#### 5.- TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO NATURAL:

Una torre de enfriamiento tiro natural es aquella en la que el aire es inducido por una gran chimenea situada sobre el relleno. La diferencia de densidades entre el aire húmedo caliente y el aire atmosférico es el principal motivo por el cual se crea el tiro de aire a través de la torre. La diferencia de velocidades entre

el viento circulante a nivel del suelo y el viento que circula por la parte superior de la chimenea también ayuda a establecer el flujo de aire. Por ambos motivos, las torres de tiro natural han de ser altas y, además, deben tener una sección transversal grande para facilitar el movimiento del aire ascendente. Estas torres tienen bajos costos de mantenimiento y son indicadas para enfriar grandes cantidades de agua. Al igual que las torres atmosféricas, no tienen partes mecánicas. La velocidad media del aire a través de la torre suele estar comprendida entre 1 y 2 m/s. Las torres de tiro natural no son adecuadas cuando la temperatura seca del aire es elevada, ya que ésta debe ser siempre inferior a la del agua caliente. No es posible conseguir un valor de acercamiento pequeño y es muy difícil controlar exactamente la temperatura del agua. En las torres de tiro natural no se pueden utilizar rellenos de gran compacidad, debido a que la resistencia al flujo de aire debe ser lo más pequeña posible. Estas torres son muy utilizadas en centrales térmicas; muy pocas veces son aplicables a plantas industriales debido a la fuerte inversión inicial necesaria.

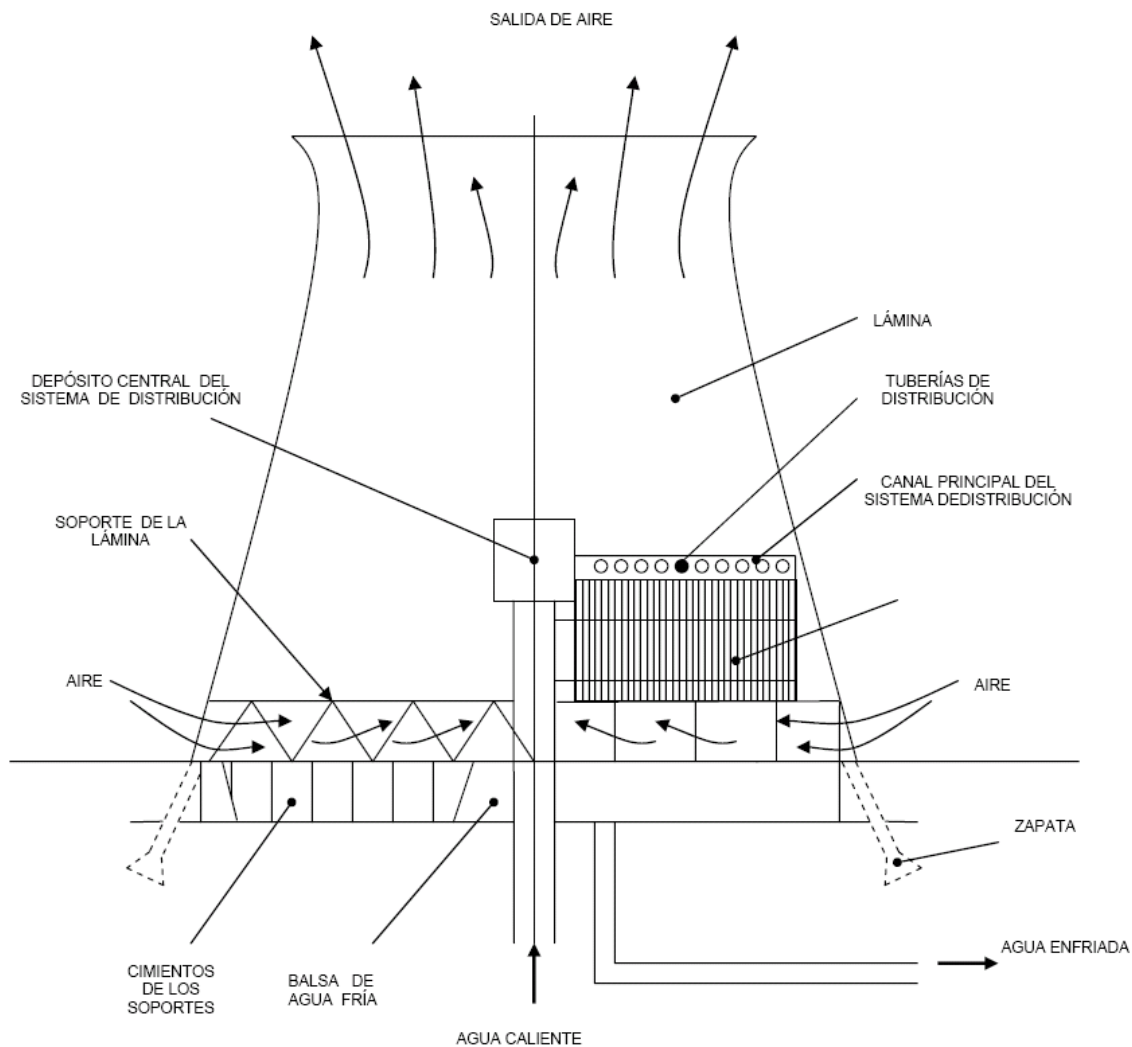


Figura VI.- Esquema de una torre de enfriamiento de tiro natural.

#### 6.- TORRE DE ENFRIAMIENTO DE TIRO FORZADO:

En las torres de tiro forzado el aire se descarga a baja velocidad por la parte superior de la torre. Estas torres son, casi siempre, de flujo a contracorriente. Son más eficientes que las torres de tiro inducido, puesto que la presión dinámica convertida a estática realiza un trabajo útil. El aire que se mueve es aire frío de mayor densidad que en el caso de tiro inducido. Esto también significa que el equipo mecánico tendrá una duración mayor que en el caso de tiro inducido, ya que el ventilador trabaja con aire frío y no saturado, menos corrosivo que el aire caliente y saturado de la salida, Como inconveniente debe mencionarse la posibilidad de que exista recirculación del aire de salida hacia la zona de baja presión, creada por el ventilador en la entrada de aire.

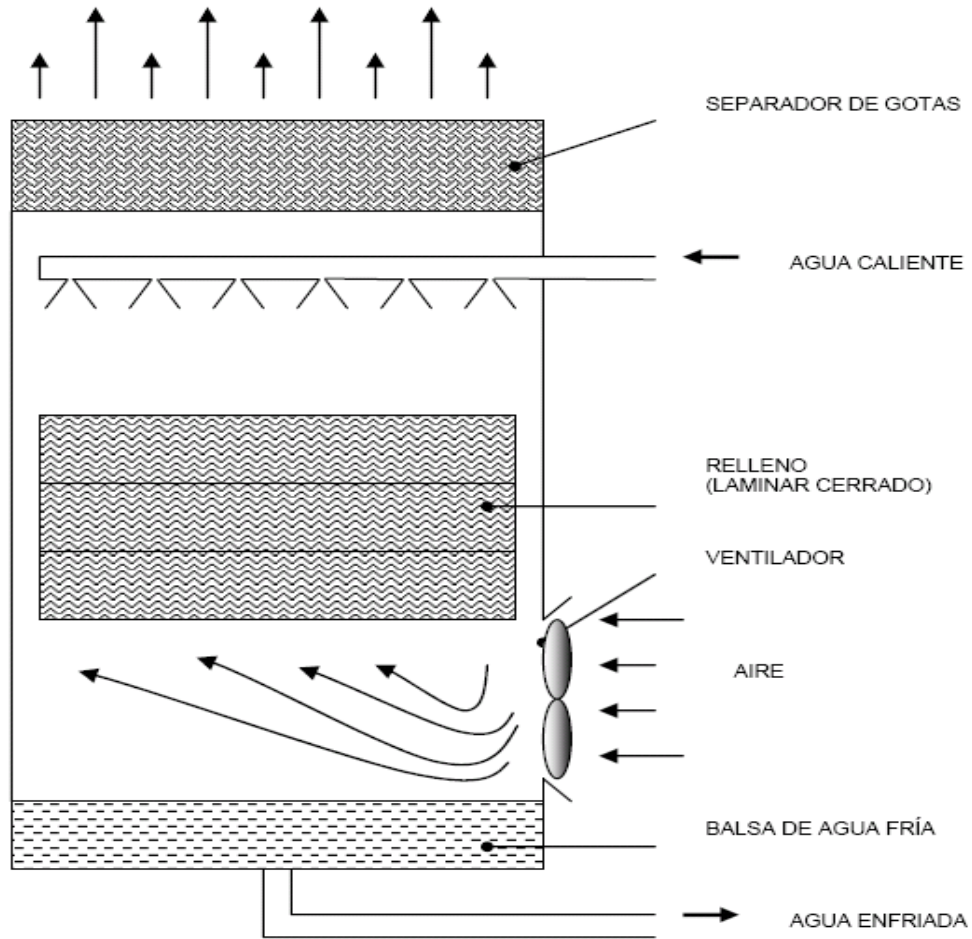


Figura VII.- Esquema de torre de flujo a contracorriente y tiro mecánico forzado.

## 7.- TORRE MODULAR EN MATERIAL PLASTICO.

La torre de enfriamiento experimental es un ejemplo de una torre húmeda de tiro forzado a contracorriente, siendo a la vez un ejemplo de un sistema abierto, a través del cual se lleva a cabo una transferencia tanto de calor como de masa de una corriente a la otra, como se muestra en la siguiente figura:

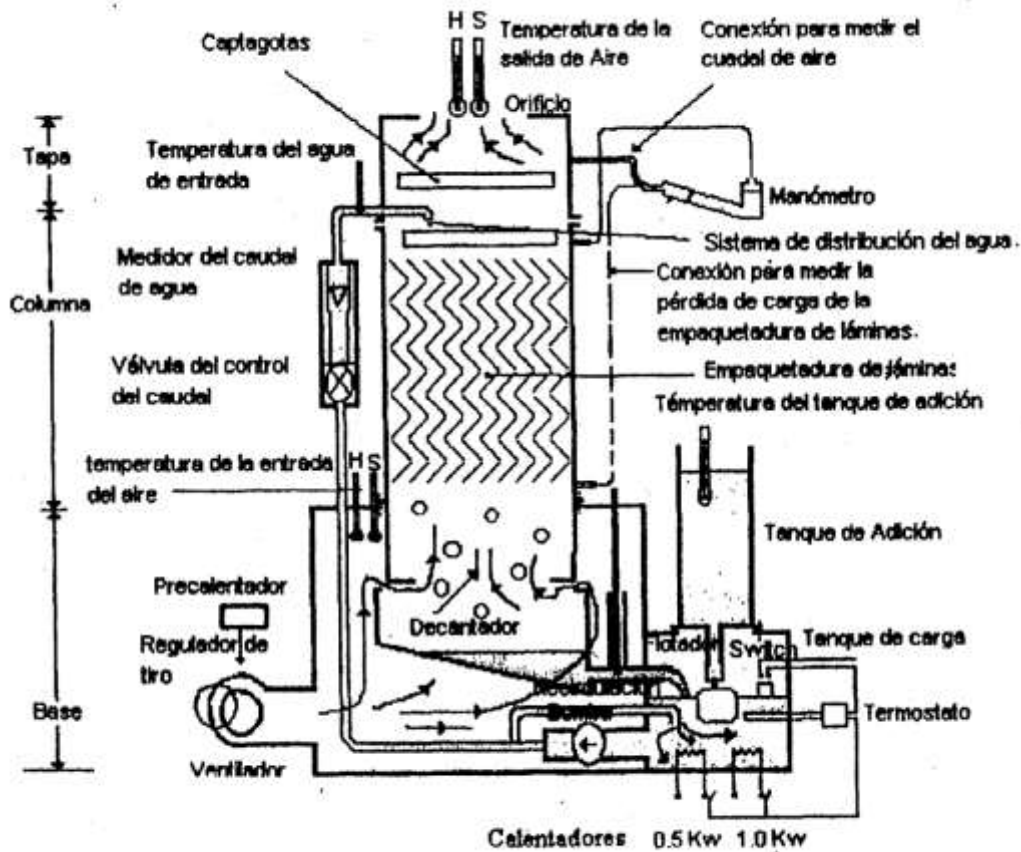


Figura VIII.- Torre de enfriamiento modular.

La unidad es completa en si misma e incluye la carga de calentamiento simulada, una bomba para la circulación de agua, una columna empacada, un ventilador de tiro forzado, un sistema de distribución de agua, un sistema de adición de agua y un precalentador de aire.

Esta torre experimental tiene una configuración muy similar a la de una torre de enfriamiento de tiro forzado de tamaño real con las mismas características y se estabiliza rápidamente.



## **VI.- METODOLOGIA**

### **6.1.-MINIMIZACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA FRESCA PARA UN CONTAMINANTE**

#### **6.1.1 INTRODUCCIÓN A LA METODOLOGÍA DE LA TECNOLOGÍA DEL PUNTO DE PLIEGUE.**

La ingeniería de proyectos es un campo de aplicación de la ingeniería ambiental. La minimización del consumo de agua puede ser parte de la ingeniería de proyectos. También puede ser un proyecto por sí mismo. En cualquier caso, se proponen a continuación las etapas a seguir:

Primero, se tiene que definir el problema a resolver, identificar las operaciones que consumen agua con sus flujos de agua que entran y salen de los procesos,

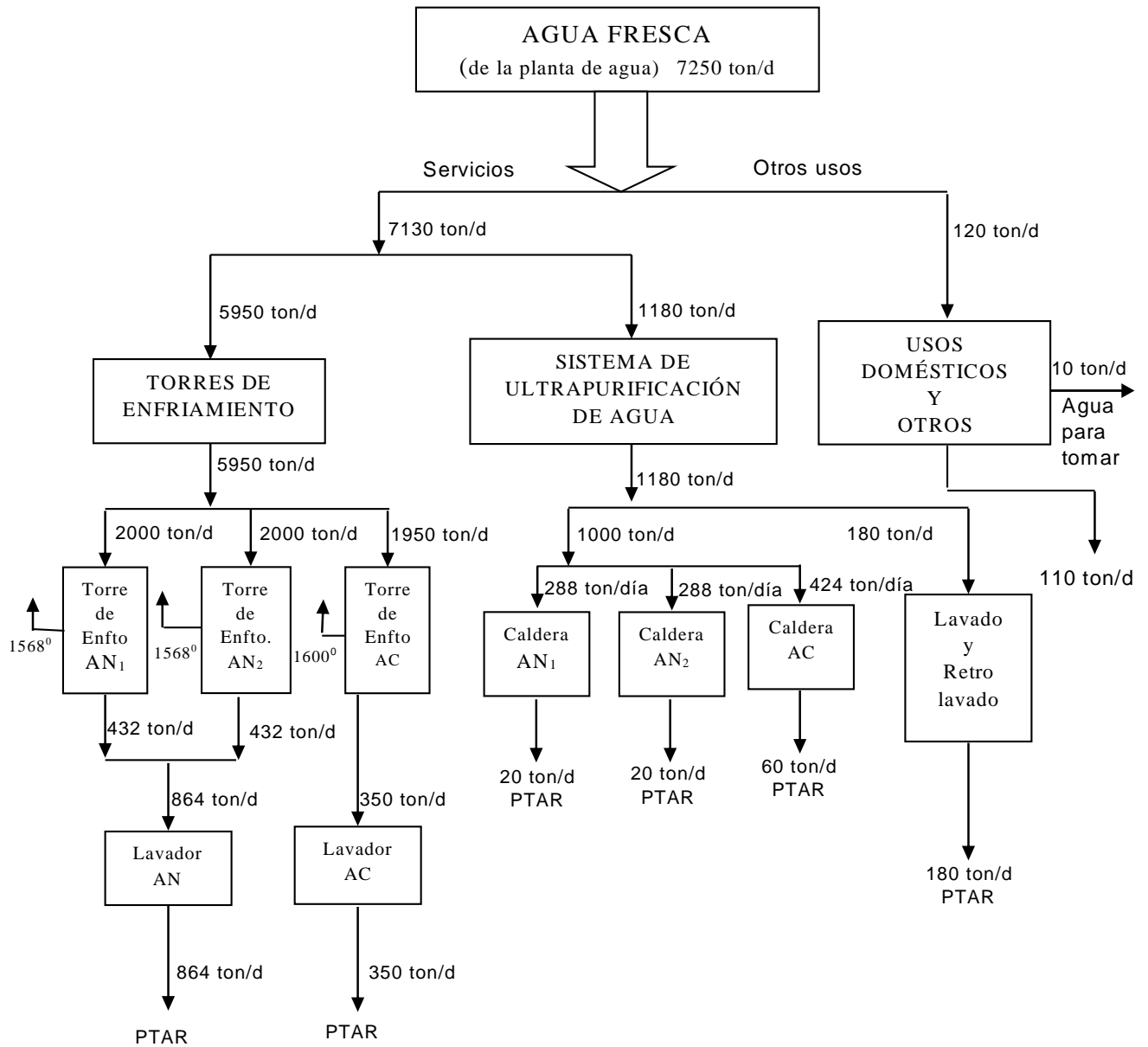
elaborándose una lista de fuentes, usos y descargas de agua, como en la tabla 1, la que se representa en un diagrama de usos de agua, como se muestra en la figura XI. Esta primera etapa requiere usar los datos de operación de la planta así como estar familiarizado con las operaciones de uso de agua, los flujos y las restricciones de calidad del agua.

La siguiente etapa consiste en establecer los datos límite que son los datos de diseño propiamente para la tecnología de punto de pliegue.

En la tercera etapa se determinan los flujos mínimos de agua fresca, la mínima generación de efluentes a través del reuso, regeneración y recirculación, utilizando los principios y las herramientas de la tecnología del punto de pliegue. A esta etapa le sigue la síntesis y el diseño de redes de uso de agua que cumplan con los objetivos o metas de consumo mínimo de agua fresca y la mínima generación de efluentes con el menor costo posible de la inversión en la instalación y su operación.

	Ton/día
<b>1.-FUENTES</b>	<b>7250</b>
• Agua fresca (de la planta de agua)	7250
<b>2.-USOS</b>	<b>7250</b>
SERVICIOS	7130
• Agua de reposición a torres de enfriamiento	
Torre de enfriamiento AN1	2000
Torre de enfriamiento AN2	2000
Torre de enfriamiento AC	1950
<b>Total</b>	<b>5950</b>
• Purificación para alimentar calderas	
Agua de reposición a la caldera AN1	288
Agua de reposición a la caldera AN2	288
Agua de reposición a la caldera AC	424
<b>Total</b>	<b>1000</b>
• Agua para lavado y retrolavado	180
OTROS USOS	120
Agua para tomar	10
Agua para usos domésticos	110
<b>3.- DESCARGAS Y PÉRDIDAS</b>	
• Torres de enfriamiento	
Torre AN1	1568
Torre AN2	1568
Torre AC	1600
<b>Total</b>	<b>4736</b>
• Lavadores	
Lavador AN	864
Lavador AC	350
<b>Total</b>	<b>1214</b>
• Calderas	
Caldera AN1	20
Caldera AN2	20
Caldera AC	60
<b>Total</b>	<b>100</b>
• Agua de lavado y retrolavado	180
OTROS USOS	
• Usos domésticos	110

Tabla 1.- Lista de fuentes, usos y descargas de agua.



<sup>0</sup> Evaporación y arrastre totales 4736 ton/d  
 PTAR = Planta de tratamiento de aguas residuales

Figura X.- Diagrama de usos de agua de una planta química.

**6.1.2 MODELO DE TRANSFERENCIA DE MASA DE UN CONTAMINANTE.**

La representación de la operación de uso de agua como un contacto a contracorriente entre una corriente de proceso rica en un contaminante y una corriente de agua, pobre en dicho contaminante, se ilustra en la siguiente figura:

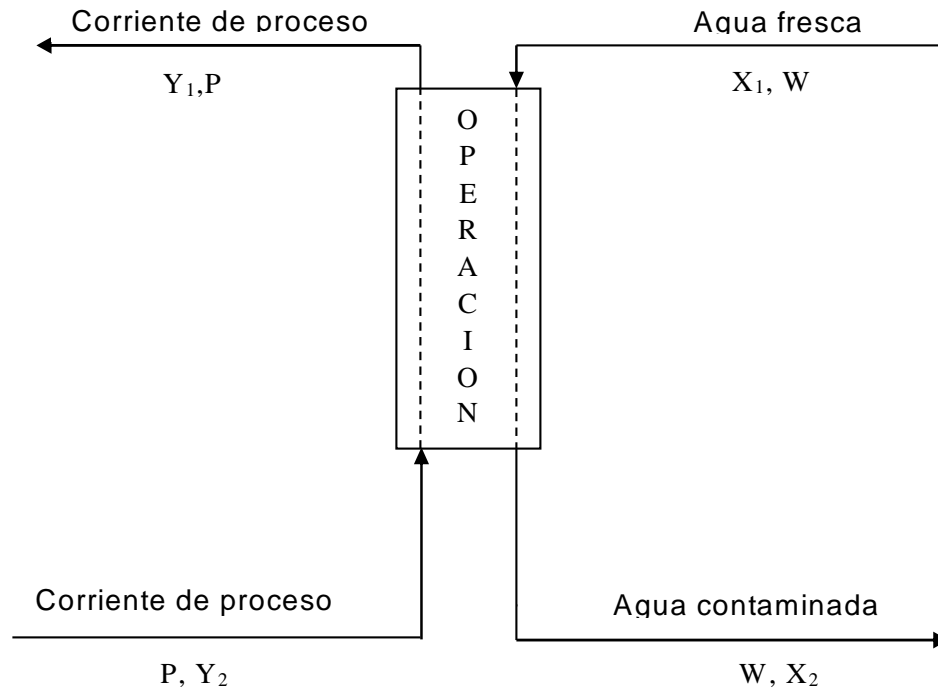


Figura XI.- Modelo de contacto a contracorriente.

Haciendo un balance de masa se obtiene:

$$PY_2 + WX_1 = PY_1 + WX_2 \quad (5.1.1)$$

Reordenando:

$$P(Y_2 - Y_1) = W(X_2 - X_1) \quad (5.1.1a)$$

Resolviendo:

$$\frac{W}{P} = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \quad (5.1.1b)$$

Donde:

P = Flujo de proceso libre de contaminante.

W = Flujo de agua sin contaminante

X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub> = Relaciones másicas de contaminante.

Y = masa de contaminante / masa de proceso

X = masa de contaminante / masa de agua sin contaminante

6.1.3 REPRESENTACIÓN DE LA OPERACIÓN DE USO DE AGUA.

Si se grafica, para una operación de uso de agua, concentración contra carga másica se obtiene lo siguiente:

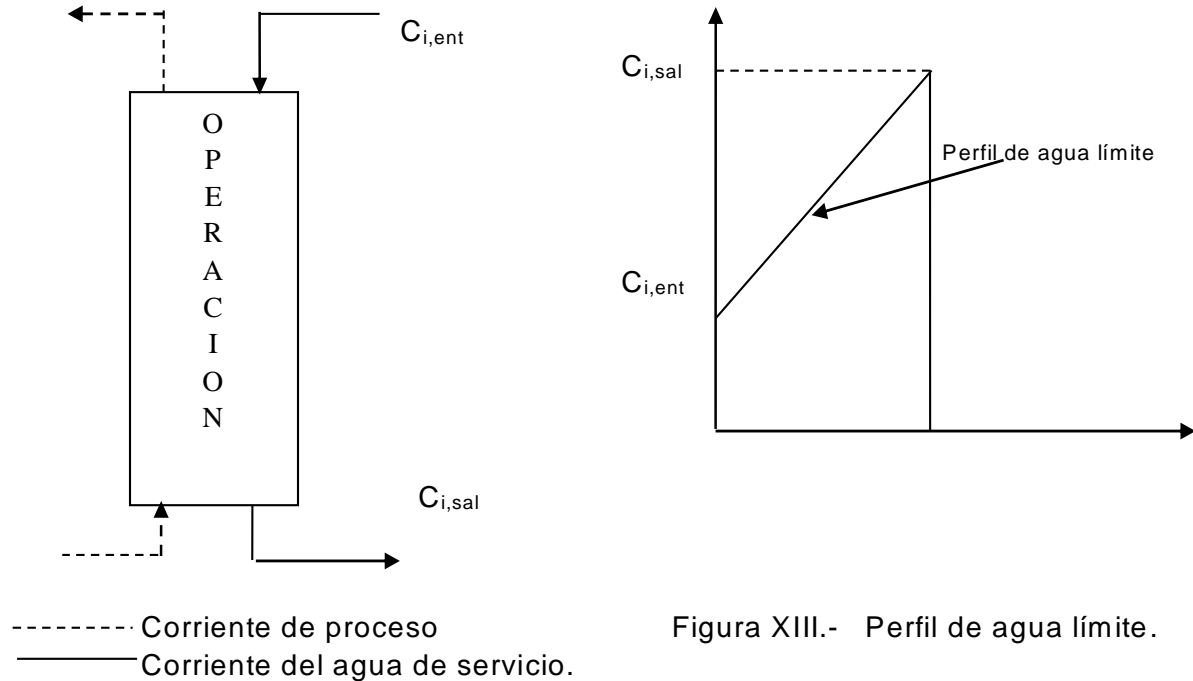


Figura XIII.- Perfil de agua límite.

Figura XII.- Representación de la operación de uso de agua.

El punto que representa la entrada al equipo u operación de uso de agua debe tener como coordenadas  $\Delta m = 0$  y concentración igual a  $C_{i,ent}$ . el punto que representa la salida de la operación o del equipo que corresponde a toda la carga másica de contaminante transferido a la corriente de agua y la concentración de contaminante  $C_{i,ent}$ .

A la línea que une ambos puntos en la figura XIII se le conoce como perfil de agua límite en terminología de la tecnología del punto de pliegue aplicada al uso del agua.

**6.1.4 ECUACIONES QUE SE UTILIZAN EN LA TECNOLOGÍA DEL PUNTO DE PLIEGUE A PARTIR DEL MODELO DE TRANSFERENCIA DE MASA A CONTRACORRIENTE.**

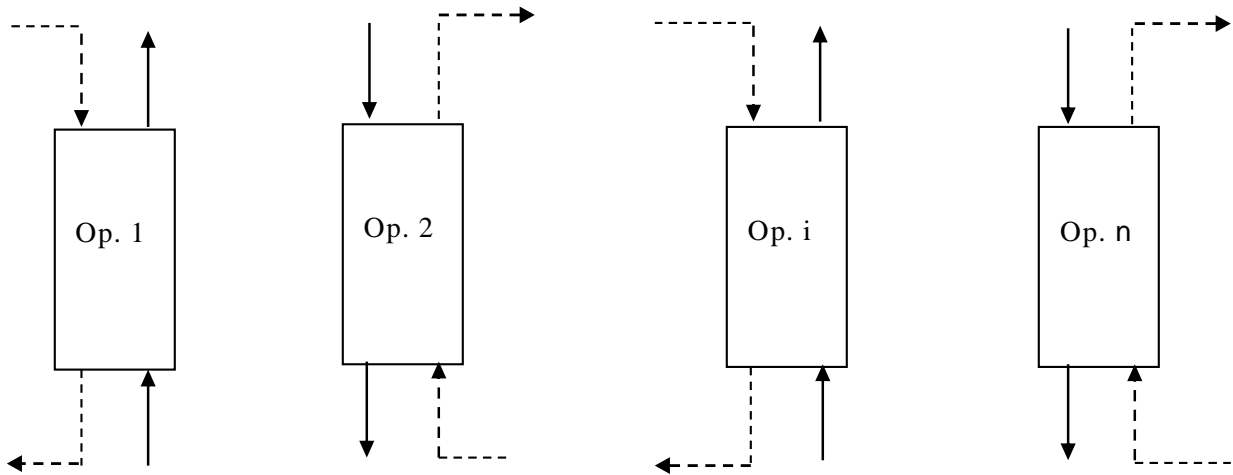


Figura XIV Representación del modelo a contracorriente desde la operación 1 hasta la operación  $n$ .

Balace de masa de contaminante transferido desde una corriente de proceso a una corriente de agua en la operación 1:

$$f_1 ( C_{1,sal} - C_{1,ent} ) = \Delta m_1$$

Balace de masa de contaminante transferido desde alguna corriente de proceso a una corriente de agua en la operación 2:

$$f_2 ( C_{2,sal} - C_{2,ent} ) = \Delta m_2$$

Balace de masa de contaminante transferido desde la corriente de proceso  $i$ , a una corriente de agua en la operación  $i$ :

$$f_i ( C_{i,sal} - C_{i,ent} ) = \Delta m_i$$

para la última operación,  $n$ :

$$f_n ( C_{n,sal} - C_{n,ent} ) = \Delta m_n$$

Desde la operación 2 y hasta la operación  $n$  el flujo de entrada de la corriente de agua puede ser el flujo de entrada de la operación 1 o un flujo mezclado obtenido de otras corrientes.

Reordenando:

$$C_{1,sal} - C_{1,ent} = \Delta m_1/f_1$$

$$C_{2,sal} - C_{2,ent} = \Delta m_2/f_2$$

$$C_{i,sal} - C_{i,ent} = \Delta m_i$$

$$C_{n,sal} - C_{n,ent} = \Delta m_n/f_n$$

Este conjunto de ecuaciones permite ver que un ordenamiento posible de balances es desde la concentración de entrada a todos los servicios de uso de agua o concentración de agua fresca hasta la concentración mas alta. Este es el fundamento para construir la primera columna de una tabulación conocida como diagrama de intervalos de concentración (DIC).

De este modo y recordando que  $f_2, \dots, f_i, \dots, f_n$  pueden ser flujos mezclados, se pueden sumar los valores de los flujos de masa de contaminante transferido en las diferentes operaciones,  $\Delta m$ 's,

$$\Delta m_1 + \Delta m_2 + \Delta m_3 + \dots + \Delta m_i + \dots + \Delta m_n = \Delta m_{tot}$$

En una tabulación se pueden hacer las sumas parciales que se denominan cargas másicas acumuladas, hasta llegar a tener un valor de  $\Delta m_{tot}$  en el último renglón, como mas adelante se muestra en la construcción de dicha tabulación conocida como diagrama de intervalos de concentración ( DIC ), corroborándolo con un ejemplo.

### **6.1.5 DATOS DE PROCESO LÍMITE.**

Para analizar una operación de uso de agua como el que se muestra en la figura X es necesario identificar las restricciones de operación y basándose en estas restricciones determinar el flujo de agua límite para esa operación.

Una restricción es cualquier condición que impida a una corriente de agua ser reusada (dar un servicio adicional a las operaciones de uso de agua). Las restricciones básicas para la operación i son:

- 1.- El nivel de contaminante en la corriente de entrada,  $C_{i,ent}^{lim}$ . Aquí  $C_i$  es la concentración del contaminante i en unidades de masa contaminante por unidad de volumen o unidad de masa de agua con contaminante.
- 2.- El nivel de contaminante en la corriente de salida,  $C_{i,sal}^{lim}$
- 3.- La carga másica total de contaminante transferido,  $\Delta m_{i,tot}$

Con estas restricciones básicas se obtiene el flujo de agua límite que es el flujo de agua necesario para lograr la transferencia de masa requerida del contaminante. Este flujo se vuelve significativo cuando se pretende reusar el agua al máximo, siempre y cuando las restricciones se cumplan.

En este modelo las restricciones de equilibrio están incorporadas en las condiciones límite, i.e., las condiciones límite representan las concentraciones más altas con las que aun hay transferencia de masa porque provienen de una restricción de equilibrio. Por ejemplo, la fuerza impulsora para la transferencia de masa del contaminante a la entrada de agua a la operación  $i$ , no es cero cuando esta corriente de agua entra a la concentración límite,  $C_{i,ent}^{lim}$ . En este caso la fuerza impulsora es la mínima permisible. Lo mismo aplica para la concentración límite de salida.

Con las condiciones anteriores, el flujo límite de agua para la operación  $i$ , se define como:

$$f_i^{lim} = \frac{\Delta m_{i,tot}}{C_{i,sal}^{lim} - C_{i,ent}^{lim}} \quad (6.1.2)$$

La obtención de los datos de proceso límite inicia con la identificación de las corrientes de entrada y salida a la operación de uso de agua. Las operaciones que requieren o usan agua fresca tienen una concentración de entrada límite de cero y una concentración de salida límite igual a la concentración de salida real. Para operaciones que se pueden hacer funcionar con corrientes alternativas se evalúan las operaciones en función de las restricciones de las concentraciones de entrada y salida. Los datos de proceso límite incluyen las concentraciones de entrada y salida límite del contaminante (los límites superior e inferior de concentración de contaminante) y las cargas másicas o flujos de masa transferida entre la entrada y salida de la operación.

Las razones de flujo o flujos de agua se expresarán en  $ton/h$ , las cargas másicas en  $kg/h$ . Y las concentraciones de los contaminantes en  $ppm$ , a menos que se definan otras unidades para un caso específico.

#### **6.1.6 IDENTIFICACIÓN DEL FLUJO MÍNIMO DE AGUA FRESCA SIN REUSO PARA UN CONTAMINANTE.**

A cada operación individual de uso de agua se le puede determinar el flujo mínimo de agua fresca usando un gráfico de concentración de contaminante contra carga másica, como lo muestra la figura XV. Se puede entonces graficar un perfil de agua límite entre las concentraciones límite de entrada y salida de contaminante para cada operación, como una línea que representa a la corriente de proceso que usa agua y que es rica en contaminante. Sobre el mismo gráfico se puede añadir

una *línea de suministro de agua* entre la concentración de contaminante en el suministro de agua y la concentración límite de salida para la misma carga másica. El flujo mínimo de agua fresca sin reuso corresponde al inverso de la pendiente de la línea de suministro trazada entre una concentración límite cero de entrada y la concentración límite de salida del contaminante, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$f_{i,\min} (\text{ton/h}) = \frac{\Delta m_{i,\text{tot}} (\text{kg/h})}{C_{i,\text{sal}}^{\text{lim}} (\text{ppm})} \times 10^3 \quad (6.1.3)$$

Cuando se han determinado todos los flujos de agua fresca mínimos, es decir, los flujos que corresponden a cada operación de uso de agua, se pueden sumar, aplicando la siguiente ecuación:

$$f_{i,\min} (\text{ton/h}) = \sum_i \frac{\Delta m_{i,\text{tot}} (\text{kg/h})}{C_{i,\text{sal}}^{\text{lim}} (\text{ppm})} \times 10^3 \quad (6.1.4)$$

La ecuación 6.1.4 determina el flujo total mínimo de agua fresca para el sistema sin reuso de agua.

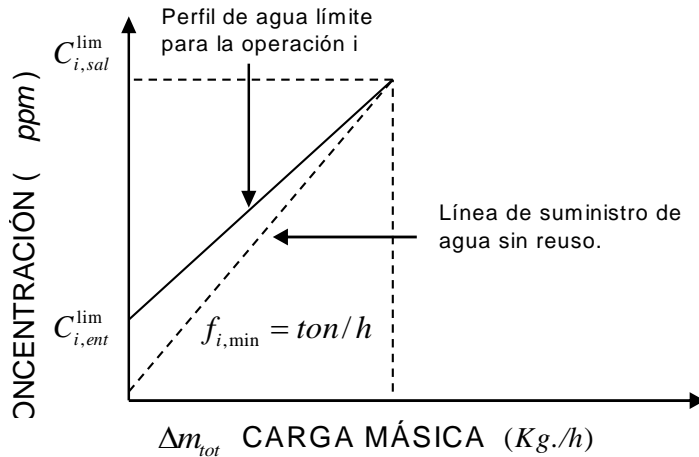


Figura XV Perfil de agua límite de la operación i

**6.1.7 EJEMPLO.**

A continuación se representa un ejemplo en el que se aplica lo antes expuesto, para calcular el flujo mínimo del sistema sin reuso. Después, este mismo ejemplo servirá para explicar la metodología del punto de pliegue cuando se obtiene el flujo mínimo de agua fresca para el sistema de reuso.

La tabla 2 contiene los datos del proceso de cuatro operaciones de uso de agua de una planta química. El primer objetivo es determinar el flujo mínimo de agua fresca sin reuso que requiere el sistema cuando se retira un contaminante. Para

cumplir con este objetivo se determina en primer lugar el flujo límite para cada operación de uso de agua.

OPERACIÓN	CONCENTRACIÓN		CARGA MÁSICA
i	ppm		kg/h
	$C_{i,ent}^{lim}$	$C_{i,sal}^{lim}$	$\Delta m_{i,tot}$
1	0	60	1.20
2	0	45	1.35
3	30	90	2.40
4	75	105	1.50

Tabla 2 Datos de proceso para cuatro operaciones de uso de agua.

### 6.1.8 CÁLCULOS PARA EL FLUJO LÍMITE Y PARA EL FLUJO MÍNIMO SIN REUSO.

Para obtener el flujo límite de cada operación de uso de agua se utiliza la ecuación 6.1.2.

$$f_i^{lim} (ton/h) = \frac{\Delta m_{i,tot} (kg/h)}{[C_{i,sal}^{lim} - C_{i,ent}^{lim}] (ppm)} \times 10^3$$

$$f_1^{lim} = \frac{1.20}{[60-0]} \times 10^3 = 20 \text{ ton/h}$$

$$f_2^{lim} = \frac{1.35}{[45-0]} \times 10^3 = 30 \text{ ton/h}$$

$$f_3^{lim} = \frac{2.40}{[90-30]} \times 10^3 = 40 \text{ ton/h}$$

$$f_4^{lim} = \frac{1.50}{[105-75]} \times 10^3 = 50 \text{ ton/h}$$

De esta manera quedan establecidos los datos de proceso límite que son los datos de diseño propiamente para la aplicación de la tecnología del punto de pliegue, tabla 3.

OPERACIÓN	CONCENTRACIÓN		CARGA MÁSCICA	FLUJO LÍMITE
i	ppm		kg/h	ton/h
	$C_{i,ent}^{lim}$	$C_{i,sal}^{lim}$	$\Delta m_{i,tot}$	$f_i^{lim}$
1	0	60	1.20	20
2	0	45	1.35	30
3	30	90	2.40	40
4	75	105	1.50	50

Tabla 3 Datos límite para aplicar la tecnología del punto de pliegue.

Para obtener el flujo mínimo de cada operación, como se explico anteriormente, sobre el grafico de perfil límite se puede añadir una línea de suministro de agua entre la concentración de contaminante en el suministro de agua y la concentración límite de salida para la misma carga másica. El flujo mínimo de agua fresca sin reuso corresponde al inverso de la pendiente de la línea de suministro trazada entre una concentración límite cero de entrada, y la concentración límite de salida del contaminante, como se ilustra en la figura XVI.

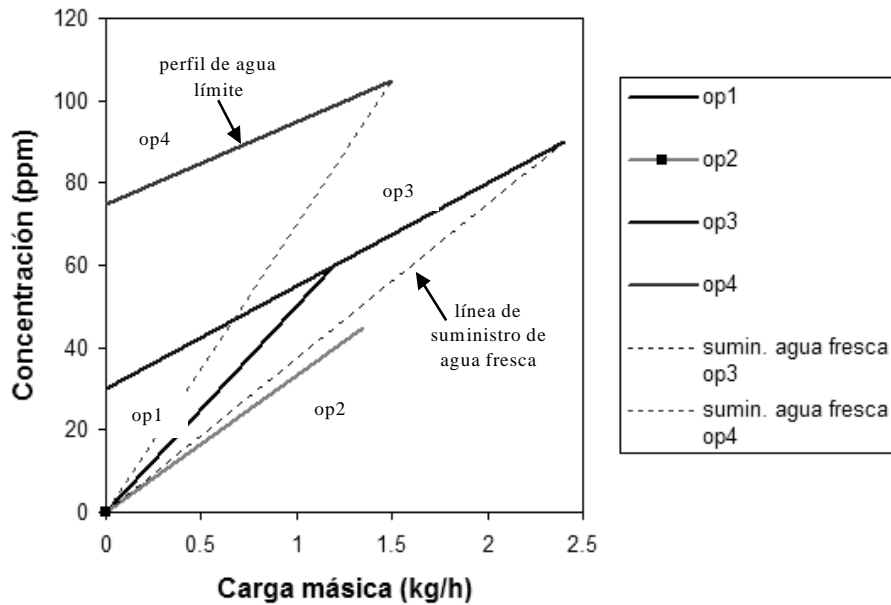


Figura XVI Perfil de agua límite para las cuatro operaciones de uso de agua.

Para obtener el flujo mínimo de cada operación se utiliza la ecuación 6.1.3:

$$f_{\min,i} = \frac{\Delta m_{i,tot}}{C_{i,sal}^{lim}} \times 10^3$$

$$f_{\min,1} = \frac{1.20}{60} \times 10^3 = 20 \text{ ton/h}$$

$$f_{\min,2} = \frac{1.35}{45} \times 10^3 = 30 \text{ ton/h}$$

$$f_{\min,3} = \frac{2.4}{90} \times 10^3 = 26.67 \text{ ton/h}$$

$$f_{\min,4} = \frac{1.50}{105} \times 10^3 = 14.29 \text{ ton/h}$$

Ya determinados todos los flujos de agua fresca mínimos, es decir, los flujos mínimos que corresponden a cada operación de uso de agua, se pueden sumar, dando un total de:

$$f_{i,\min} (\text{ton/h}) = \sum_i \frac{\Delta m_{i,tot} (\text{kg/h})}{C_{i,sal}^{lim} (\text{ppm})} \times 10^3 = 90.96 \text{ ton/h}$$

La figura XVII ilustra todas las operaciones de uso de agua cuando en el sistema no hay reuso de agua.

El sistema sin reuso de agua, lo muestra la red de uso de agua de la figura XVIII.

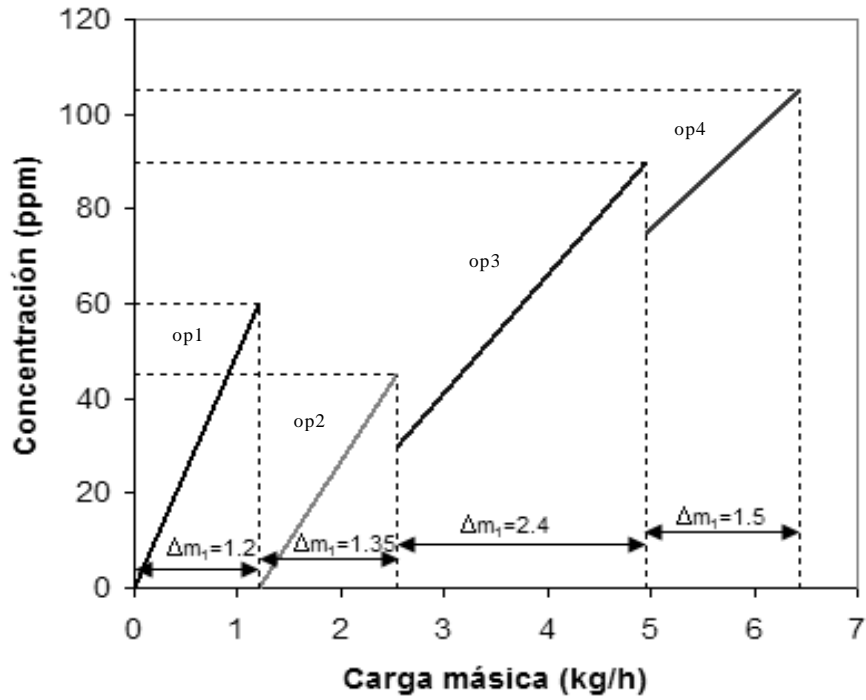


Figura XVII Representación del sistema sin reuso de agua.

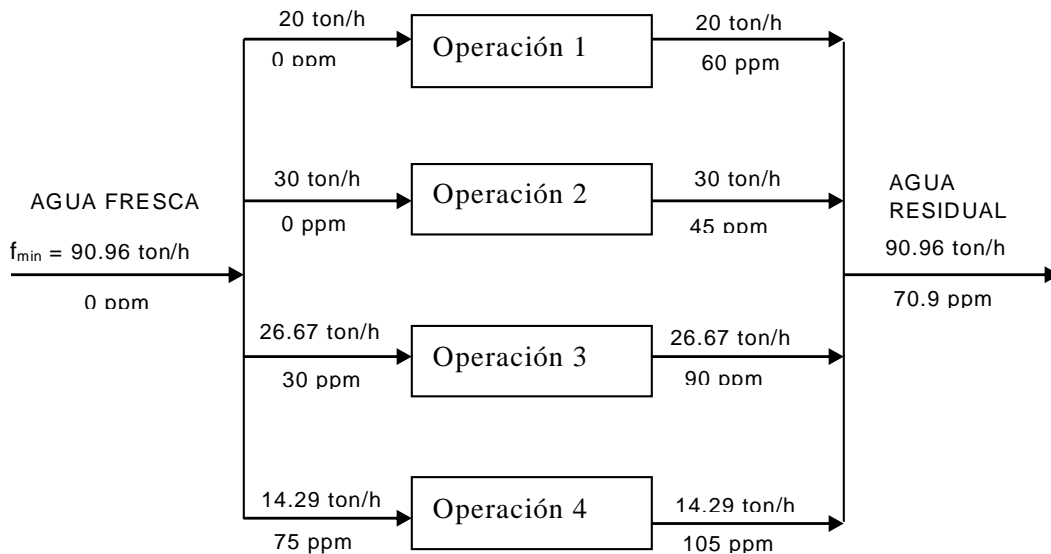


Figura XVIII Diagrama de bloques sin reuso de agua

### 6.1.9 SISTEMA CON REUSO DE AGUA

Ya que se han establecido los requerimientos de agua fresca para el sistema sin reuso de agua, ahora se aborda el área de diseño de la ingeniería conocida como integración de procesos, en la que la etapa clave es la de representar las operaciones de uso de agua individualmente en un diagrama y determinar el flujo mínimo de agua fresca para todo el sistema. El diagrama puede ser la tabulación conocida como *DIAGRAMA DE INTERVALOS DE CONCENTRACIÓN* (DIC) o una representación grafica llamada *CURVA COMPUESTA DE CONCENTRACIÓN* [1].

#### 6.1.10 PASOS PARA CONSTRUIR LA TABULACIÓN CONOCIDA COMO DIAGRAMA DE INTERVALOS DE CONCENTRACIÓN (DIC).

- 1) Hacer una lista de las operaciones de uso de agua  $i$ , con sus concentraciones de entrada y salida  $C_{i,ent}^{lim}$  y  $C_{i,sal}^{lim}$  respectivamente, así como el flujo de masa de contaminante transferido  $\Delta m_{i,tot}$ . Ver tabla 2.
- 2) Con estos datos el flujo másico límite de agua para cada operación, se completa la tabla que servirá de base para la construcción del DIC. Tabla 3.
- 3) Se comienza la construcción del DIC, colocando en la primera columna todos los intervalos de concentración de forma creciente, dejando un renglón entre cada concentración, como en la tabla 4.
- 4) Se dibujan flechas que indican los intervalos de concentración para cada operación. Tabla 4.
- 5) Para cada intervalo de concentración  $k$ , se calcula el flujo másico o carga másica total de contaminante transferido para todas las operaciones involucradas dentro de ese intervalo. Cada renglón de dicha tabulación involucra uno o varios flujos según el rango de concentración que se trate. De cualquier manera el flujo de masa transferido en el rango de concentraciones respectivo se calculará multiplicando este rango de concentraciones por la suma de flujos involucrados en dicho rango, como se expresa en la ecuación 6.1.5 y se dedujo en la ecuación 6.1.4.

$$m_k (kg/h) = \frac{[C_{k+1}^* - C_k^*](ppm)}{10^3} \sum_i f_i^{lim} (ton/h) \quad (6.1.5)$$

- 6) La siguiente columna corresponde a la carga másica acumulada. Estos valores se obtienen al ir sumando las cargas másicas e inician con cero hasta llegar al valor  $\Delta m_{tot}$

$$\Delta m_k = \sum_k m_k \quad (6.1.5a)$$

- 7) Finalmente se calcula (tabula) el flujo de agua en cada límite del intervalo de concentración. En el conjunto de valores de flujo tabulados, existe uno que es el máximo (última columna, cuando no hay pérdidas ni ganancias). Este es el máximo flujo que corresponde al flujo que se tiene que alimentar al sistema. Por esto último se le conoce como  $f_{min}$  o flujo mínimo de agua fresca. Cada valor de flujo de la última columna se calcula de:

$$f_{k,min} = \frac{\Delta m_k}{C_k} \times 10^3 \quad (6.1.5b)$$

Conc. (ppm)	Operación 1 (20 ton/h)	Operación 2 (30 ton/h)	Operación 3 (40 ton/h)	Operación 4 (50 ton/h)	Carga másica (kg/h)	Carga másica acumulada	Flujo (ton/h)
0	↑	↑				0	0
					1.50		
30			↑			1.5	50.00
					1.35		
<b>45</b>						<b>2.85</b>	<b>63.33</b>
					0.90		
60						3.75	62.50
					0.60		
75				↑		4.35	58.0
					1.35		
90						5.70	63.33
					0.75		
105						6.45	61.43

Tabla 4 Diagrama de intervalos de concentración (DIC).

### 6.1.11 CURVA COMPUESTA DE CONCENTRACIÓN.

Es la representación de todas las operaciones de uso de agua sobre un grafico con la concentración de contaminante como ordenadas y carga másica transferida del contaminante como abscisas. En este gráfico se representan todas las operaciones de uso de agua, iniciando desde la concentración cero de

contaminante en la entrada para el suministro de agua fresca hasta la concentración de salida de contaminante de todas las operaciones. Esta curva exhibe una serie de segmentos lineales en intervalos de concentración crecientes que representa la carga másica total de todas las operaciones {1}. De ahí el nombre de curva compuesta de concentración y se usa para obtener el flujo mínimo de agua fresca del sistema, como se ilustra en la figura XIX. Esta curva se construye directamente con los datos de los intervalos de concentración y cargas másicas acumuladas contenidas en el **DIC**.

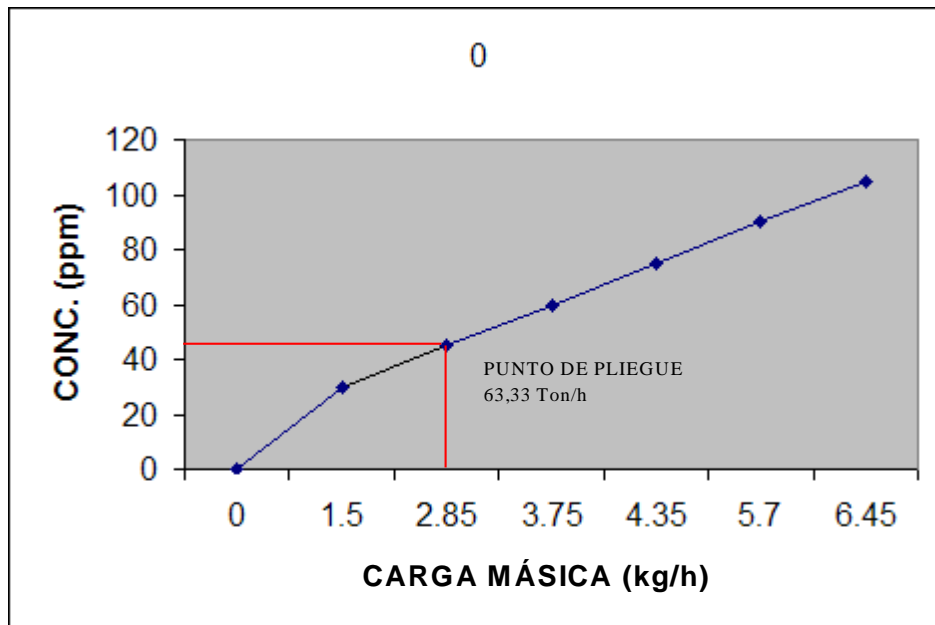


Figura XIX Curva compuesta de concentración

**6.1.12 SIGNIFICADO DEL PUNTO DE PLIEGUE.**

El punto de pliegue es el punto de tangencia entre la curva compuesta y la línea de suministro de agua (línea punteada). El punto de pliegue corresponde a la concentración de un contaminante clave por arriba de la cual no es necesario usar agua fresca. En la figura XIX se muestra el punto de pliegue del problema que se analiza al cual corresponde una concentración de 45 ppm, con un flujo mínimo de 63.33 ton/h.

### 6.1.13.- IDENTIFICACIÓN DEL FLUJO MÍNIMO DE AGUA FRESCA CON REUSO PARA UN CONTAMINANTE.

Para determinar el flujo mínimo de agua fresca con reuso se construye un diagrama de intervalos de concentración (**DIC**) partiendo de los datos de proceso límite. El flujo mínimo de agua fresca se determina a partir del conjunto de valores de flujo tabulados en un DIC, que contiene uno que es el máximo. Éste es el máximo flujo que corresponde al flujo que se tiene que alimentar al sistema. Por esto último se le conoce como  $f_{\min}$  o flujo mínimo de agua fresca.

Un método alternativo es el de construir la curva compuesta de concentración, a ésta se le puede girar, entonces, una línea de suministro de agua en dirección contraria a las manecillas del reloj desde el origen (concentración cero de entrada y carga másica cero) hasta que se vuelva tangente a la curva compuesta.

Este punto es clave en la minimización de efluentes dado que el sistema no requiere agua fresca por arriba de dicha concentración o pliegue de agua fresca. Entonces, el flujo mínimo de agua fresca con reuso corresponde al inverso de la pendiente de la línea tangente de suministro de agua. Entre mas pronunciada es la pendiente de la *línea de suministro de agua* mas bajo es el flujo de agua fresca.

$$f_{\min} (\text{ton/h}) = \frac{\Delta m_{\text{pinza}} (\text{kg/h})}{C_{\text{pinza}} (\text{ppm})} \times 10^3 \quad (6.1.6)$$

El DIC da los mismos resultados que la curva compuesta, pero debido a su forma tabular puede ser computarizado más fácilmente.

## **6.2.-DISEÑO DE REDES PARA REUSO DE AGUA**

Una red de uso de agua puede representarse con cualesquiera de los siguientes diagramas:

- El diagrama de bloques convencional
- El diagrama de malla
- El diagrama de contenido de masa

El diagrama de bloques es la representación visual más sencilla y la más utilizada en este trabajo para el diseño de redes de uso de agua, en tanto el diagrama de malla suministra una herramienta de diseño útil, pero muy poco utilizada en este trabajo y el diagrama de contenido de masa es solamente una visualización de las unidades de uso de agua.

Para diseñar una red de uso de agua que no incorpore el reuso de agua, se debe suministrar simplemente la cantidad apropiada de agua fresca a cada operación y enviar el agua residual o contaminada directamente al tratamiento, como se ve en la figura XVIII de la sección 6.1.

Para diseñar una red de uso de agua que incorpore el reuso de agua, se puede seguir el método de diseño del intervalo de concentración en un diagrama de malla o de contenido de masa.

El método de diseño del intervalo de concentración suministra una guía paso a paso para la generación de una red preliminar de uso de agua que cumple con el flujo mínimo de agua fresca y obedece a los datos de proceso límite. El método usa intervalos horizontales de concentración de contaminante.

A continuación se diseñará una red de uso de agua para los datos de proceso límite de un sistema que consta de cuatro operaciones de uso de agua reportado en la tabla 2. éste ejemplo se abordó en la sección 6.1 para encontrar el flujo mínimo sin reuso. Ahora se retoman los datos para construir en primer lugar, el diagrama de malla, después, el diagrama de contenido de masa y también el diagrama de bloques de la red de uso de agua para dicho sistema industrial.

### 6.2.1 DIAGRAMA DE MALLA

Un diagrama de malla es una representación de los límites de intervalos de concentración, corrientes de agua, equipos de uso de agua y cargas másicas de contaminante, ver fig. XX.

Para un diagrama de malla hay una terminología especial:

- Corrientes de proceso. Las líneas verticales representadas a la izquierda del diagrama y dirigidas hacia abajo, ver figura XX.
- Corrientes de agua. Las líneas verticales representadas a la derecha del diagrama y dirigidas hacia arriba.
- Unidad de uso de agua u operación de uso de agua. Línea horizontal punteada que une una corriente de proceso con una corriente de agua.
- Lazo.- Cualquier rectángulo trazado con una corriente de proceso, una corriente de agua y dos unidades de uso de agua, completas. Es decir, los lados verticales no recorren todas las líneas en las que se origina, en tanto que las líneas horizontales si tienen que hacerlo, como requisito.

El diagrama de malla puede usarse para el diseño de una red de uso de agua siguiendo puntualmente las siguientes reglas heurísticas [1]

- Se pueden combinar unidades de uso de agua cambiando la carga másica de una a otra del mismo lazo. Con esto se rompe el lazo.
- Los cambios de carga másica anteriores pueden ser hechos siempre y cuando no se violen los datos límite de proceso.

### 6.2.2.- PASOS PARA LA ELABORACIÓN DEL DIAGRAMA DE MALLA

1. Se trazan líneas punteadas horizontales que representan los límites de los intervalos de concentración  $C_k^*$  del límite del intervalo k.
2. A la izquierda del diagrama se traza una flecha dirigida hacia abajo (en línea sólida) entre las concentraciones de entrada y salida del contaminante para representar cada corriente de proceso que a su vez representa la operación de uso de agua.
3. A la derecha se traza una flecha dirigida hacia arriba (línea sólida) entre 0 ppm (agua fresca) y la mayor concentración de los límites de intervalos que representa la corriente de agua.
4. En cada intervalo se calcula la carga másica de contaminante a transferir de cada corriente de proceso que representa las operaciones de uso de agua en dicho intervalo como carga másica total de contaminante transferido a través de la operación, ponderada con la fracción de cambio total de concentración de contaminante que ocurre a través del intervalo.

Aquí  $C_{k+1}^*, C_k^*$  son las concentraciones del contaminante en los límites del intervalo.

$C_{i,ent}^{lim}$  y  $C_{i,sal}^{lim}$  son, respectivamente. Las concentraciones inicial y final de contaminante para la operación i.

$m_{i,tot}$  es la carga másica total de contaminante transferido en la operación i.

$\sum_{i=1}^n m_{i,k}$  es la carga másica total de contaminante transferido en la operación i en el intervalo k.

5. Para cada operación i en un intervalo de concentración seleccionado se calcula el flujo másico de agua que corresponde a la carga másica del contaminante en la operación i en el intervalo k,  $f_{i,k,tot}$  (ec. 6.2.2).

Aquí  $m_{i,k}$  es la carga másica de contaminante transferido desde la operación i en el intervalo k, (ec. 6.2.1).

$C_{i,k}^w$  es la concentración de contaminante promedio que se utiliza cuando se combina agua fresca con agua reusada.

$C_{k+1}^*$  es la concentración del contaminante en el límite del intervalo k+1 (correspondiente a la concentración en la corriente de agua que sale del intervalo).

Las fuentes de agua se eligen en el siguiente orden:

1. Se usa agua del mismo proceso en el intervalo anterior.
2. Se reusa agua de otros procesos.
3. Se usa agua fresca.

Este orden de reuso de agua provee la cantidad máxima de agua a reusar y la cantidad de agua fresca a consumir.

Se asigna un flujo másico a cada operación en cada intervalo de concentración de modo que la corriente de agua alcance a la concentración superior.

### **6.2.3.- CÁLCULOS NECESARIOS PARA EL DIAGRAMA DE MALLA.**

En cada intervalo se calcula la carga másica de contaminante que se transfiere a la corriente de agua desde la respectiva corriente de proceso utilizando la siguiente ecuación:

$$m_{i,k} (kg/h) = \Delta m_{i,tot} \left[ \frac{C_{k+1}^* - C_k^*}{C_{i,sal}^{lim} - C_{i,ent}^{lim}} \right] \quad (6.2.1)$$

El flujo másico de agua para cada operación i en un intervalo de concentración seleccionado se calcula con la siguiente ecuación.

$$f_{i,k,tot} (ton/h) = \frac{m_{i,k} (kg/h)}{[C_{k+1}^* - C_{i,k}^w] (ppm)} \times 10^3 \quad (6.2.2)$$

En el intervalo de 0 a 30 ppm

Para la operación 1

A

$$m_{1,1} = (1.2) \left[ \frac{30 ppm - 0 ppm}{60 ppm - 0 ppm} \right] = 0.6 \text{ kg/h} \quad f_{1,1} = \frac{m_{1,1}}{C_1^*} 10^3 = \left[ \frac{0.6}{30} \right] 10^3 = 20 \text{ ton/h}$$

Para la operación 2

B

$$m_{2,1} = (1.35) \left[ \frac{30 ppm - 0 ppm}{45 ppm - 0 ppm} \right] = 0.9 \text{ kg/h} \quad f_{2,1} = \frac{m_{2,1}}{C_2^*} 10^3 = \left[ \frac{0.9}{30} \right] 10^3 = 30 \text{ ton/h}$$

$$\sum_{i=1}^2 m_{i,1} = 1.5$$

En el intervalo de 30 a 45 ppm

Para la operación 1

C

$$m_{1,2} = (1.2) \left[ \frac{45 ppm - 30 ppm}{60 ppm} \right] = 0.3 \text{ kg/h} \quad f_{1,2} = \left[ \frac{0.3}{45 - 30} \right] 10^3 = 20 \text{ ton/h}$$

Para la operación 2

D

$$m_{2,2} = (1.35) \left[ \frac{45 ppm - 30 ppm}{45 ppm} \right] = 0.45 \text{ kg/h} \quad f_{2,2} = \left[ \frac{0.45}{45 - 30} \right] 10^3 = 30 \text{ ton/h}$$

Para la operación 3

E

$$m_{3,2} = (2.4) \left[ \frac{45 \text{ ppm} - 30 \text{ ppm}}{90 \text{ ppm} - 30 \text{ ppm}} \right] = 0.6 \text{ kg/h}$$

$$f_{3,2} = \left[ \frac{0.6}{45 - 30} \right] 10^3 = 40 \text{ ton/h}$$

$$\sum_{i=1}^3 m_{i,2} = 1.35 \text{ kg/h}$$

En el intervalo de 45 a 60 ppm

Para la operación 1

F

$$m_{1,3} = (1.2) \left[ \frac{60 \text{ ppm} - 45 \text{ ppm}}{60 \text{ ppm}} \right] = 0.3 \text{ kg/h}$$

$$f_{1,3} = \left[ \frac{0.3}{60 - 45} \right] 10^3 = 20 \text{ ton/h}$$

Para la operación 2

G

$$m_{3,3} = (2.4) \left[ \frac{60 \text{ ppm} - 45 \text{ ppm}}{90 \text{ ppm} - 30 \text{ ppm}} \right] = 0.6 \text{ kg/h}$$

$$f_{3,3} = \left[ \frac{0.6}{60 - 45} \right] 10^3 = 40 \text{ ton/h}$$

$$\sum_{i=1}^2 m_{i,3} = 0.9 \text{ kg/h}$$

En el intervalo 60 a 75 ppm

H

$$m_{3,4} = (2.4) \left[ \frac{75 \text{ ppm} - 60 \text{ ppm}}{90 \text{ ppm} - 30 \text{ ppm}} \right] = 0.6 \text{ kg/h}$$

$$f_{3,4} = \left[ \frac{0.6}{75 - 60} \right] 10^3 = 40 \text{ ton/h}$$

$$\sum_{i=1}^1 m_{i,4} = 0.6 \text{ kg/h}$$

En el intervalo de 75 a 90 ppm (tiene 2 operaciones 3 y 4)

Para la operación 3

I

$$m_{3,5} = (2.4) \left[ \frac{90 \text{ ppm} - 75 \text{ ppm}}{90 \text{ ppm} - 30 \text{ ppm}} \right] = 0.6 \text{ kg/h}$$

$$f_{3,5} = \left[ \frac{0.6}{90 - 75} \right] 10^3 = 40 \text{ ton/h}$$

Para la operación 4

J

$$m_{4,5} = (1.5) \left[ \frac{90 \text{ ppm} - 75 \text{ ppm}}{105 \text{ ppm} - 75 \text{ ppm}} \right] = 0.75 \text{ kg/h} \quad f_{4,5} = \left[ \frac{0.75}{90 - 75} \right] 10^3 = 50 \text{ ton/h}$$

$$\sum_{i=1}^2 m_{i,5} = 1.35 \text{ kg/h}$$

En el intervalo 90 a 105

K

$$m_{4,6} = (1.5) \left[ \frac{105 \text{ ppm} - 90 \text{ ppm}}{105 \text{ ppm} - 75 \text{ ppm}} \right] = 0.75 \text{ kg/h} \quad f_{4,6} = \left[ \frac{0.75}{105 - 90} \right] 10^3 = 50 \text{ ton/h}$$

#### 6.2.4 SIMPLIFICACIÓN, O SÍNTESIS DE LA RED DE USO DE AGUA

Ruptura del primer lazo (A-F)

La nueva concentración de salida se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{sal}^w (\text{ppm}) = C_{ent}^w (\text{ppm}) + \frac{\sum_i \Delta m_{i,tot} (\text{kg/h})}{f_{min} (\text{ton/h})} \times 10^3 \quad (6.2.3)$$

$$C_{sal}^w (\text{ppm}) = 0 (\text{ppm}) + \frac{(0.6 + 0.3) (\text{kg/h})}{20 (\text{ton/h})} 10^3 = 45 \text{ ppm}$$

$$C_{sal}^w = 45 \text{ ppm} < 60 \text{ ppm}$$

El cambio es válido y se puede tomar como concentración de salida 60 ppm.  
(OPERACIÓN 1)

Ruptura del segundo lazo (B-D)

$$C_{sal}^w (\text{ppm}) = 0 (\text{ppm}) + \frac{(0.9 + 0.45) (\text{kg/h})}{30 (\text{ton/h})} 10^3 = 45 \text{ ppm}$$

Válido y se toma como concentración de salida 45 ppm.  
(OPERACIÓN 2).

Ruptura del tercer lazo (E-I)

$$C_{sal}^W = 30(ppm) + \frac{(0.6 + 0.6)(kg/h)}{40(ton/h)} 10^3 = 60ppm$$

$$C_{sal}^W = 60ppm < 90ppm$$

El cambio es válido y se puede tomar como concentración de salida 90 ppm.  
(OPERACIÓN 3)

Ruptura del tercer lazo (J-K)

$$C_{sal}^W = 75(ppm) + \frac{(0.75 + 0.75)(kg/h)}{50(ton/h)} 10^3 = 105ppm$$

Igual a la concentración límite y por lo tanto válido.

$$C_{sal}^W = 105ppm$$

(OPERACIÓN 4)

El diagrama de malla simplificado resultante se presenta en la figura XXI, al cual corresponde el diagrama de bloques de la figura XXIII.

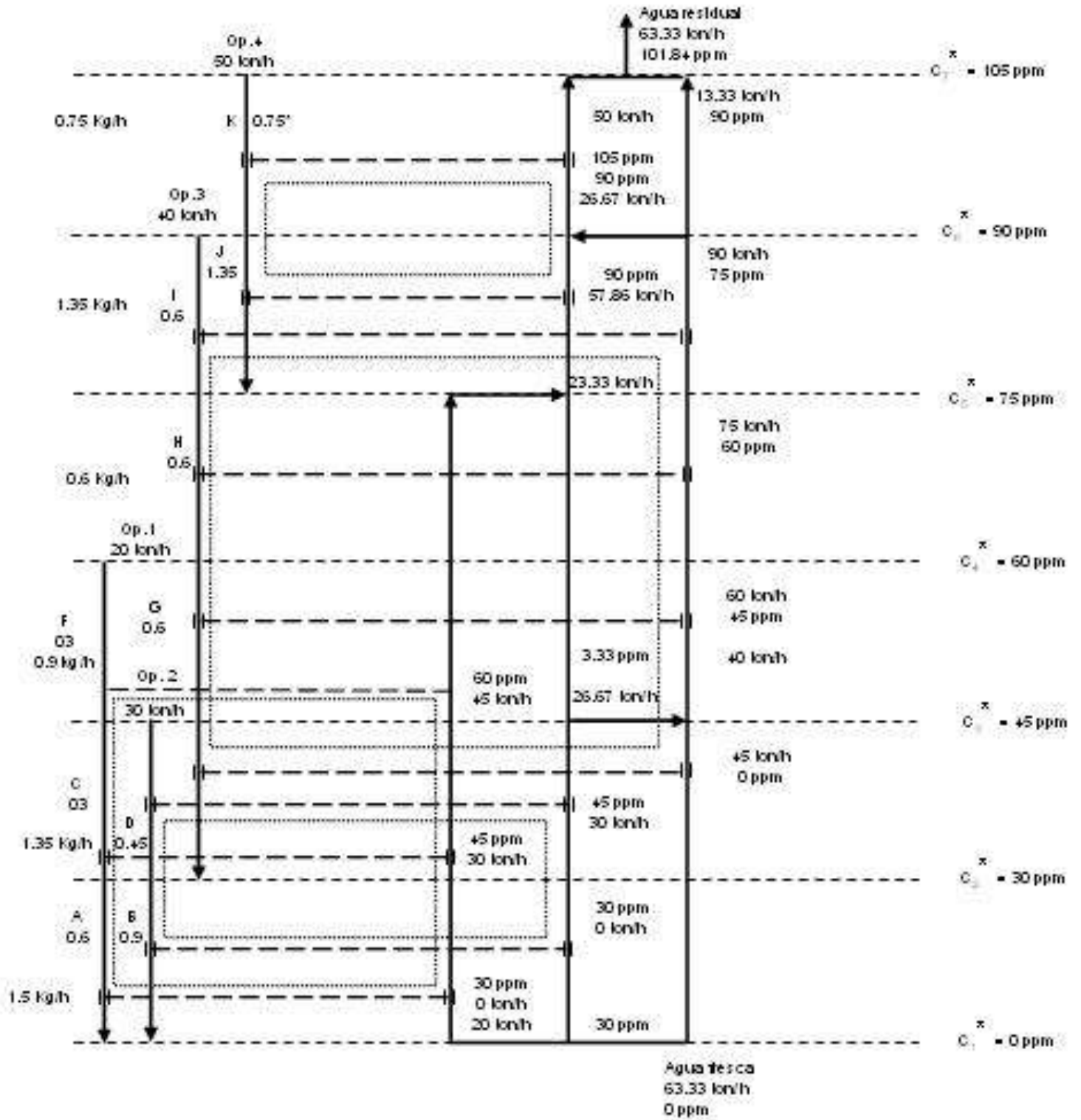


Figura XX Diagrama de malla

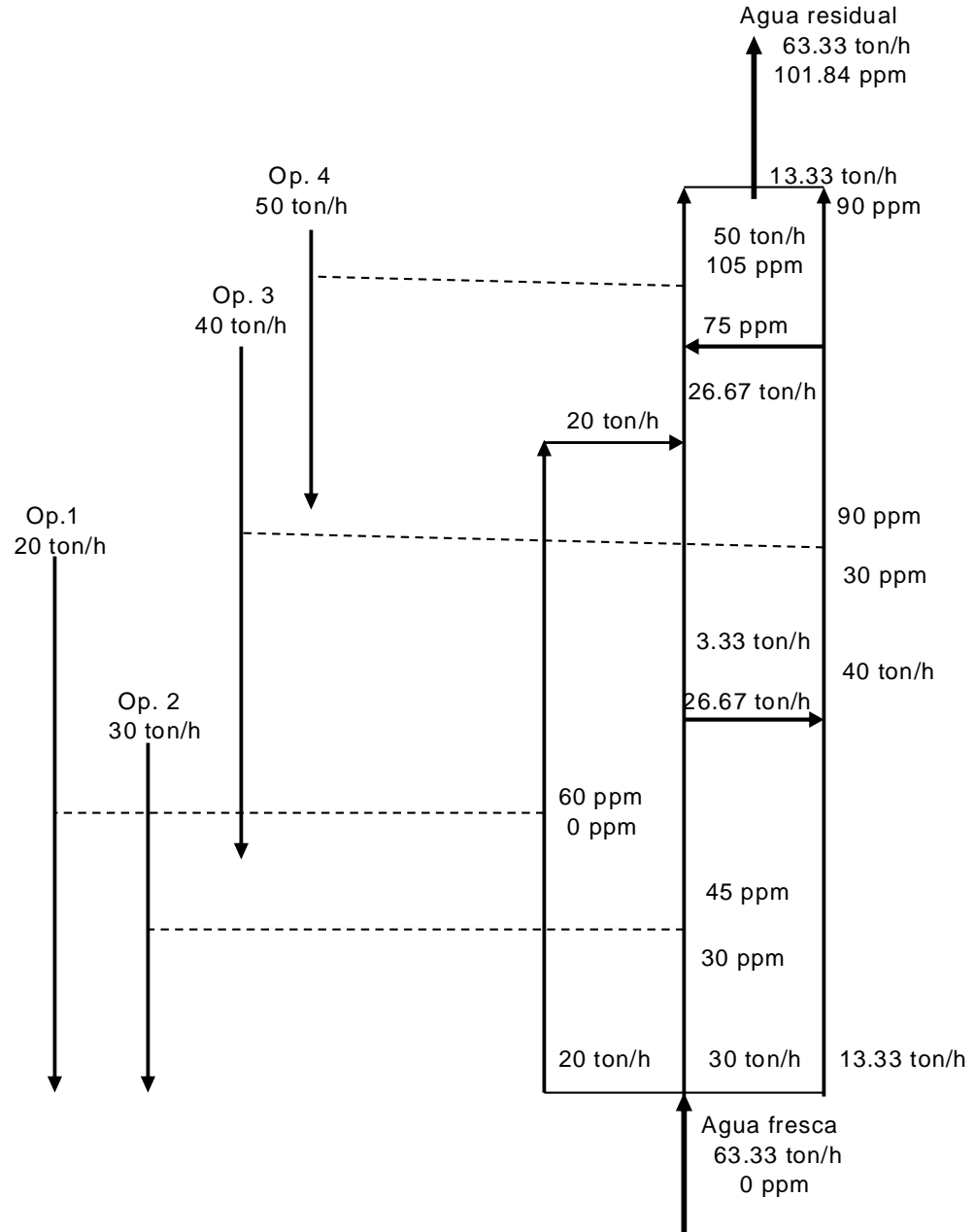


Figura XXI Diagrama de malla simplificado.

6.2.5 ELABORACIÓN DEL DIAGRAMA DE CONTENIDO DE MASA.

1. En el eje Y se representa la concentración del contaminante con escala y en el eje X sin escala se representa el flujo de las corrientes de proceso.
2. Se construyen las cajas de las corrientes de proceso para las operaciones de uso de agua ricas en contaminante sobre el eje X.

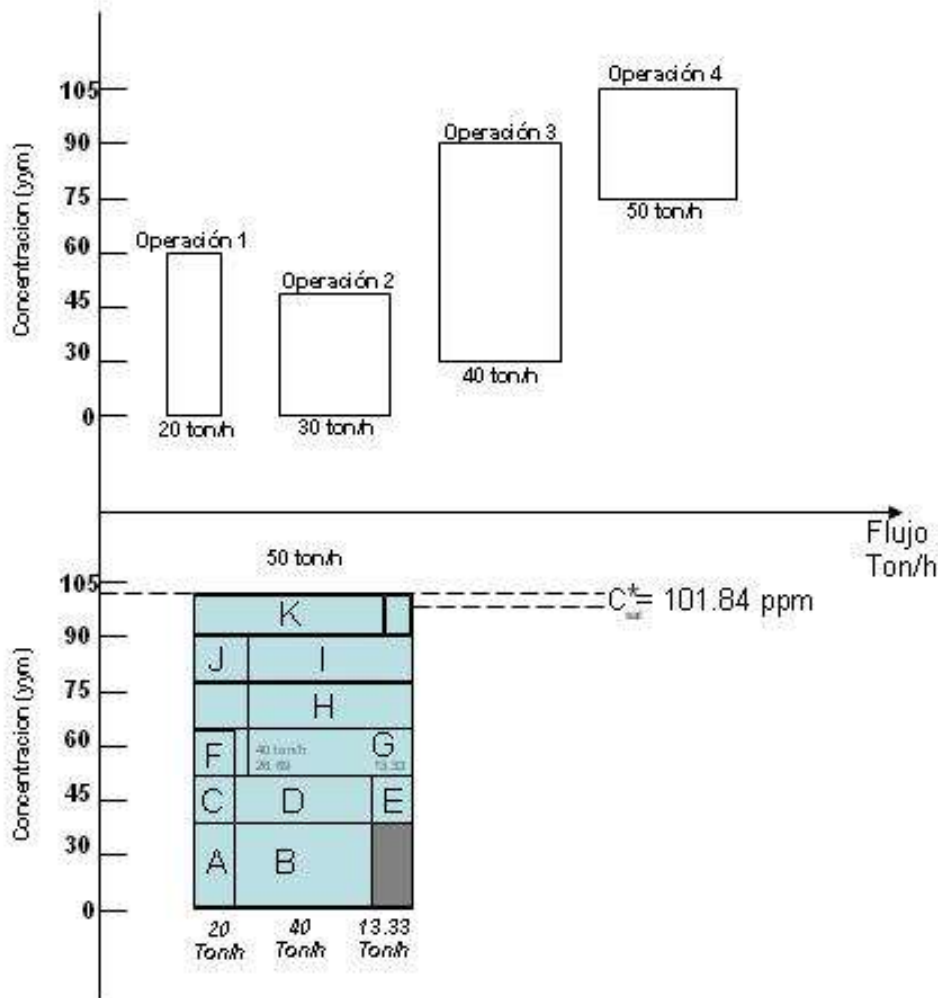


Figura XXII Diagrama de contenido de masa

3. En la parte inferior del mismo diagrama se sobreponen las cajas de las operaciones de uso de agua. Dado que es posible indicar los diferentes intervalos de concentración involucrados, se generan diferentes áreas que se marcan con letras A, B, C, etc.. El diagrama se conoce entonces como diagrama completo de contenido de masa.

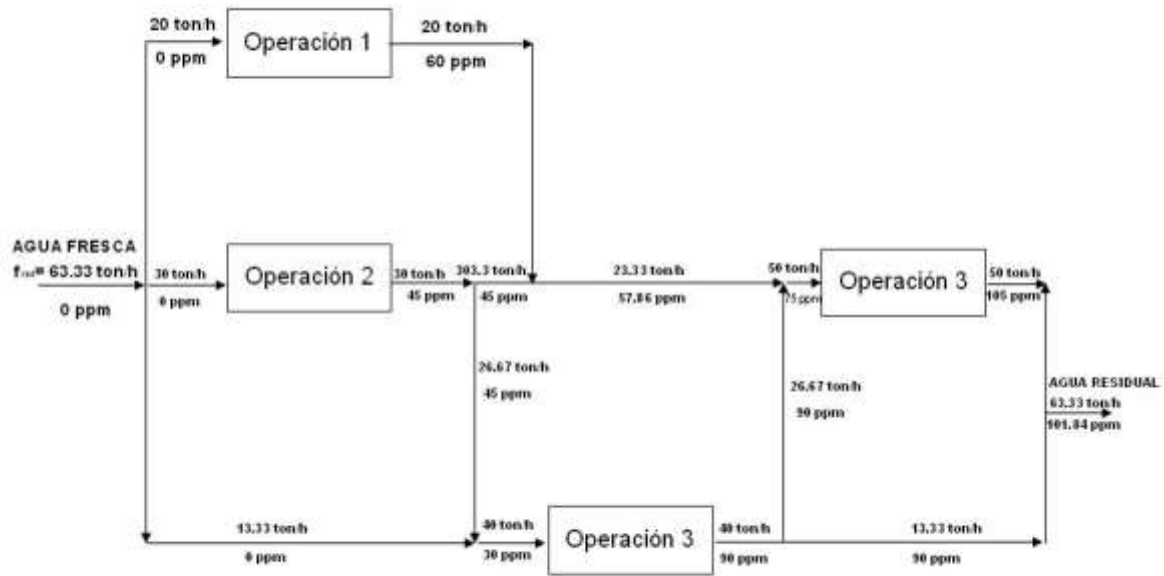


Figura XXIII Diseño de la red con reuso de agua.

En la figura XXIII se muestra como se ha reducido el flujo de agua fresca a su mínimo de 140 *ton/h* de flujo límite a 90 *ton/h* de flujo mínimo sin reuso y hasta 63.33 *ton/h* de flujo mínimo con reuso, tomando en cuenta todas las operaciones simultáneamente y favoreciendo el reuso de agua en lugar de introducir más agua fresca a aquellas operaciones con concentraciones por arriba del punto de pliegue.

### 6.3.- DISEÑO DE SISTEMAS DISTRIBUIDOS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES

La tecnología del punto de pliegue también puede utilizarse para diseñar los sistemas de tratamiento de efluentes. Estos sistemas se abordan nuevamente como problemas de transferencia de masa en los cuales, de la corriente de agua residual, se retira el contaminante mediante procesos de tratamiento en lugar de transferirlos a corrientes de agua fresca. Se puede hacer la representación de un sistema de tratamiento de efluentes mediante una curva compuesta sobre un diagrama de concentración de contaminante en las ordenadas y carga másica retirada del contaminante en las abscisas usando una *línea media de tratamiento* que conecta las concentraciones de entrada y salida del contaminante, teniendo presente que el objetivo no es el flujo mínimo de agua fresca como en la minimización de efluentes, la meta ahora es remover los contaminantes mediante diferentes procesos de tratamiento.

En el contexto de esta sección, el término diseño significa la configuración de diferentes tratamientos (equipos o procesos) en la cual se establecen los flujos, las composiciones de entrada y salida de contaminante con las relaciones de remoción ( $r^i$ ) de contaminante de dichos tratamientos. Los parámetros que definen el funcionamiento de un proceso de tratamiento son: La relación de remoción de contaminante ( $r^i$ ) y la concentración de salida de contaminante posible.

Debido a que el diseño de sistemas de tratamiento de efluentes data de muchos años, se retomará la clasificación en *sistemas centralizados* y *sistemas distribuidos* [3].

Los *sistemas centralizados* tratan una corriente mezclada de todos los efluentes de una planta química, como la figura XXIV esto resulta en altos costos de inversión y de operación.

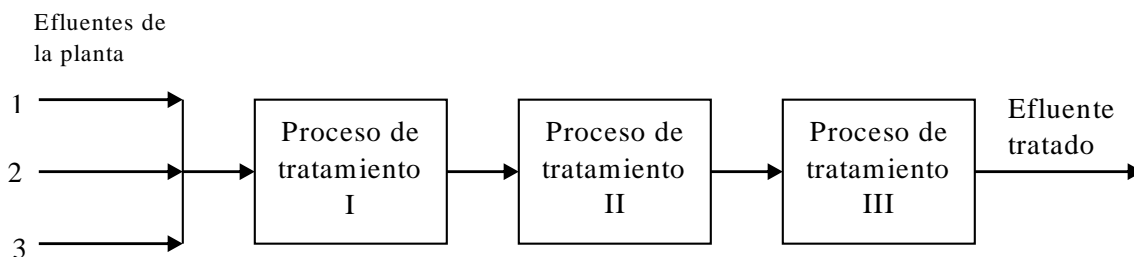


Figura XXIV Sistema centralizado de tratamiento de efluentes.

En contraste, los *sistemas distribuidos* tratan a las corrientes de efluentes por separado, como lo muestra la figura XXV.

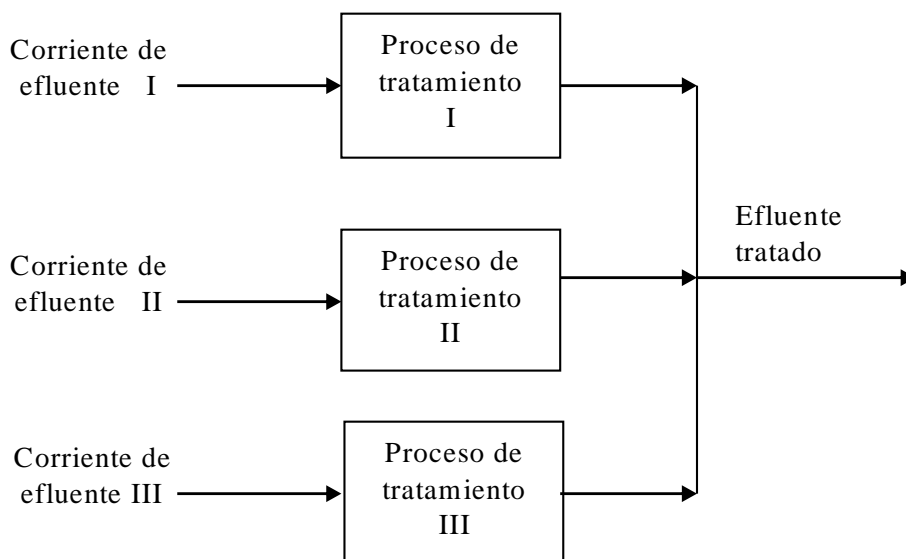


Figura XXV. Sistema distribuido de tratamiento de efluentes.

En esta sección se aplica la tecnología de punto de pliegue al diseño de los sistemas distribuidos de tratamiento de efluentes, dividiendo a estos sistemas de acuerdo a los procesos de tratamiento utilizados y al número de contaminantes presentes en:

CASO I : Un contaminante, un proceso de tratamiento.

CASO II : Un contaminante, varios procesos de tratamiento.

CASO III: Multicontaminantes, varios procesos de tratamiento.

Para los dos primeros se construirán los diagramas de intervalos de concentración (DIC) y la curva compuesta de concentración. Con estas construcciones se localizará el punto de pliegue y así se establecerá el flujo mínimo de tratamiento. También, se presentan ecuaciones de diseño que pueden utilizarse alternativamente, para no construirse el DIC ni la curva compuesta de concentración, y que permiten obtener directamente el flujo mínimo de tratamiento. Asimismo, se determinan las composiciones de entrada y salida del tratamiento.

El diseño propiamente dicho, puede llevarse a cabo cuando se tenga la configuración de flujos óptima. Es decir, el último paso es construir un diagrama de flujo que contenga todos los datos de flujos y composiciones con los cuales es posible calcular el tamaño de los equipos de tratamiento.

Se recomienda iniciar con la corriente más contaminada, tratarla hasta una concentración de salida que se calcula partiendo de una concentración de entrada dada y la respectiva relación de remoción de contaminante  $r^i$ . Se trata a toda la corriente a menos que exceda el flujo de proceso mínimo de tratamiento. Si se excede, se desvía la cantidad en exceso. Por el contrario, si no excede el flujo

mínimo se puede tratar totalmente y una parte de la siguiente corriente mas contaminada.

### 6.3.1.- FLUJO DE TRATAMIENTO MÍNIMO.

Para el diseño de cualquier sistema distribuido de tratamiento de efluentes se necesitan como datos los flujos o razones de flujo y las concentraciones de contaminante para cada corriente a tratar.

El flujo de la corriente residual  $j$ , para el proceso de tratamiento  $i$ ,  $f_j^i$  se relaciona con las concentraciones ( $C_{j,ent}^i$  y  $C_{j,sal}^i$ ) y la carga másica total del contaminante extraído,  $\Delta m_{tot}$ , como sigue:

$$f_j^i (\text{ton/h}) = \frac{\Delta m_{tot} (\text{kg/h})}{C_{j,ent}^i - C_{j,sal}^i (\text{ppm})} \times 10^3 \quad (6.3.1)$$

De donde:

$$C_{j,ent}^i (\text{ppm}) = C_{j,sal}^i (\text{ppm}) + \frac{\Delta m_{tot} (\text{kg/h})}{f_j^i (\text{ton/h})} \times 10^3 \quad (6.3.2)$$

Con estos datos se construye la tabulación conocida como diagrama de intervalos de concentración (DIC) y a continuación la curva compuesta de concentración.

Sobre el diagrama de la curva compuesta de concentración, como en la figura XXVI, se puede trazar una línea que representa la concentración promedio de entrada al proceso de tratamiento, *línea media de tratamiento*. Si bien, más adelante se tendrá que diferenciar entre las líneas de tratamiento de corrientes individuales para procesos de múltiples tratamientos.

Para el caso más simple, cuando se conoce o está definida la concentración de salida del proceso de tratamiento, el flujo mínimo de tratamiento se obtiene simplemente girando la *línea media de tratamiento* (línea punteada en la figura XXVI) en dirección contraria a las manecillas del reloj hasta que se vuelva tangente (“toque”) a la curva compuesta en un punto llamado *pliegue o pinza de tratamiento*. Esta línea punteada une a la concentración de salida del tratamiento con el punto de pliegue. El inverso de la pendiente determina el flujo mínimo. Entre más pronunciada es la pendiente de la *línea media de tratamiento* más bajo es el flujo de tratamiento.

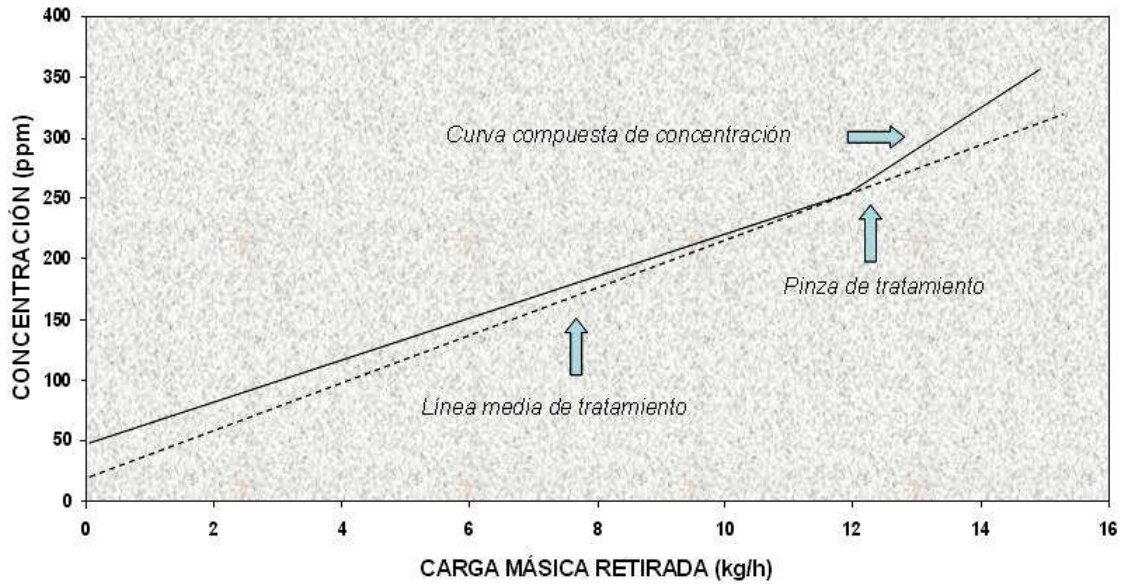


Figura XXVI Curva compuesta de concentración

### 5.3.2.- EJEMPLO (CASO I Y CASO II)

A continuación se presenta un ejemplo de cómo aplicar esta tecnología, específicamente, para los dos primeros casos, el tercer caso se aborda después de esta sección.

La siguiente tabla tiene los datos de las corrientes de agua residuales y los datos de los procesos de tratamiento, respectivamente. El subíndice  $j$  indica la corriente, el superíndice  $i$  se refiere al proceso de tratamiento:

Corriente, $j$	$f_j, \text{ton/h}$	$C_{j, \text{ent}}, \text{ppm}$
1	30	350
2	25	250
3	5	100

Proceso de tratamiento, $i$	$r^i$
I	0.95
II	0.5

Tabla 5 Datos de las corrientes de aguas residuales y los datos de los procesos de tratamiento.

La tabla anterior se modifica para una composición de salida del tratamiento de 40 ppm y con ello se determinará el flujo de tratamiento mínimo para estas circunstancias ( tabla 6 )

Corriente, $j$	$f_j, \text{ton/h}$	$C_{j, \text{ent}} \text{ ppm}$	$C_{j, \text{sal}} \text{ ppm}$
1	30	350	40
2	25	250	40
3	5	100	40

Tabla 6 Datos de las corrientes de aguas residuales modificados.

### 6.3.3.- CASO I: UN CONTAMINANTE, UN PROCESO DE TRATAMIENTO.

Este problema se trata como un problema de minimización de efluentes que incluye una concentración de salida para cada corriente.

Para determinar el flujo mínimo de tratamiento cuando se utiliza un solo proceso de tratamiento para un mismo contaminante presente en todas las corrientes de agua residual, y no se conozca la concentración de salida desde el proceso de tratamiento se usará el método de diseño desarrollado por Wang y Smith [4].

Con los datos de las tablas 5 y 6 se prepara la tabla 7, conocida como diagrama de intervalos de concentración (DIC).

Para el caso I se utilizara exclusivamente el proceso I, el cual es capaz de tratar completamente a todas las corrientes de agua residual ( $r^i$  mayor).

Concentración <i>ppm</i>	Corriente 1 (30 ton/h)	Corriente 2 (25 ton/h)	Corriente 3 (5 ton/h)	Carga Másica (kg/h)	Carga Másica Acumulada (kg/h)
40	↑	↑	↑		0
				3.6	
100			↑		3.6
				8.25	
250		↑			11.85
				3.00	
350					14.85

Tabla 7 Diagrama de intervalos de concentración (DIC).

Se puede encontrar el flujo mínimo de tratamiento introduciendo un punto límite de tratamiento, sobre la curva compuesta de concentración. Este punto representa la intersección de la línea media de tratamiento que pasa por la pinza o pliegue de tratamiento con el negativo de la carga másica. El flujo mínimo de tratamiento es el inverso de la pendiente de la línea que pasa por el punto límite de tratamiento y la pinza de tratamiento, como se muestra en la figura XXVII.

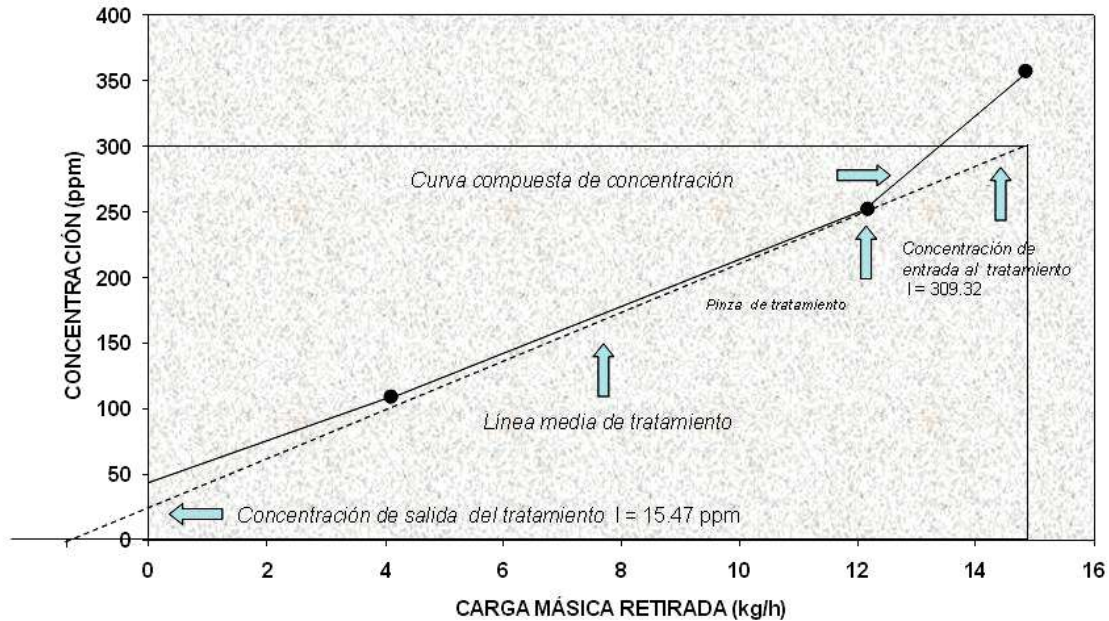


Figura XXVII Curva compuesta de concentración, caso I

Para los datos del ejemplo, no se puede dibujar la línea de proceso de tratamiento directamente ya que no se conoce la concentración de salida del proceso del tratamiento, sino que se trazará de acuerdo a la relación de remoción del contaminante,  $r^i = 0.95$  para el proceso de tratamiento I, definido por la siguiente ecuación:

$$r^i = \frac{C_{ent}^i - C_{sal}^i}{C_{ent}^i} \quad (6.3.1)$$

El punto límite de tratamiento es el punto donde la línea media de proceso de tratamiento cruza con el eje X y se denota como  $-m_0^i$ , por lo que se puede escribir:

$$\frac{C_{ent}^i - C_{sal}^i}{\Delta m_{tot}} = \frac{C_{ent}^i}{m_0^i + \Delta m_{tot}} \quad \text{con } m_0^i > 0 \quad (6.3.2)$$

Sustituyendo la ecuación (6.3.2) en la ecuación (6.3.1) se obtiene :

$$r^i = \frac{\Delta m_{tot}}{m_0^i + \Delta m_{tot}} \quad (6.3.3)$$

La ecuación 6.3.3 es la clave para encontrar el flujo mínimo de tratamiento cuando es un solo tratamiento. Este flujo es importante porque de él depende el costo de tratamiento, ya que a mayor flujo mayor costo de tratamiento.

Para el caso que se está ilustrando se tiene,  $m_0^i = -0.7816$ , despejando de la ec. 6.3.3 se obtiene el flujo mínimo con la siguiente ecuación:

$$f_{\min} = \frac{m_0^i + \Delta m_{pinza}}{C_{pinza}} \times 10^3 \quad (6.3.4)$$

Siendo el flujo mínimo de :

$$f_{\min} = \frac{11.85 + 0.7816}{250} \times 10^3 = 50.53 \text{ ton/h}$$

$$\Delta m_{pinza} = 11.85 \text{ ton/h} \quad \text{con} \quad C_{pinza} = 250 \text{ ppm}$$

Ya se puede obtener la concentración de entrada del contaminante para el proceso de tratamiento I, como un caso particular de la ecuación 6.3.4

$$C_{ent}^i = \frac{m_0^i + \Delta m_{tot}}{f_{\min}^i} \times 10^3 = \frac{14.85 + 0.7816}{50.53} 10^3 = 309.32 \text{ ppm}$$

Asimismo se obtiene la concentración de salida del contaminante del tratamiento I, despejando  $C_{sal}^i$  de la ecuación 6.3.1, como sigue:

$$C_{sal}^i = C_{ent}^i (1 - r^i) = 309.32(1 - 0.95) = 15.466 \text{ ppm}$$

Ya se tienen todos los datos necesarios para diseñar todo el sistema de tratamiento, como se describe en la figura XXVIII.

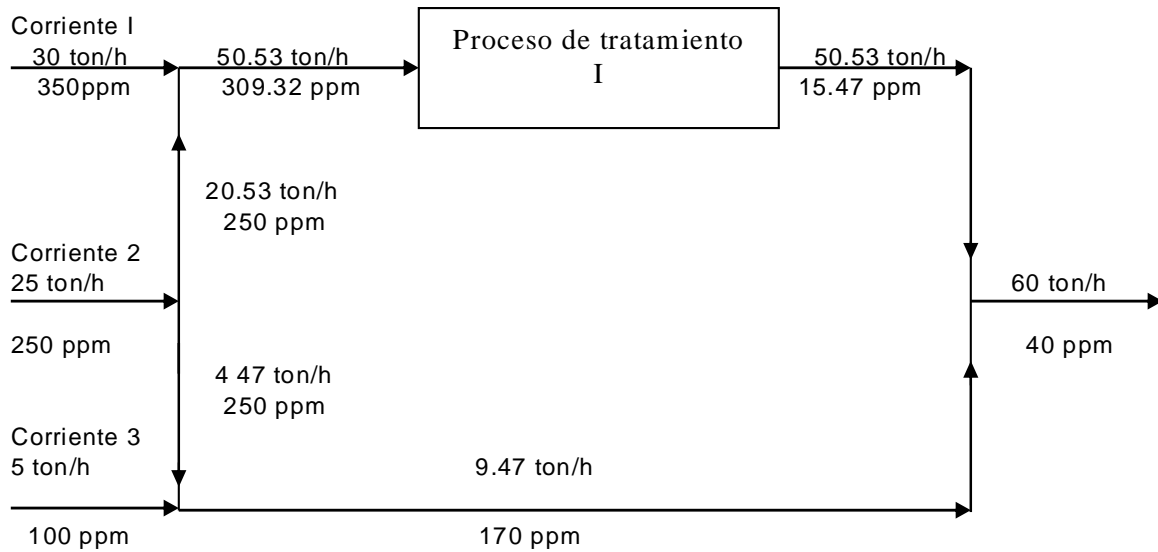


Figura XXVIII Diagrama de un sistema de tratamiento de efluentes para un contaminante y un proceso.

De lo anterior se concluye que el significado de flujo de tratamiento mínimo es: Cuando un proceso de tratamiento entrega una corriente de salida con una concentración menor a la requerida se puede disminuir el flujo que se haría pasar por dicho tratamiento. El flujo mínimo es entonces el flujo que entrando a un proceso saldría con una concentración tal que puede mezclarse con corrientes sin tratar para entregar la concentración de salida requerida.

#### 6.3.4.- CASO II: UN CONTAMINANTE, VARIOS PROCESOS.

Para un solo contaminante y varios procesos. El método anterior para encontrar el flujo mínimo, puede dejar de funcionar. Entonces, se usa un nivel medio de contaminante basado en las corrientes seleccionadas para el tratamiento en lugar de todas las corrientes contaminadas. De este modo es como se determinan correctamente los flujos de tratamiento mínimos como se explica a continuación.

Con el dato adicional, de que el proceso de tratamiento II es más barato que el proceso de tratamiento I, se alimentarán las corrientes contaminadas al proceso II, en primer lugar.

Entrando las tres corrientes (de manera distribuida) se puede calcular una concentración promedio de entrada al proceso de tratamiento II como sigue:

$$C_{ent}^{II} = \frac{(30)(350) + (25)(250) + (5)(100)}{60} = 287.5 \text{ ppm}$$

Y una concentración promedio de salida con relación de remoción del proceso II de:

$$C_{sal}^{II} = 287.5(1 - 0.5) = 143.75 \text{ ppm}$$

Como se tratan las 60 ton/h esto significa una carga másica extraída de:

$$\Delta m^{II} = \frac{60(287.5 - 143.75)}{1000} = 8.625 \text{ kg/h}$$

Estos datos se representan como una línea de tratamiento para el proceso de tratamiento II en la figura XXIX.

La carga másica de contaminante remanente de 6.225 kg/h será la carga másica a retirar por el proceso I, obtenida de la siguiente manera:

$$\Delta m^I = \Delta m_{tot} - \Delta m^{II} = 14.85 - 8.625 = 6.225 \text{ kg/h}$$

A continuación se calcula la carga másica que se retirara por el proceso I de la corriente más contaminada, que en este caso es la corriente I de 30 ton/h, después de haber pasado por el proceso de tratamiento II y es como sigue:

$$C_{I,sal}^{II} = 350(0.5) = 175 \text{ ppm}$$

$$C_{I,sal}^I = 175(1 - 0.95) = 8.75 \text{ ppm}$$

$$\Delta m_1^I = \frac{30(175 - 8.75)}{1000} = 4.9875 \text{ kg/h}$$

La carga másica de contaminante remanente de 1.2375 kg/h será la carga másica a retirar por el proceso I de las demás corrientes.

Suponiendo únicamente el procesamiento de la siguiente corriente más contaminada, o sea la corriente 2, se obtiene el flujo de la corriente 2 que será tratado en el proceso I como sigue:

$$C_{2,sal}^{II} = 250(0.5) = 125 \text{ ppm}$$

$$C_{2,sal}^I = 125(0.05) = 6.25 \text{ ppm}$$

$$f_2^I = \frac{1.2375}{(125 - 6.25)(1000)} = 10.42 \text{ ton/h}$$

Por tanto el flujo a tratar por los dos procesos de tratamiento es de:

$$30 \text{ ton/h} + 10.42 \text{ ton/h} = 40.42 \text{ ton/h}$$

Siendo la concentración de entrada al proceso II de:

$$C_{ent}^{II} = \frac{(30)(350) + (10.42)(250)}{40.42} = 324.22 \text{ ppm}$$

$$C_{sal}^{II} = C_{ent}^{II} = 324.22(1 - 0.5) = 162.11 \text{ ppm}$$

$$C_{sal}^I = 162.11(1 - 0.95) = 8.1055 \text{ ppm}$$

Estos datos se representan como una línea de tratamiento promedio para el proceso de tratamiento I en la figura XXIX

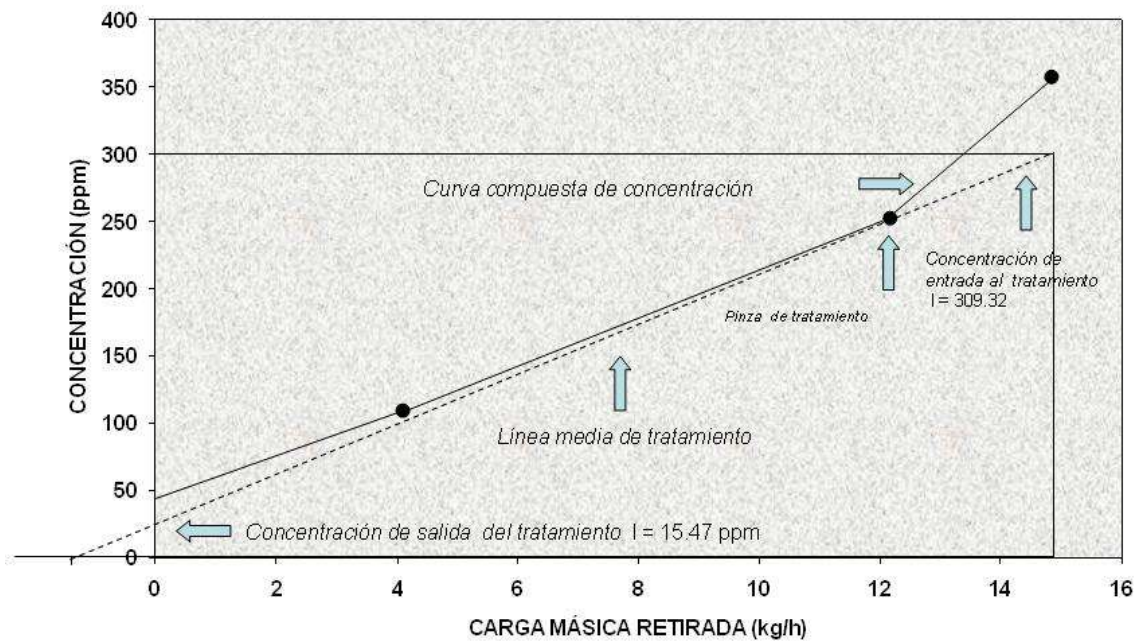


Figura XXIX Curva compuesta de concentración, caso II.

Ahora se puede sintetizar la red de tratamiento utilizando los dos procesos de tratamiento como lo muestra la figura XXX.

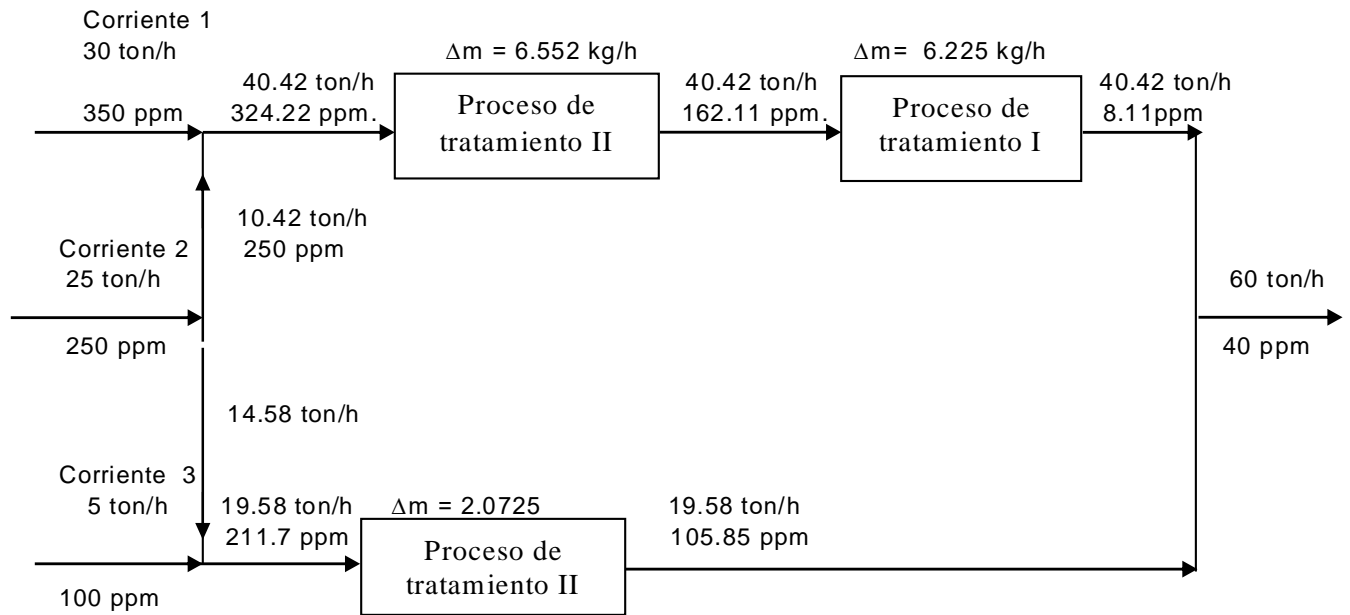


Figura XXX Diagrama del sistema de tratamiento de efluentes para un contaminante y varios procesos.

### 6.3.5.- CASO III: MÚLTIPLES CONTAMINANTES, VARIOS TRATAMIENTOS.

En el contexto del diseño de los sistemas distribuidos de tratamiento de efluentes se pueden dar las siguientes indicaciones:

- 1) Definida una relación de remoción,  $r^i$ , como:

$$r^i = \frac{C_{ent}^i - C_{sal}^i}{C_{ent}^i} \quad (6.3.1)$$

Donde  $i$  se refiere al proceso de tratamiento, entonces la concentración de salida ( si se conoce  $r^i$  ) es:

$$C_{j,sal}^i = C_{j,ent}^i (1 - r^i) \quad (6.3.1a)$$

Donde el subíndice  $j$  se refiere a la corriente  $j$ .

- 2) La corriente más contaminada se tiene que tratar en el proceso más económico. La menos contaminada en el proceso relativamente mas caro. También se puede decir como “ los procesos más económicos primero, al final los más caros”, o de cualquier otra manera equivalente.
- 3) Las corrientes de concentraciones superiores a las del punto de pliegue se tienen que tratar en su totalidad. Las otras corrientes con concentraciones menores a las del punto de pliegue pueden tener desviaciones o “bypasses”

(en el punto de pliegue mismo) o pueden simplemente no pasar por el tratamiento respectivo ( por debajo del punto de pliegue).

- 4) En ausencia de datos de costos de tratamiento y otros datos económicos se puede adoptar como criterio de diseño el flujo mínimo total de procesamiento, que es la suma de los flujos que entran a cada uno de los procesos de tratamiento.

### 5.3.6.- EJEMPLO (CASO III)

Como ejemplo con el que se explicarán las anteriores indicaciones y se desarrollarán los cálculos necesarios, se tomarán los siguientes datos:

Corriente $j$	$f_j$ ton/h	$C_{A,ent.}$ ppm	$C_{B,ent.}$ ppm
1	10	750	100
2	20	500	150
3	30	250	100

Tabla 8 Datos de las corrientes de aguas residuales.

Límites ambientales para las concentraciones de salida:  $C_A = 10$  ppm y  $C_B = 5$  ppm.

Proceso de tratamiento, $i$	$r_A^i$	$r_B^i$	Costo relativo
I	0.99	0.99	Alto
II	0.70	0.0	Bajo
III	0.0	0.95	Bajo

Tabla 9 Relaciones de remoción e indicaciones económicas.

Primero se construyen las curvas compuestas para cada contaminante partiendo de las respectivas tabulaciones (DIC).

Concentración ppm	Corriente 1 ( 10 ton/h)	Corriente 2 ( 20 ton/h)	Corriente 3 ( 30 ton/h )	Carga másica (kg./h)	Carga másica acumulada (kg./h)
10	↑				0.00
		↑		14.40	
250			↑		14.40
				7.50	
500					21.90
				2.50	
750					24.40

Tabla 10 DIC del contaminante A

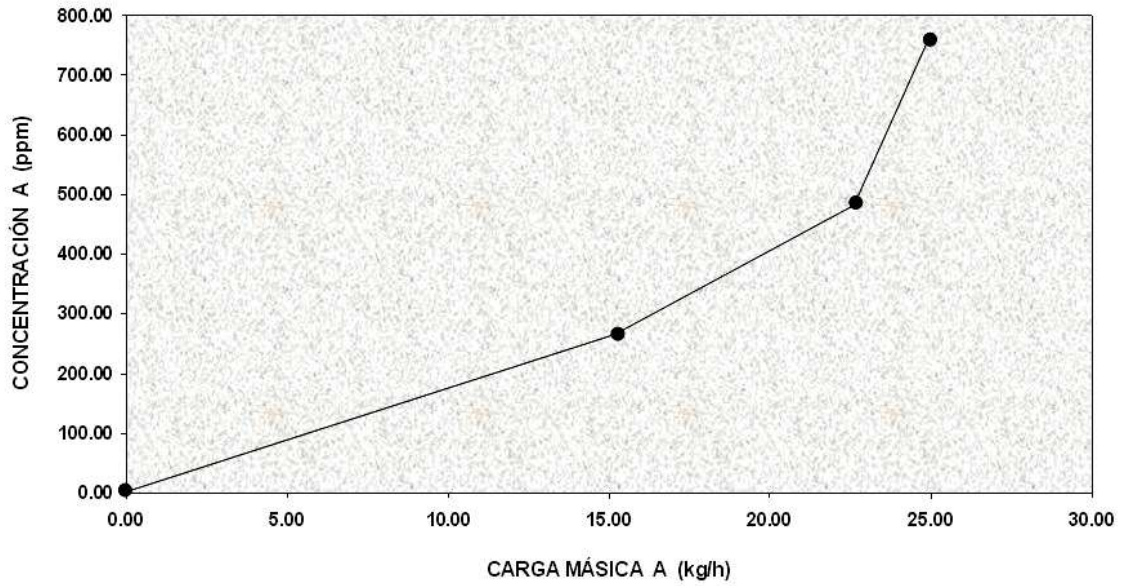


Figura XXXI Curva compuesta del contaminante A

Concentración <i>ppm</i>	Corriente 1 ( 10 ton/h )	Corriente 2 ( 20 ton/h )	Corriente 3 ( 30 ton/h )	Carga máscica (kg/h)	Carga máscica acumulada (kg/h)
5	↑	↑	↑		0.00
				5.7	
100					5.70
				1.00	
150					6.70

Tabla 11 DIC del contaminante B

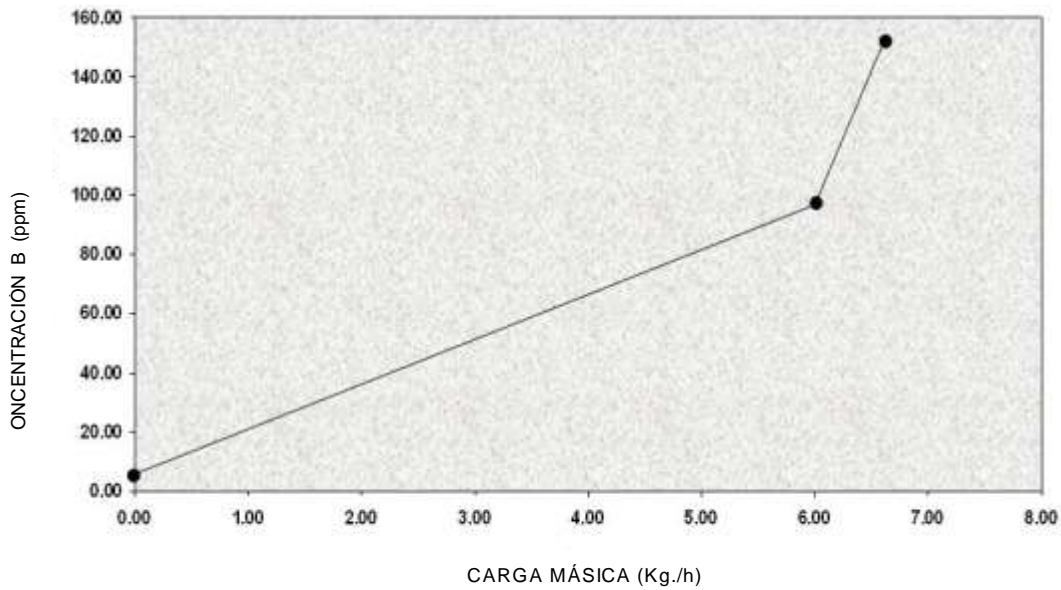


Figura XXXII Curva compuesta del contaminante B

Como lo indica la regla 2 el proceso de tratamiento II será el primero, se investigará su representación en el diagrama de la curva compuesta de concentración para el contaminante A. Entrando las tres corrientes (de manera distribuida ) se puede calcular la concentración promedio de entrada como sigue:

$$\frac{(10)(750) + (20)(500) + (30)(250)}{60} = 416.67 \text{ ppm A}$$

Y una concentración promedio de salida con la relación de remoción respectiva

$$\frac{(10)(225) + (20)(150) + (30)(75)}{60} = 125 \text{ ppm B}$$

Como se tratan las 60 ton/h esto significa una carga másica extraída de:

$$\frac{60(416.67 - 125)}{1000} = 17.5 \text{ kg/h}$$

Estos datos se representan como una línea media de tratamiento en la figura XXXIII.



figura XXXVI. Con esto las concentraciones de salida del proceso I son 2.25 ppm de A y 1.0 ppm de B por debajo de los límites ambientales. Pero no hay otra forma de disminuir a 10 y 5 ppm de A y B, respectivamente.

La corriente de 20 ton/h pasará al proceso de tratamiento II, después al III y después al I, con la desviación respectiva que mantenga tanto la carga másica del contaminante como los límites de concentración ambientales en la descarga del sistema (no de las corrientes individuales). Esto se ve en la figura XXXVI.

La corriente de 30 ton/h sale del tratamiento II con una concentración de 75 ppm de A, pero si se procesa primero en el tratamiento III llega a una concentración de B de 1.217 ppm y una concentración de A de 18.25 ppm figura XXXVI. Inviertiendo el orden (primero el tratamiento I y al final el tratamiento III) se llega a una concentración de 10 ppm de A y 0.6671 ppm de B. Esto último se muestra en la figura XXXVIII junto con una desviación o "bypass" para llegar solamente a 10 ppm de A en el tratamiento I.

Existen varias configuraciones que no rebasan los límites de 10 y 5 ppm como concentraciones de A y B, respectivamente como lo muestra la figura XXXVII. Lo importante es que la concentración de descarga del sistema de tratamiento de A sea 10 ppm y para B menor de 5 ppm figura XXXVIII y en ausencia de datos para un estudio económico completo se adopto el criterio de flujo mínimo total a procesar en todos los tratamientos.

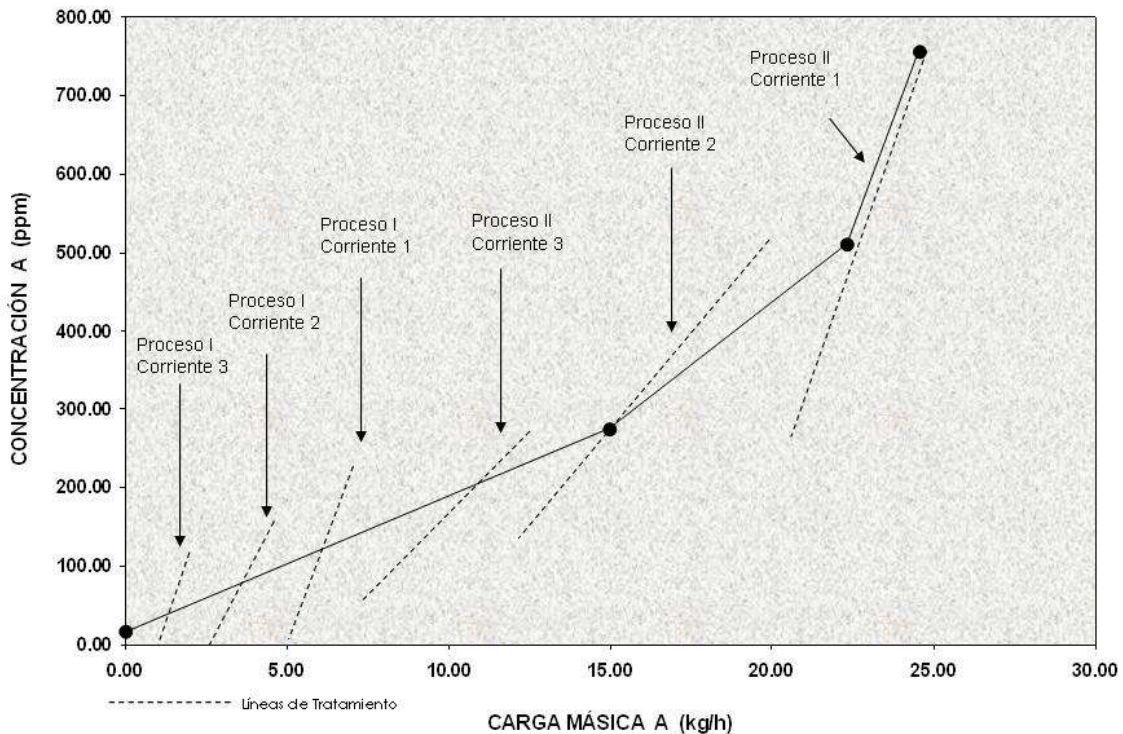


Figura XXXIV Curva compuesta de concentración para el contaminante A con líneas de tratamiento individuales para los procesos I y II.

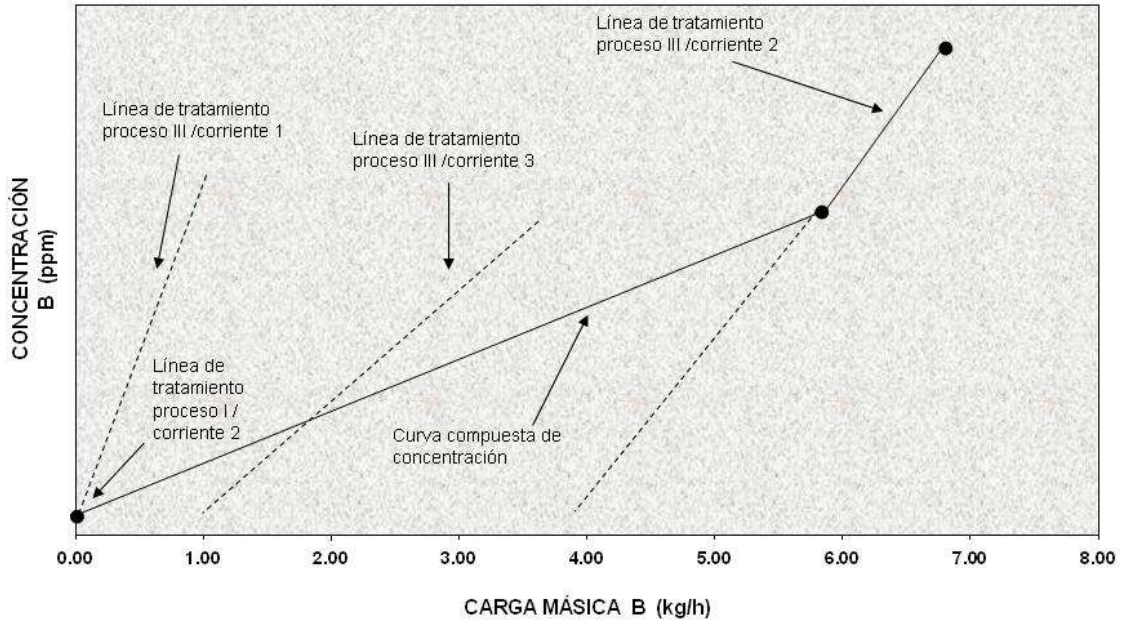
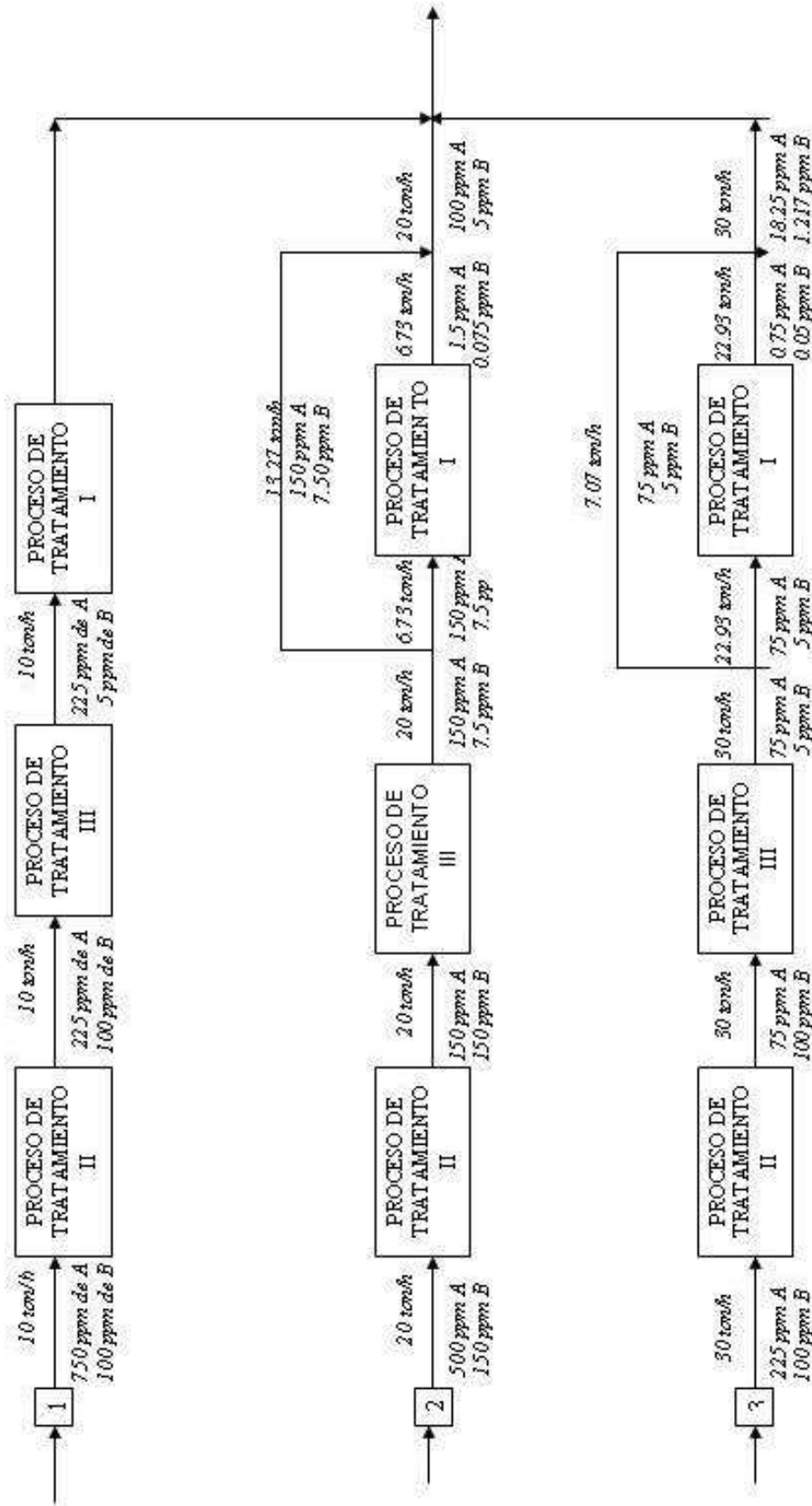
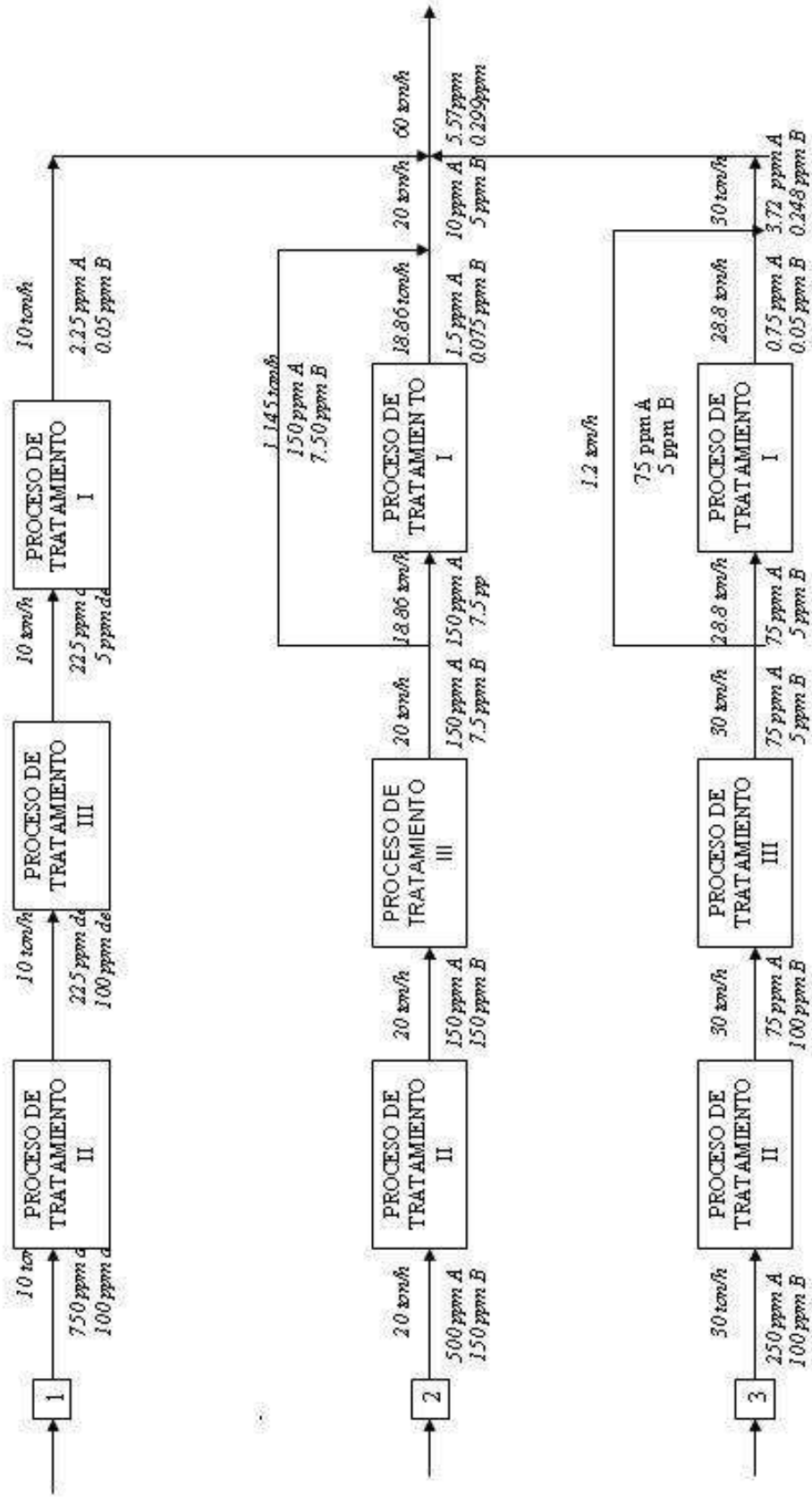


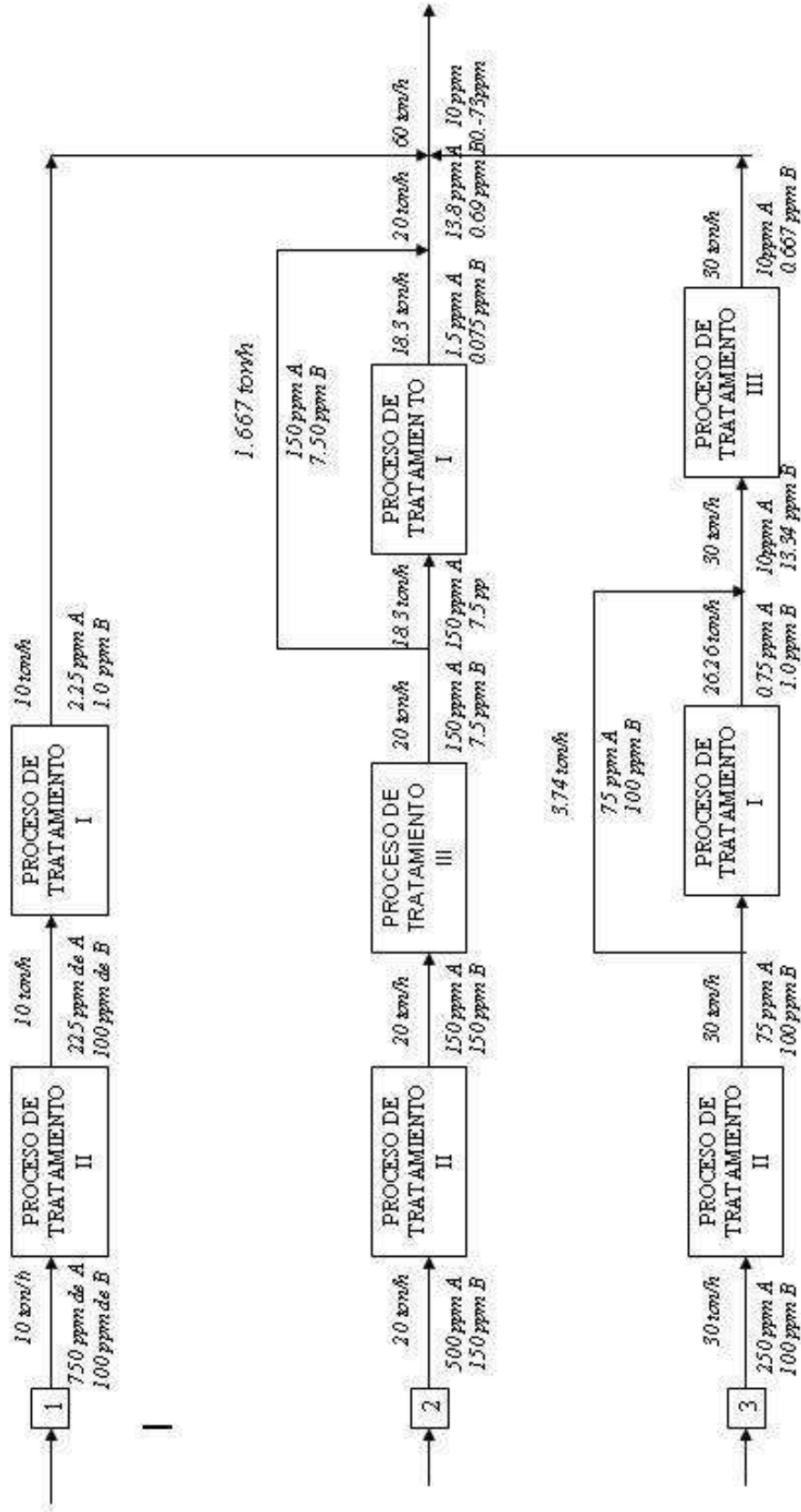
Figura XXXV Curva compuesta de concentración para el contaminante B con líneas de tratamiento individuales para los procesos I y II.



<XXVI Diagrama de un sistema de tratamiento de efluentes que no cumple con los límites ambientales de concentración con un flujo procesado de 159.66 ton/h



XXXVII Diagrama de un sistema de tratamiento de efluentes que si cumple con requisitos ambientales de concentración con un flujo total procesado de 177.655 ton/h.



XXXVIII Diagrama de un sistema de tratamiento de efluentes que si cumple con  
 ites ambientales de concentración con un fl ujo total procesado de 164.59 ton/h

## 6.4.- MINIMIZACIÓN DE EFLUENTES

El punto clave en la minimización de efluentes es que el sistema no requiere agua fresca por arriba de la concentración de pliegue o pinza de agua fresca. Entonces, el flujo mínimo de agua fresca con reuso corresponde al inverso de la pendiente de la línea de suministro de agua.

Hay varias maneras de minimizar los efluentes en las que destacan las siguientes:

- 1) **Reusando el agua contaminada:** Siempre que el nivel de contaminantes lo permita se puede pensar en otras operaciones de uso de agua para reducir tanto los volúmenes de agua fresca como contaminada pero dejando sin cambio la carga másica de contaminantes, ver figura XXXIX.
- 2) **Reusando los efluentes con contaminación (total o parcial):** La regeneración es cualquier operación que retira los contaminantes que impiden el reuso de agua, podría consistir en filtración, ajuste del pH, adsorción con carbón activado, y otros [5]. La regeneración reduce tanto los volúmenes de agua fresca como de agua contaminada, reduciendo la carga másica de contaminantes, ver figura XL.
- 3) **Regenerando y recirculando los efluentes:** El agua regenerada puede ser introducida a las operaciones de uso de agua en las que ya se ha usado agua previamente, ver figura XLI.

### 6.4.1 REUSO DE AGUA

El reuso de agua es un tipo especial de integración de proceso. Es decir, se puede tomar la terminología del análisis del punto de pliegue termodinámico, donde la integración energética tiene como objetivo el ahorro de energía. Aquí el objetivo es la minimización de consumo de agua fresca y los efluentes.

Reusar significa aprovechar la salida de agua de una operación como entrada a otra operación. Esto es posible siempre que el nivel de concentración de contaminante lo permita. Se puede recordar entonces el significado del término punto de pliegue o pinza: La concentración por arriba de la cual el sistema (o conjunto de operaciones de uso de agua) no requiere agua fresca. Por arriba de tal concentración se puede reusar otra corriente de agua. De este modo el flujo de agua será el flujo marcado en el punto de pliegue y nada más.

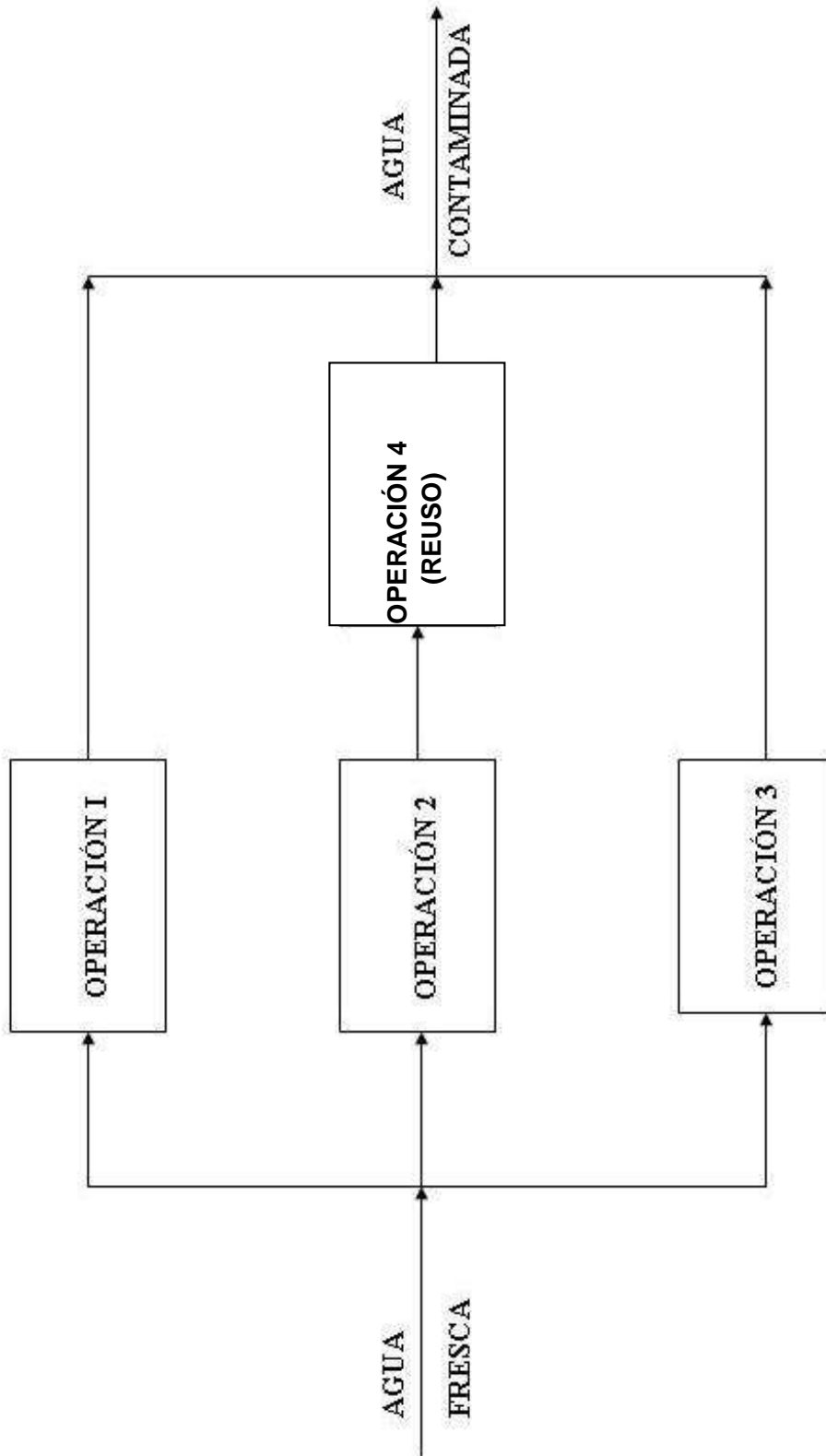


Figura XXXIX Reuso de agua

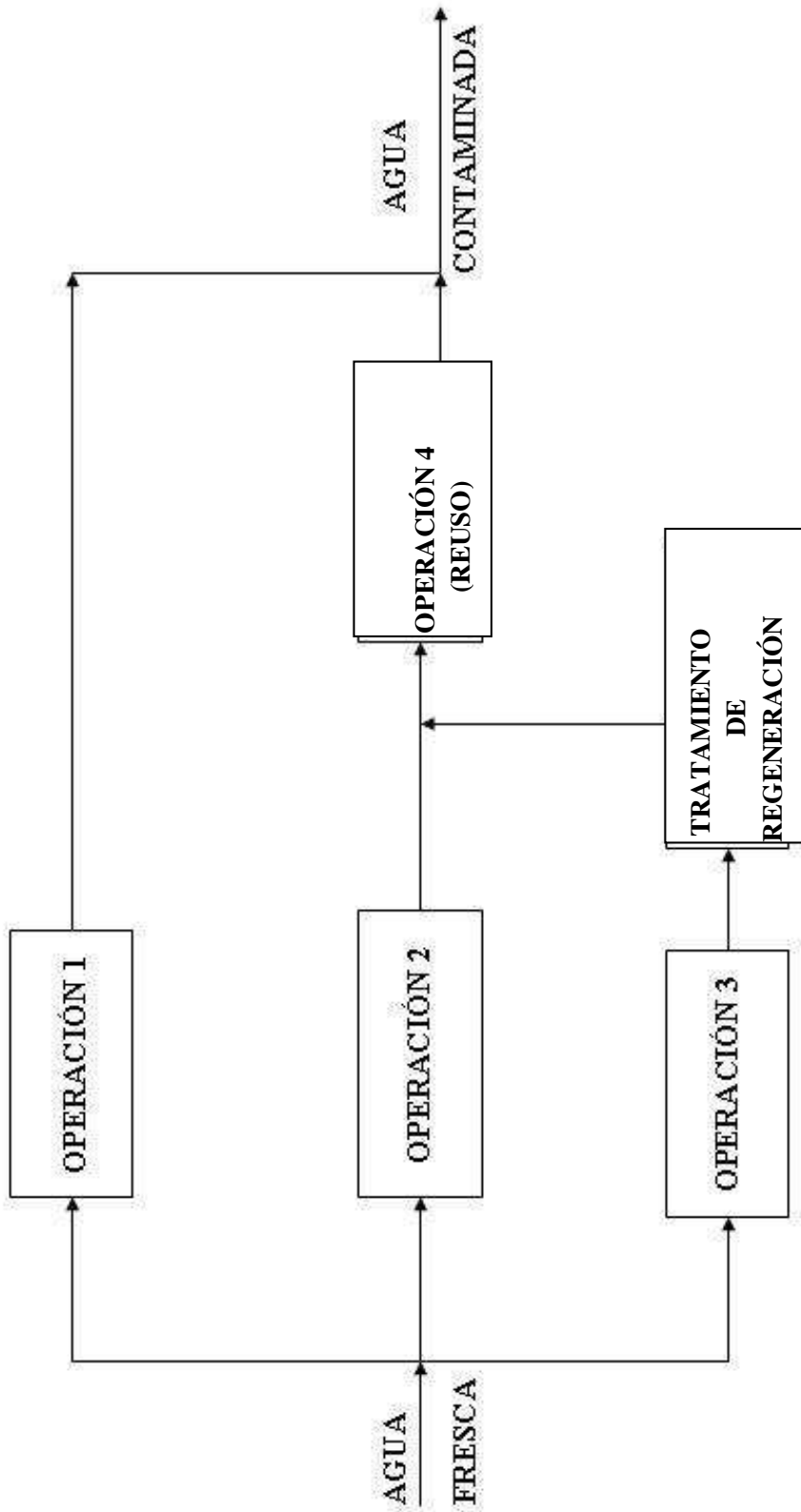
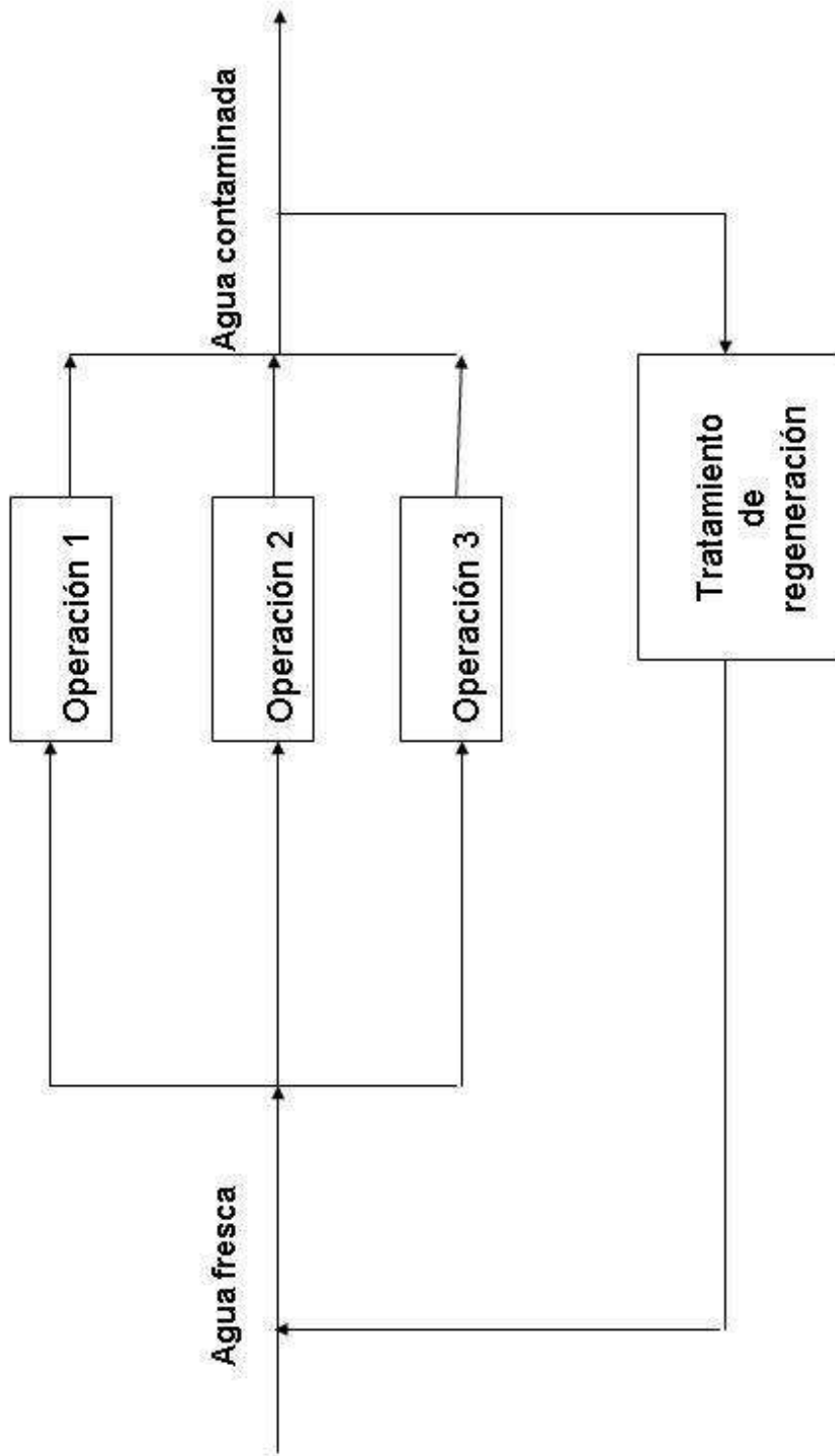


figura XL Reuso con regeneración



ra XLI Recirculación con regeneración

### 6.4.2 FLUJO MÍNIMO DE AGUA FRESCA CON REGENERACIÓN.

Las corrientes de efluentes pueden ser regeneradas total o parcialmente.

Tratándose de la regeneración total todas las corrientes entran a regeneración con una concentración  $C_{regen}$  y salen de la misma con una concentración  $C_0$  de contaminante.

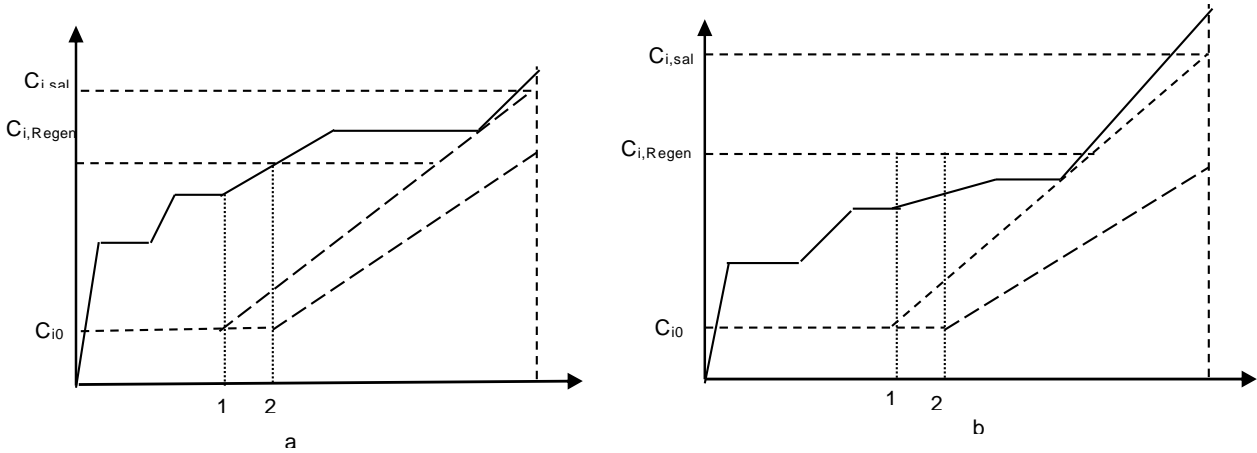


Figura XLII (a) y (b) Representación de las operaciones de uso de agua con regeneración total

En (a)  $C_{regen} < C_{pinza}$  y en (b)  $C_{regen} \geq C_{pinza}$ , en la figura XL.

En ambos casos se tiene que eliminar la fuerza impulsora del punto de pliegue moviendo el proceso de regeneración de la posición (2) a la (1) o hacia la izquierda de (1). Esto significa cambiar el flujo de agua fresca, pero también el flujo de agua a regenerar. Se puede demostrar que la concentración óptima para hacer la regeneración [1] es la concentración en la pinza, es decir,  $C_{regen} = C_{pinza}$ .

Cuando se regenera el flujo total alimentado de agua, la carga másica de contaminante retirado antes de la regeneración es:

$$\Delta m_{pinza} = f_{min}(C_{pinza} - 0) \quad (6.4.1)$$

La carga de contaminante transferido a la corriente regenerada, posterior a la regeneración es:

$$\Delta m_{pinza} - \Delta m_1 = f_{min}(C_{pinza} - C_0) \quad (6.4.2)$$

Combinando estas dos ecuaciones:

$$f_{\min} (\text{ton/h}) = \frac{\Delta m_{\text{pinza}} (\text{kg/h})}{[2C_{\text{pinza}} - C_0] (\text{ppm})} \times 10^3 \quad (6.4.3)$$

$$C_{\text{sal}} = C_{\text{pinza}} + \frac{\Delta m_{\text{tot}} - \Delta m_{\text{pinza}}}{f_{\min}} \times 10^3 \quad (6.4.4)$$

Por la condición enunciada en este caso,  $f_{\text{regen}} = f_{\min}$ .

En la regeneración parcial, el flujo de agua a regenerar,  $f_{\text{regen}}$  es menor que el flujo mínimo de agua fresca,  $f_{\min}$ . La regeneración parcial es aplicable a situaciones en las que, las líneas de agua fresca y de suministro de agua (compuesta) yacen por arriba de la curva compuesta de concentración en la región inferior a la concentración de salida de regeneración  $C_0$ .

Esta situación crea una violación a la fuerza impulsora, impidiendo la transferencia de contaminante desde la operación de uso de agua hacia la corriente de agua. Para rectificar esta situación se aumenta el flujo de agua fresca hasta igualar (o rebasar) al inverso de la pendiente de la curva de concentración compuesta en la región inferior a  $C_0$ .

En la regeneración parcial la transferencia de masa de contaminante es hecha entre los niveles de concentración  $C_0$  y  $C_{\text{pinza}}$  hacia la corriente a regenerar, no hacia el flujo total  $f_{\min}$ .

Con esto:

$$\Delta m_{\text{pinza}} - \Delta m_1 = f_{\text{regen}} (C_{\text{pinza}} - C_0) \quad (6.4.5)$$

Y

$$\Delta m_{\text{pinza}} = f_{\min} C_{\text{pinza}} + f_{\text{regen}} (C_{\text{pinza}} - C_0) \quad (6.4.6)$$

De donde:

$$f_{\text{regen}} = \frac{\Delta m_{\text{pinza}} - f_{\min} C_{\text{pinza}}}{C_{\text{pinza}} - C_0} \quad (6.4.7)$$

Con:

$$C_{\text{sal}} = C_{\text{pinza}} + \frac{\Delta m_{\text{tot}} - \Delta m_{\text{pinza}}}{f_{\min}} \quad (6.4.8)$$

### 6.4.3 RECIRCULACIÓN CON REGENERACIÓN.

Cuando se regresa una parte del flujo de salida de una operación de uso de agua para mezclarse en la alimentación a la misma son aplicables los balances de

masa y por lo tanto las relaciones que se dan a continuación utilizando la nomenclatura de la figura XLIII.

En realidad se puede tratar de dos casos: recirculación y regeneración; regeneración en la recirculación. Se analizara el primer caso.

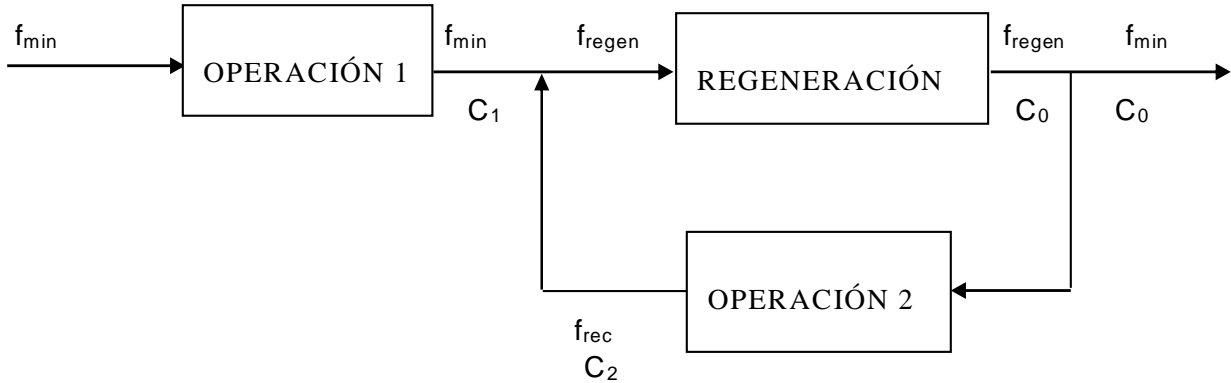


Figura XLIII Recirculación y regeneración.

$$f_{regen} C_{regen} = f_{min} C_1 + f_{rec} C_2 \quad (6.4.9)$$

$$f_{rec} = \frac{f_{regen} C_{regen} - f_{min} C_1}{C_2} \quad (6.4.10)$$

Con

$$f_{regen} = \frac{\Delta m_{pinza} - f_{min} C_{pinza}^*}{C_{pinza} - C_0} \quad (6.4.11)$$

$f_{min}$  se obtiene del diagrama de intervalos de concentración.

#### 6.4.4 FLUJO MÍNIMO DE AGUA FRESCA CON PÉRDIDAS Y GANANCIAS.

En la industria además de las operaciones en las que el requisito de agua es fijo, puede haber flujo de pérdidas (como en la evaporación de las torres de enfriamiento) o ganancias (como en los filtros) de agua. Para estos se adopta un método ligeramente diferente para el diseño de redes.

Se puede decir, de manera general, que siempre que se presente una pérdida de agua de una operación de uso de agua, esta pérdida da como resultado un aumento en el requisito de flujo mínimo de agua fresca, relacionando flujos, cargas y concentraciones, para pérdidas:

$$f_{p\acute{e}rdida} (ton/h) = \frac{\Delta m(kg/h)}{[C_{pinza} - C_{ent}] (ppm)} \times 10^3 \quad (6.4.12)$$

$$f (ton/h) = \frac{\Delta m(kg/h)}{[C_{pinza} - 0] (ppm)} \times 10^3 \quad (6.4.13)$$

Combinando estas dos ecuaciones:

$$f (ton/h) = f_{p\acute{e}rdida} \left[ \frac{C_{pinza} - C_{ent}}{C_{pinza}} \right] \quad (6.4.14)$$

Y para ganancias

$$f (ton/h) = f_{ganancia} (ton/h) \left[ \frac{C_{pinza} - C_{sal}}{C_{pinza}} \right] \quad (6.4.15)$$

#### 6.4.5 EJEMPLOS.

En la tabla 12 se dan los datos de proceso límite a partir de los cuales se dise nara una red de uso de agua con regeneración hasta un nivel de concentración de contaminante de 20 ppm.

Operación <i>i</i>	$f_i^{lim}$ ton/h	$C_{i,ent}^{lim}$ ppm	$C_{i,sal}^{lim}$ ppm	$\Delta m_{i,tot}$ kg/h
1	70	0	100	7
2	70	75	100	1.75
3	30	50	150	3

Tabla 12 Datos de proceso límite.

A partir de estos datos se construir  el DIC y la curva compuesta de concentración:

CONC. (ppm)	CORRIENTE 1	CORRIENTE 2	CORRIENTE 3	CARGA MÁSICA (kg/h)	CARGA MÁSICA ACUMULADA (kg/h)	FLUJO (ton/h)
0	↑ (70 ton/h)	(70 ton/h)	(30 ton/h)		0.00	0.00
				1.40		
20				2.10	1.40	70.00
			↑	2.50	3.50	70.00
50		↑		4.25	6.00	80.00
			↑	1.50	10.25	102.50
100					11.75	78.33
150						

Tabla 13 DIC incluyendo C<sub>o</sub>

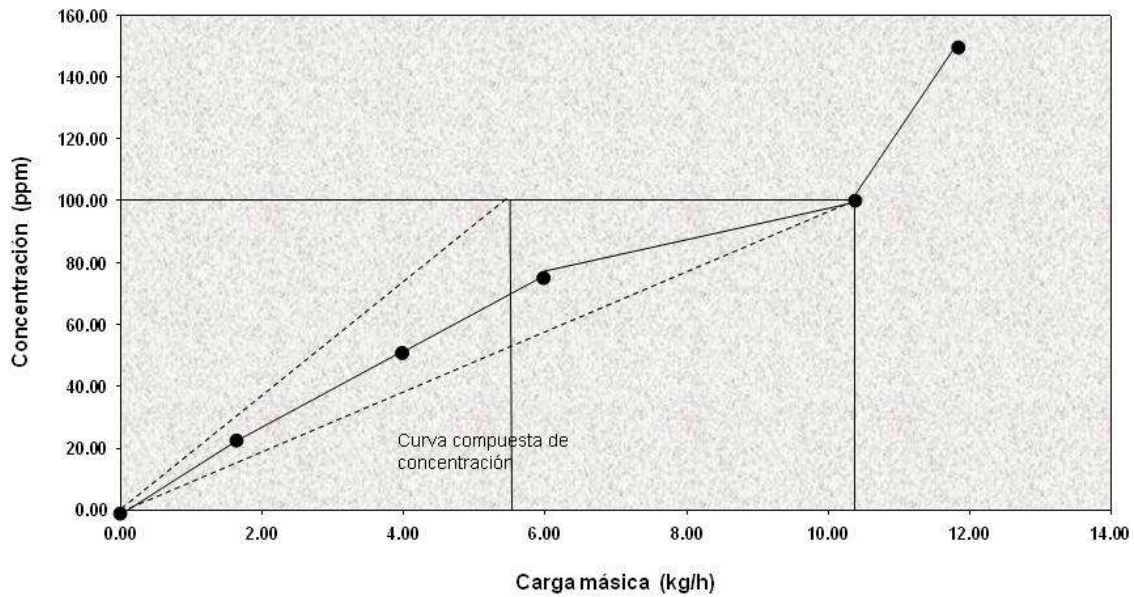


Figura XLIV Curva compuesta de concentración.

El punto de pliegue se encuentra en una concentración de 100 ppm y con una carga másica de 10.25 kg/h como lo muestra la figura XLIV.

La ecuación 6.4.3 da el flujo mínimo:

$$f_{\min} (\text{ton/h}) = \frac{10.25(\text{kg/h})}{[2(100) - 20](\text{ppm})} \times 10^3 = 56.94 \text{ ton/h}$$

Con la ecuación 6.4.4

$$C_{\text{sal}} = 100 + \frac{(11.75 - 10.25)}{56.94} \times 10^3 = 126.34 \text{ ppm}$$

En este caso :  $f_{\text{regen}} = f_{\min} = 56.94 \text{ ton/h}$

Porque se trata de regeneración total, pero como lo muestra la figura XLIV la línea que representa la corriente de agua fresca se encuentra por arriba de la curva compuesta de concentración en la región que se encuentra por debajo de  $C_o = 20 \text{ ppm}$ . El proceso de regeneración total crea entonces una violación a la transferencia de masa por lo cual se usará regeneración parcial. Usando la ecuación 6.4.7

$$f_{\text{regen}} = \frac{10.25 - \frac{(70)(100)}{10^3}}{100 - 20} \times 10^3 = 40.625 \text{ ton/h}$$

Nótese que se sustituyo  $f_{\min}$  como  $70 \text{ ton/h}$ , lo cual se deduce del DIC porque el flujo que corresponde a  $20 \text{ ppm}$  es precisamente de  $70 \text{ ton/h}$  ( que es mayor que  $56.94 \text{ ton/h}$ ) y usando la ecuación 6.4.8

$$C_{\text{sal}} = 100 + \frac{11.75 - 10.25}{70} \times 10^3 = 121.43 \text{ ppm}$$

$$f_{\text{no,regen}} = f_{\min} - f_{\text{regen}}$$

$$f_{\text{no,regen}} = 70 - 40.625 = 29.375 \text{ ton/h}$$

En la operación 2 se tiene que hacer el cambio de flujo de agua sin variar la carga másica:

$$\Delta m_{2,\text{tot}} = f_2 \frac{100 \text{ ppm} - 20 \text{ ppm}}{10^3}$$

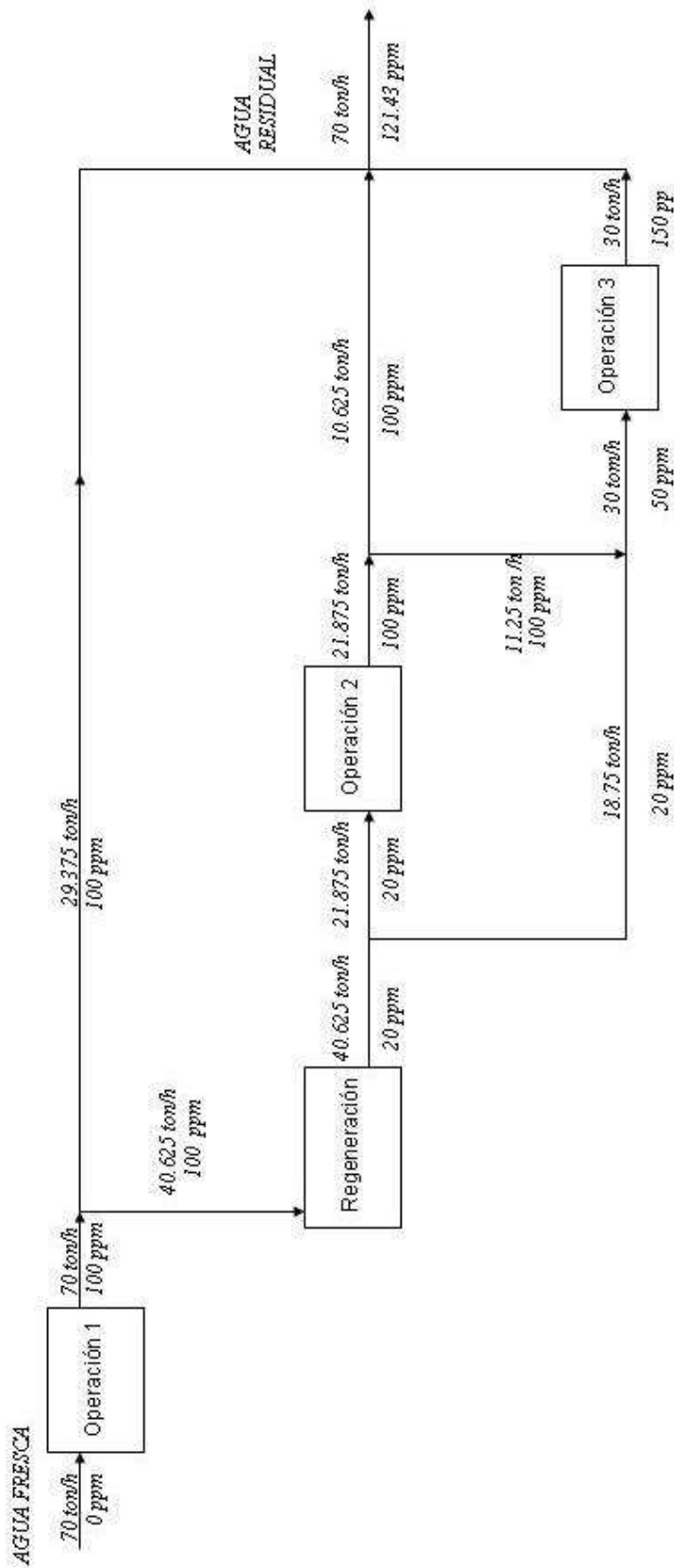
De donde:

$$f_2 = \frac{1.75(10^3)}{80} = 21.875 \text{ ton/h}$$

Esto implica desviar de la operación 2,  $(40.625 - 21.875) = 18.75 \text{ ton/h}$

Para la operación 3 no hay cambios ni en las composiciones ni en el flujo, si se mezclan  $18.75 \text{ ton/h}$  con  $11.25 \text{ ton/h}$  de la salida de la operación 2 con lo cual finalmente,  $(21.875 - 11.25) = 10.625 \text{ ton/h}$  se mezclarán con las salidas de las otras dos operaciones.

En la figura XLV se presenta la red final de distribución de uso de agua para este ejemplo.



a XLV Red final de distribución de uso de agua

Para concluir esta sección se presentará otro ejemplo, el de una planta química de especialidades, siendo el objetivo la minimización del consumo de agua fresca así como la minimización de efluentes de la misma, para lo cual se diseñaran varias redes de uso de agua. La restricción para el reuso de agua lo representa el contaminante que en este caso, son los sólidos suspendidos presentes en el agua.

La metodología propuesta enunciada en las secciones anteriores, inicia con los siguientes datos [ 1 ].

Operación <i>i</i>	$f_{i,ent}^{lim}$ ton/h	$f_{i,sal}^{lim}$ ton/h	$C_{i,ent}^{lim}$ ppm	$C_{i,sal}^{lim}$ ppm
Reactor / espesador	80	20	100	1000
Ciclón	50	50	200	700
Filtración	10	40	0	100
Generador de vapor	10	10	0	10
Sistemas de enfriamiento	15	5	10	100

Tabla 14 Datos de proceso de la planta química de especialidades

En primer lugar, se presenta el diagrama de flujo inicial de la planta de especialidades, figura XLVI, en el cual se señalan las entradas de agua fresca y las salidas de agua residual con su flujo y concentración de contaminante en *ppm* de sólidos suspendidos. Después, se procede a construir el DIC sin considerar las pérdidas y ganancias de agua en el proceso, esto permitirá ubicar el punto de pliegue aparente. A continuación se tomarán en cuenta las pérdidas y ganancias de agua para ubicar el punto de pliegue real, a partir del DIC sin cambios de flujo.

Con lo anterior se puede diseñar una red de uso de agua que tomará como criterio fundamental que la corriente de agua que va a alimentar al reactor tenga el mínimo mezclado con otras corrientes, figura XLIX. Después se modificará la red para incluir una recirculación, dado que la operación del ciclón permite usar una corriente de entrada de 200 *ppm* y el equipo esta diseñado para manejar 50 *ton/h*, figura XLIX. Finalmente, se presenta el diagrama de flujo modificado que contiene todos los cambios necesarios para minimizar el uso de agua fresca y la descarga de efluentes. figura L.

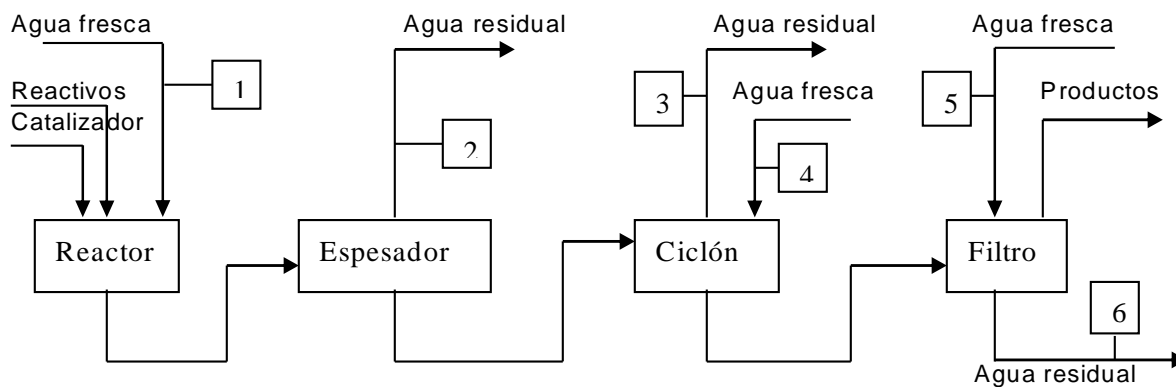


Figura XLVI Diagrama de flujo inicial de las operaciones de uso de agua de la planta química de especialidades, utiliza 140 *ton/h* de agua fresca y descarga 110 *ton/h* de aguas residuales.

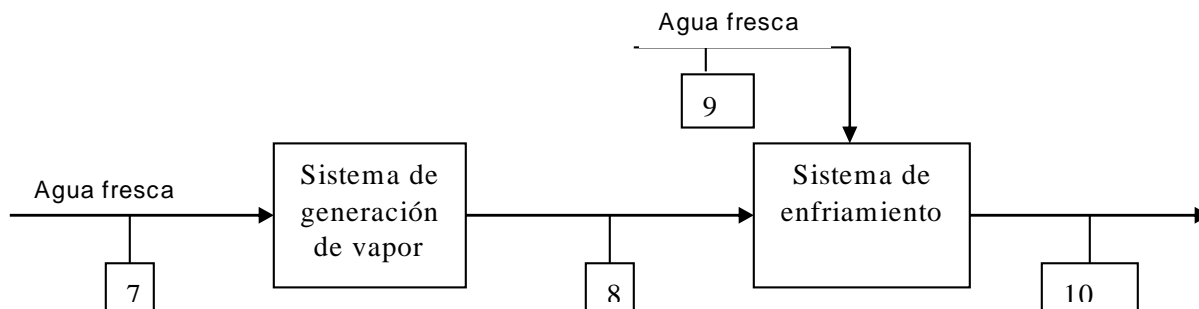


Figura XLVII Diagrama de flujo de los servicios de la planta química de especialidades.

CORRIENTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FLUJO Y COMP.										
<i>ppm</i>	100	1000	700	200	0	100	0	10	10	100
<i>ton/h</i>	80	20	50	50	10	40	10	10	5	5

Tabla 15 Resumen de las corrientes de las figuras XLVI y XLVII.

CONC.	REACTOR/ ESPESADOR	CICLÓN	FILTRACIÓN (a)	GEN. DE VAPOR	SIST. DE ENFTO.	CARGA MÁSICA	CARGA MÁSICA ACUMULADA	FLUJO MÍNIMO
(PPM)	20 ton/d	50 ton/d	10 ton/d	10 ton/d	5 ton/d	kg/d	kg/d	ton/d
0			↑	↑			0	0
						0.2		
10					↑		0.2	20
						1.35		
100	↑						1.55	15.6
						2		
200		↑					3.55	17.75
						35		
<b>700</b>							<b>38.55</b>	<b>55.07</b>
						6		
1000							44.55	44.55

Tabla 16 DIC de la planta de especialidades sin cambios de flujo.

Operación <i>i</i>	$f_{i,ent}^{lim}$ ton/h	$f_{i,sal}^{lim}$ ton/h	$C_{i,ent}^{lim}$ ppm	$C_{i,sal}^{lim}$ ppm
Reactor / espesador (a)	20	20	100	1000
Reactor / espesador (b)	60	-	100	-
Ciclón	50	50	200	700
Filtración (a)	10	10	0	100
Filtración (b)	-	30	-	100
Generador de vapor	10	10	0	10
Sistema de enfriamiento (a)	5	5	10	100
Sistema de enfriamiento (b)	10	-	10	-

Tabla 17 Datos de proceso modificados de la planta química de especialidades.

#### 5.4.6 CALCULOS DEL FLUJO MÍNIMO CON PERDIDAS Y GANANCIAS

Para el cálculo del flujo mínimo con pérdidas y ganancias se usará la ecuación [1]

$$\Delta m_j = \sum_{i=1}^{j-1} m_i = \sum_{i=1}^{j-1} f_i (C_{i+1}^* - C_i^*)$$

Primer intervalo:  $\Delta m_1 = 0$ ;  $f_{\min} = 0$

Segundo intervalo:

$$\Delta m_2 = f_1 (C_2 - C_1); C_1 = 0$$

$$f_1 = f_{\min}$$

$$f_{\min} = \frac{\Delta m_2}{C_2} = \frac{0.2}{10} \times 10^3 = 20 \Rightarrow f_{\min} = 20 \text{ ton/h}$$

Tercer intervalo:

$$\Delta m_3 = f_1 (C_2 - C_1) + f_2 (C_3 - C_2); f_1 = f_{\min}; f_2 = f_{\min} - 10$$

$$\Delta m_3 = f_{\min} C_3 - 10(C_3 - C_2)$$

$$f_{\min} = \frac{\Delta m_3 + \frac{10(90)}{10^3}}{C_3} \times 10^3 \Rightarrow f_{\min} = 24.5 \text{ ton/h}$$

Cuarto intervalo:

$$\Delta m_4 = f_1 (C_2 - C_1) + f_2 (C_3 - C_2) + f_3 (C_4 - C_3); f_1 = f_{\min}; f_2 = f_{\min} - 10; f_3 = f_{\min} - 10 - 60 + 30$$

$$\Rightarrow f_{\min} = 42.25 \text{ ton/h}$$

Quinto intervalo:

$$\Delta m_5 = f_1 (C_2 - C_1) + f_2 (C_3 - C_2) + f_3 (C_4 - C_3) + f_4 (C_5 - C_4);$$

$$\left. \begin{array}{l} 0 - C_1 \\ 10 - C_2 \end{array} \right\} f_1 = f_{\min}$$

$$\left. \begin{array}{l} 10 - C_2 \\ 100 - C_3 \end{array} \right\} f_2 = f_{\min} - 10$$

$$\left. \begin{array}{l} 100 - C_3 \\ 200 - C_4 \end{array} \right\} f_3 = f_{\min} - 10 - 60 + 30$$

$$\left. \begin{array}{l} 200 - C_4 \\ 700 - C_5 \end{array} \right\} f_4 = f_{\min} - 10 - 60 + 30$$

$$\Delta m_5 = f_1(C_2 - C_1) + f_2(C_3 - C_2) + f_3(C_4 - C_3) + f_4(C_5 - C_4) = f_{\min}(C_2 - C_1) + (f_{\min} - 10)(C_3 - C_2) + (f_{\min} - 10 - 60 + 30)(C_4 - C_3) + (f_{\min} - 10 - 60 + 30)(C_5 - C_4)$$

$$\Rightarrow f_{\min} = 90.64 \text{ ton/h}$$

Sexto intervalo:

$$\Delta m_6 = f_1(C_2 - C_1) + f_2(C_3 - C_2) + f_3(C_4 - C_3) + f_4(C_5 - C_4) + f_5(C_6 - C_5)$$

$$f_1 = f_{\min}$$

$$f_2 = f_{\min} - 10$$

$$f_3 = f_{\min} - 10 - 60 + 30$$

$$f_4 = f_{\min} - 10 - 60 + 30$$

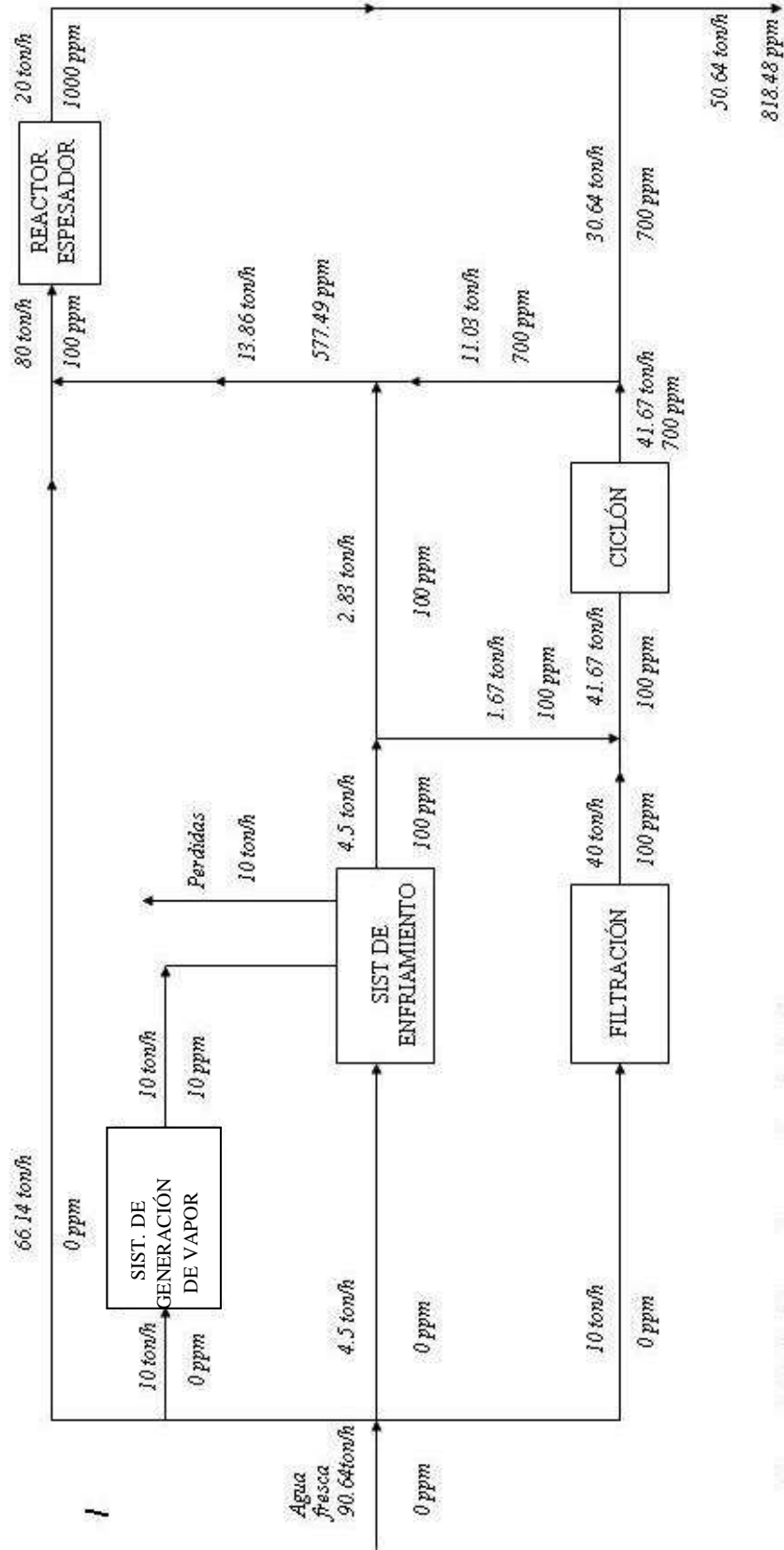
$$\left. \begin{array}{l} 700 - C_4 \\ 1000 - C_5 \end{array} \right\} f_5 = f_{\min} - 10 - 60 + 30$$

$$\Delta m_6 = f_1(C_2 - C_1) + f_2(C_3 - C_2) + f_3(C_4 - C_3) + f_4(C_5 - C_4) + f_5(C_6 - C_5) = f_{\min}(C_2 - C_1) + (f_{\min} - 10)(C_3 - C_2) + (f_{\min} - 10 - 60 + 30)(C_4 - C_3) + (f_{\min} - 10 - 60 + 30)(C_5 - C_4) + (f_{\min} - 10 - 60 + 30)(C_6 - C_5)$$

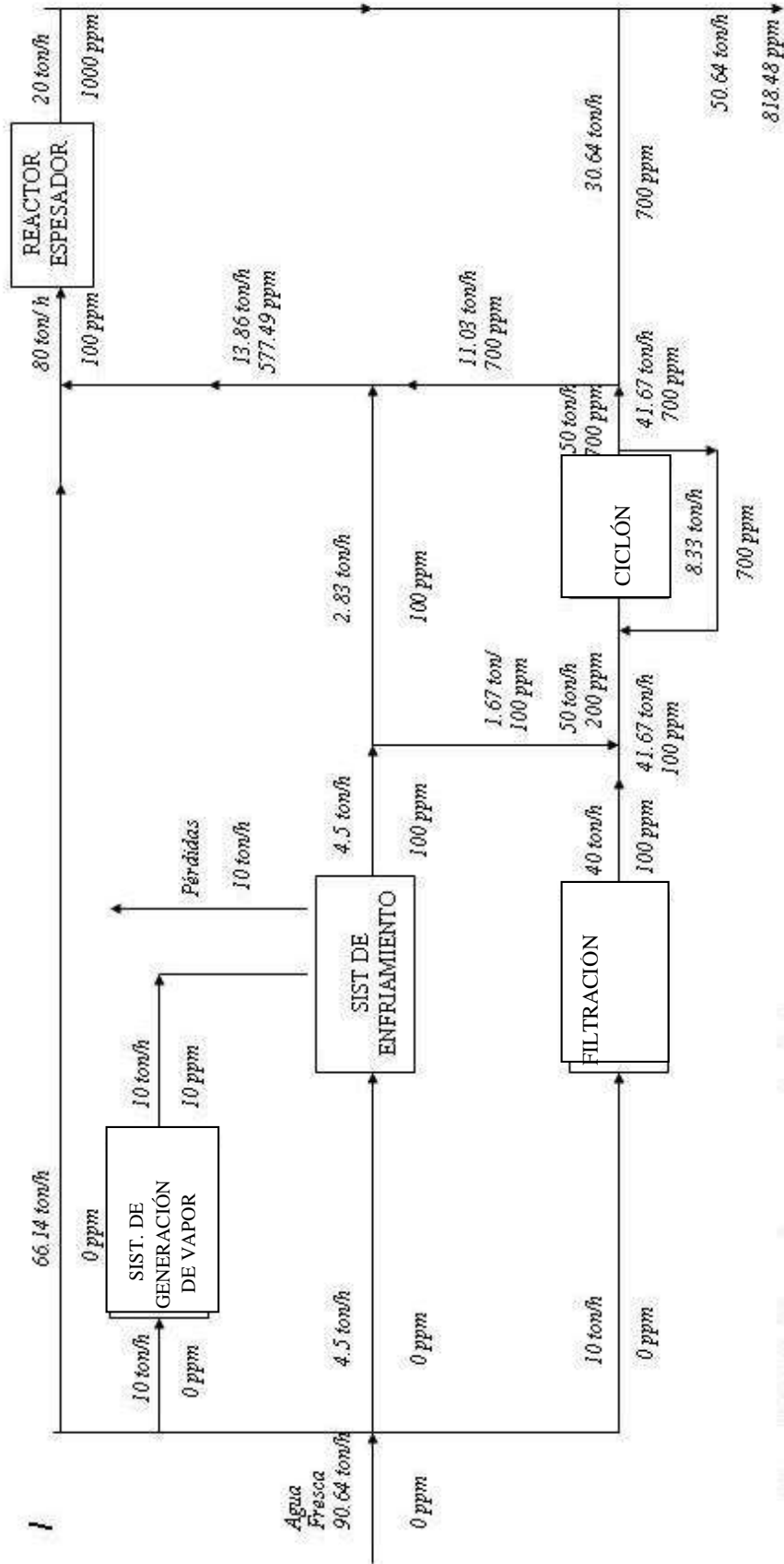
$$\Rightarrow f_{\min} = 81.45 \text{ ton/h}$$

INTERV. DE CONC.	CONC. ppm	REACTOR ESFESADOR	CICLON	FILTRACIÓN (e)	GEN. DE VAPOR	SIST. DE ENFTO.	CARGA MÁSICA	CARGA MÁSICA ACUMULADA	FLUJO MÍNIMO SIN CAMBIOS	FLUJO MÍNIMO CON PERDIDAS Y GANANCIAS
j		20 ton/h	50 ton/h	10 ton/h	10 ton/h	5 ton/h	kg/d	kg/d	ton/d	ton/d
1	0				↑		0	0	0	0
2	10			↑	↑	↑	0.2	0.2	20	20
3	100	↑		↑		↑	1.35	1.55	15.5	24.5
4	200		↑				3.5	3.55	17.75	42.25
5	700						6	38.55	55.07	90.64
6	1000							44.55	44.55	81.45

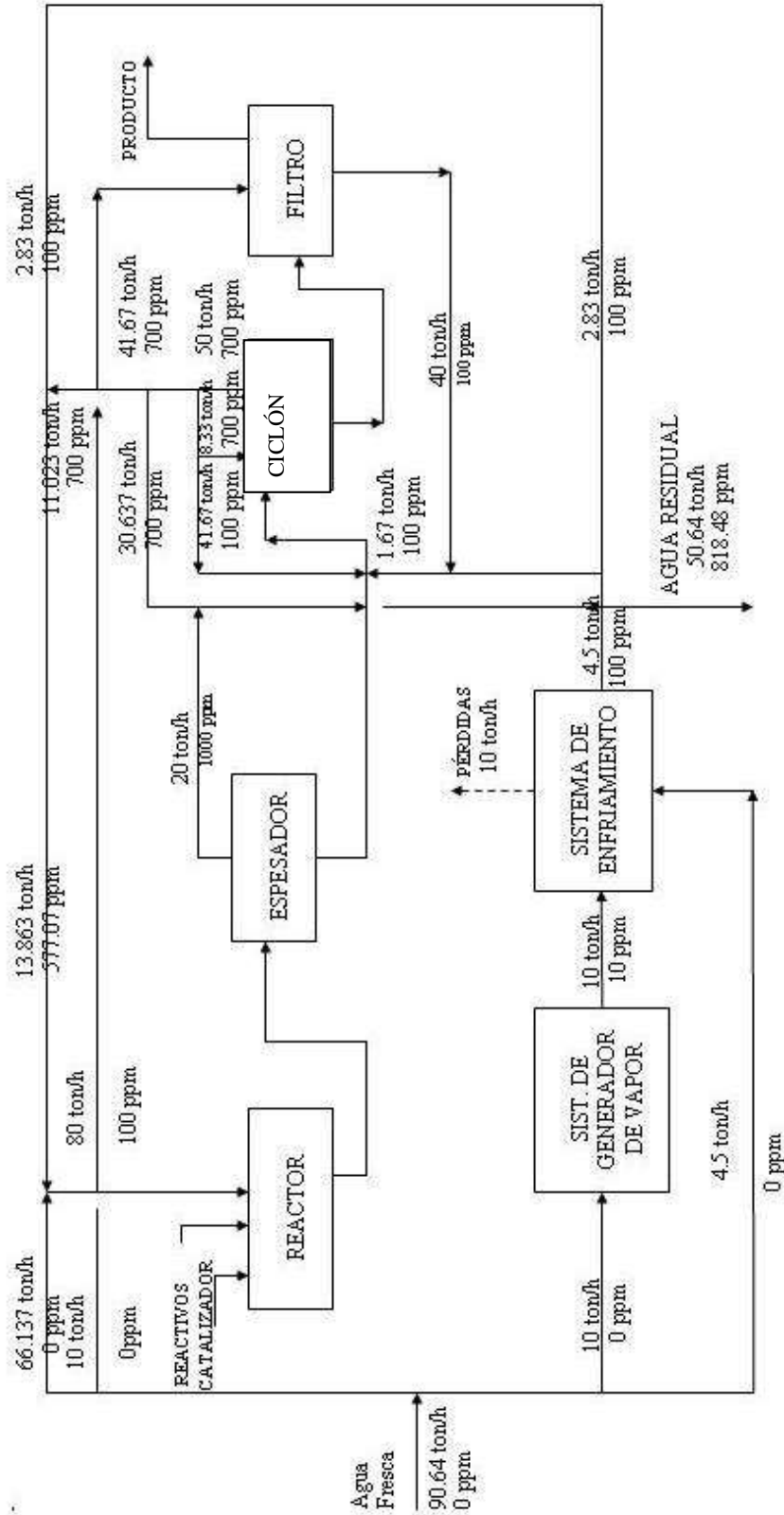
8 DIC de la planta de especialidades con pérdidas y ganancias de agua.



a XLVIII Red de uso de agua sin recirculación



a XLIX Red de uso de agua con recirculación



L Diagrama de flujo modificado de la planta de especialidades

VII.- RESULTADOS:

- ❖ **Generador de vapor:** Se aprovecha la mitad de la corriente de condensado como alimentación al generador de vapor. Esto es posible porque existe un sistema de tubería que puede manejar 60 *ton/d*, solamente.
- ❖ **Torre de enfriamiento A:** Se toman 195 *ton/d* de la purga del generador de vapor como alimentación a la torre de enfriamiento A. También, se usan las 42 toneladas de la corriente de agua de lavado. El parámetro de conductividad (tabla 7.4) muestra que es posible.
- ❖ **Torre de enfriamiento B:** Respetando las pérdidas, se usa la purga de esta torre de enfriamiento A como alimentación a esta torre. Es posible porque existe la tubería que conecta a las dos torres.
- ❖ **Filtros:** Se aprovecha la corriente de purga de la torre de enfriamiento B para alimentar a los filtros. La tabla 7.2 muestra que es posible ya que en cuanto a sólidos suspendidos la purga contiene 5.6 *ppm* menor a 7.3 *ppm* que usa el agua de los filtros. Aún así se sugiere la instalación de un filtro en línea para eliminar cierta cantidad de sólidos suspendidos. Es necesario instalar además tuberías y válvulas de control.

a).- Identificación taxonómica de Plantas Acuáticas.

Las plantas anfibas que colonizan la zona de transición entre el agua y la tierra firme están provistas de un aparato radical suplementario y de un tallo rígido y elástico, resistente a la acción del viento; las especies flotantes disponen a menudo de hojas con estomas únicamente en la cara inferior y en el interior de los tejidos aparecen grandes vasos aeríferos con la doble misión de reducir el peso específico de la planta para lograr su flotación y de asegurar a la vez un constante aprovisionamiento de oxígeno. En las especies sumergidas, el aparato radical suele estar ausente, las hojas están divididas en lacinias delgadas o bien en cintas alargadas capaces de seguir la dirección de la corriente. En estas plantas, las flores y los frutos se desarrollan incluso normalmente en el seno del agua.

Entre las distintas plantas que pueblan las aguas dulces se encuentran representantes de musgos, helechos y fanerógamas, tanto monocotiledóneas como dicotiledóneas.

Por ejemplo, dentro de los Pteridofitos o criptógamas vasculares, se encuentra un pequeño helecho bastante interesante, (*Azolla filiculoides*), de la familia Azoláceas, género importado de América del sur, que se ha naturalizado en los ríos y estanques de Europa, cubriendo por completo la superficie del agua, especialmente en las zonas de clima templado. Posee abundantes folíolos de pequeño tamaño que se disponen a lo largo del tallo en posición alterna, divididos en dos lóbulos de igual tamaño, de los que el superior, que emerge, es más consistente y de intenso color verde; en cambio, el inferior, que permanece sumergido, es delgado y carece de cloroplastos.



Figura LI Muestra de plantas acuáticas encontradas en el fondo de los basines.



Figura LII Plantas acuáticas encontradas en el fondo de los basines.

En el interior del lóbulo superior viven algas unicelulares cuya función todavía no ha sido del todo dilucidada. Sin embargo, parece constituir un interesante caso de simbiosis.

b).- Origen de las semillas de las plantas acuáticas.

Entre las distintas monocotiledóneas acuáticas, la familia Lemnáceas es muy conocida y abundante; a ella pertenece la denominada lenteja de agua (*Lemna minor*), una especie muy común provista de pequeñas hojas laminares que flotan en la superficie del agua estancada, de modo que la cubren con una especie de manto continuo de color verde que absorbe todas las radiaciones solares e impide el desarrollo de cualquier otra especie vegetal. A la misma familia pertenece *Wolffia arrhiza*, la fanerógama de menor tamaño de todas las conocidas, ya que solo alcanza un milímetro de longitud y carece de sistema radical.

A la familia Potamogetonáceas pertenecen especies muy comunes, tanto de agua dulce como de agua de mar, por ejemplo *Potamogeton natans*, frecuente en verano en charcas y estanques.

La elodea del Canadá (*Elodea canadensis*) pertenece a la familia Hydrocaritáceas; es originaria del continente americano e invade rápidamente las aguas estancadas.

En el clima mediterráneo son muy comunes las Tifáceas, otra familia de monocotiledóneas, a la que pertenece la enea (*Typha latifolia*) que medra en las aguas de embalses, estanques, ríos y lagos. Posee un rizoma articulado y hojas que alcanzan 1.50 m. de longitud y menos de 0.5 m de anchura. En el ápice del tallo, desnudo y recto, se dispone la inflorescencia, un típico tirso formado por numerosísimas flores de color pardo oscuro, con pelosidad. En la parte superior del tirso se sitúan las flores masculinas, mientras que las femeninas lo hacen en la porción inferior. La especie citada anteriormente a menudo mezclada con *Typha angustifolia*, que se distingue porque entre las flores masculinas y femeninas se dispone un espacio estéril fácilmente reconocible.

Las Ciperáceas, a la que pertenece el género *Carex*, frecuentemente en lugares húmedos y fríos; se conocen unas 900 especies repartidas en todo el mundo. Otra especie es el célebre papiro (*Cyperus papyrus*), que vive en regiones de clima cálido, en los estanques y en las orillas de los ríos y lagos. Crece espontáneo en algunas zonas del mediterráneo, pero su máximo desarrollo se da a lo largo del río Nilo. A partir del rizoma subterráneo, carnoso y rico en almidón hasta el punto que se utiliza en alimentación, germinan anualmente numerosos tallos terminados en una inflorescencia en umbela. A partir de esta especie se obtenía el papel para escribir cortando la médula del tallo en trozos de un metro de longitud aproximadamente.

A las Aráceas pertenece el ácoro verdadero (*Acorus calamos*), frecuentemente en las zonas húmedas de Europa. Posee un rizoma rastrero, ramificada, que contiene una sustancia amarga y un aceite esencial de olor fuerte y agradable, utilizado como aromático en la preparación de licores, perfumes y medicamentos.

También las gramíneas comprenden algunas especies acuáticas, el carrizo (*Phragmites communis*) una de las especies que mayor desarrollo alcanzan en las aguas quietas de los lagos y a lo largo de los ríos. Posee un grueso rizoma, y anualmente producen un tallo de dos a cinco metros de altura. Las hojas son largas y anchas; las flores se reúnen en tirsos amplios y densos, y suelen ser de color amarillo y violáceo, junto con ellas surgen largos pelos.

Entre las dicotiledóneas acuáticas se sitúan las Ninfáceas, capaces de embellecer cualquier extensión de agua dada la calidad de sus flores flotantes. En climas templados existen escasos representantes de la familia. Sin embargo, en las zonas ecuatoriales viven ejemplares famosos por la forma, color y dimensiones de las flores. El nenúfar blanco (*Nymphaea alba*) se encuentra en toda Europa. posee un rizoma carnoso, largo y rastrero que produce hojas circulares de unos 10-30 cm. de diámetro, de consistencia blanda y carnosa, provistas de un largo pecíolo que les permite florar a flor de agua. Las flores también emergen del agua gracias a que poseen largos pedúnculos aislados; son flores grandes blancas, amarillas en la zona central y perfumadas. Los pedúnculos y los pecíolos poseen abundantes cavidades aeríferas que facilitan la flotación. Crece junto con el nenúfar amarillo (*Nuphar luteum*), de hojas parecidas pero de flores más pequeñas y de color amarillo. En ambas especies la floración tiene lugar entre abril y agosto.

En las regiones cálidas de Asia, en Japón y Oceanía vive de forma espontánea el denominado Loto sagrado (*Nelumbo nucifera*), de flores grandes y tonalidad rosada. En Egipto crece el Loto blanco (*Nymphaea lotus*), que abre sus flores al atardecer, y el Loto azul (*Nymphaea caerulea*), que florece por la mañana. Entre

las Ninfáceas, una especie muy notable es *Victoria regia*, Posee hojas de un diámetro próximo a dos metros, con los bordes levantados, Lo que hace que tenga el aspecto de enormes bandejas de color verde. grandes nerviaciones de color rojizo recorren la página inferior de la hoja y el pecíolo es muy espinoso. Las flores son al principio de color blanco, adoptando posteriormente tonalidades rosadas y purpúreas; poseen cuatro sépalos, y cerca de un centenar de elementos entre pétalos y estambres. Las semillas son utilizadas por los indígenas como alimento.

El ranúnculo acuático (*Ranunculus aquaticus*), de la familia Ranunculáceas, abunda en Europa, en todo tipo de charcas y lagos; ésta especie puede ser considerada como uno de los ejemplos que mejor ponen de manifiesto las adaptaciones morfológicas y fisiológicas para la vida en el medio acuático. Crece en agua poco profundas y quietas, con las hojas completamente sumergidas, divididas en lacinias dispuestas en arco. La epidermis está muy engrosada a fin de disminuir al máximo la transpiración. En las aguas de curso lento se encuentran ejemplares con hijas sumergidas divididas en lacinias y dispuestas a modo de abanico. En aguas profundas, posee únicamente hojas sumergidas muy divididas y largas, a menudo retorcidas, y flores que se desarrollan por encima de la película de agua. En lugares de corriente impetuosa, las hojas adoptan la morfología de cordones resistentes que siguen el curso del agua, mientras que las flores y frutos se desarrollan sumergidos.



enfriamiento, favorece el desarrollo de las plantas acuáticas.

La luz es esencial para el crecimiento de las algas, por lo que solamente ocurre en aquellas partes expuestas a la luz solar y se encuentran permanente mojadas.

Las algas producen la mayoría de los nutrientes requeridos por las bacterias y hongos.

Los organismos vivos están presentes en todas las fuentes naturales del agua. El ensuciamiento biológico en los sistemas de enfriamiento, es el resultado del

crecimiento y desarrollo excesivo de los microorganismos debido a la temperatura del agua y a la presencia de oxígeno además de otros nutrientes.

d).- Recomendaciones pertinentes para evitar el desarrollo de las plantas acuáticas dentro de los bacines de las torres de enfriamiento.

Los biocidas ayudan a controlar la proliferación de bacterias, hongos y algas en las torres de enfriamiento, mediante diversos mecanismos de interferencia con los procesos vitales de la célula.

El crecimiento microbiológico se controla mediante la adición de biocida de dos tipos: biocida oxidante y biocida no oxidante.

Los biodispersantes propician la eliminación paulatina de la biomasa, mejorando las condiciones de limpieza de las superficies en los sistemas de enfriamiento. Este efecto de remoción permite el ahorro y la optimización de los biocidas,



Figura LIV Plantas del género *Echinodorus*, desarrollándose en un cuerpo de agua de agua temporal



Figura LV Plantas del género *Echinodorus*, desarrollándose en un cuerpo de agua de agua temporal



Figura LVI Plantas del género *Echinodorus*, desarrollándose en un cuerpo de agua de agua temporal



Figura LVII Vista de las torres de enfriamiento.

### VIII.-DISCUSIÓN

- 1) En este trabajo se ha demostrado la eficacia de la metodología propuesta para la aplicación de la tecnología del punto de pliegue al ahorro en el consumo de agua en una planta química. Asimismo, se ha desarrollado el diseño básico de sistemas distribuidos de tratamiento de efluentes.
- 2) Se ha revisado cuidadosamente la tecnología del punto de pliegue, se han expuesto los fundamentos de la misma y se considera haber aportado claridad a los métodos de cálculo siendo directos y explícitos en los mismos.
- 3) Cuando se trata de diseñar y/o evaluar económicamente una red de uso de agua, la tecnología del punto de pliegue coadyuva a la experiencia de los ingenieros y operadores identificando los objetivos o metas de flujos mínimos y las oportunidades de reuso de agua.
- 4) La tecnología del punto de pliegue representa un desarrollo significativo ambientalmente hablando en un área de diseño de la ingeniería conocida como integración de procesos, en el cual se examina el sistema que involucra a todas las operaciones de uso de agua de una planta química.
- 5) De modo que, la metodología aquí presentada, contribuye al cuidado del medio ambiente, al disminuir el consumo de agua y al mejorar la calidad de los efluentes generados en la industria.
- 6) Por todo lo anterior, la tecnología del punto de pliegue aplicada a la minimización del consumo de agua y de efluentes ha venido a constituir una parte fundamental en la formación de los ingenieros de proceso, de los ingenieros químicos y de los profesionales relacionados con la industria química, consecuentemente, se recomienda incluir en su actualización la tecnología del punto de pliegue aplicada al consumo de agua.

IX.-REFERENCIAS

- [1] MANN, J.G and Y.A. LIU. "Industrial Water Reuse and Wastewater Minimization"  
McGraw-Hill. 1999
- [2] Kent, J. A. "Biblioteca Riegel de Química Industrial"  
CECSA. 1987
- [3] ECKENFELDER, W. W., Jr. "Industrial Water Pollution Control"  
2d. Ed. McGraw Hill New York 1989.
- [4] Wang, Y. P. and R. Smith. "Wastewater Minimization"  
Chem. Eng. Sci. 49:981, 1994
- [5] METCALF & EDDY, Inc. "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse"  
3d. Ed. McGraw Hill New York 1991.
- [6] GALAN, B. and I.E. Grossman. "Optimal Design of Distributed Wastewater Treatment Networks"  
Ind. Eng. Chem. Res. 37:4076 1998.
- [7] KUO, W. C. and R. Smith. "Effluent Treatment System Design"  
Chem. Eng. Sci. 52:4273 1997.
- [8] KUO, W. C. and R. Smith. "Designing for the Interactions between Water-Use and Effluent Treatment"  
Trans. I Chem. E 76(part A) : 287 1998.
- [9] Harvey, D. "Química Analítica Moderna"  
1a. Ed. McGraw-Hill 2002

---

---

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

- Carga másica:** Razón de flujo másico de contaminante transferido a una corriente de agua en el caso de minimización de efluentes o razón de flujo de contaminante retirado en los sistemas de tratamiento de efluentes.
- Concentración:** Expresión de la cantidad relativa de soluto (contaminante) por unidad de volumen o unidad de masa de una disolución [9].
- Concentración límite de entrada:** Concentración máxima de entrada a una operación de uso de agua.
- Concentración límite de salida:** Concentración máxima de salida de una operación de uso de agua.
- Contaminante:** Cualquier parámetro que afecte la calidad del agua, e.g., sólidos suspendidos o disueltos, DBO, DQO, pH, conductividad, etc.
- Corriente de entrada:** Corriente que alimenta a las operaciones de uso de agua y que puede usar agua de diferentes fuentes e incluso agua de reuso.
- Corriente de salida:** Es la que va a los sistemas de tratamiento de aguas residuales.
- Corrientes de proceso:** Corrientes que contienen algún tipo de contaminante que es necesario transferir.
- Curva compuesta de concentración:** Representación de todas las operaciones de uso de agua sobre un gráfico de concentración *versus* carga másica.
- Datos de proceso límite:** Datos correspondientes a las operaciones de uso de agua en sus concentraciones límite y con sus respectivas cargas másicas.
- Diagrama de intervalos de concentración (DIC):** Tabulación utilizada para obtener el flujo mínimo de agua fresca. Proporciona información para crear una red de uso de agua.
- Diagrama de bloques:** Una representación simplificada de una red de uso de agua, con sus flujos de masa y sus composiciones de contaminante, y las operaciones de uso de agua.
- Diagrama de contenido de masa:** Representación alternativa de una red de uso de agua.
- Diagrama de malla:** Representación alternativa de una red de uso de agua. Útil para diseñar redes preliminares. Contiene tanto las corrientes de proceso (con contaminante) como las corrientes de agua.
- Flujo límite:** Flujo másico asociado con la carga másica y las concentraciones límite de entrada y salida.
- Línea de suministro de agua:** Representación del suministro de agua fresca como corriente única en un gráfico concentración *versus* carga másica.
- Operación de uso de agua:** Cualquier unidad de proceso o de servicio que requiera o consuma agua.
- Perfil de agua límite:** Representación de la operación de uso de agua en un gráfico de concentración de contaminante *versus* carga másica.

**Pinza de tratamiento:** Punto asociado al flujo de tratamiento de los efluentes en sistemas distribuidos.

**Punto de pliegue:** Punto por arriba del cual no es necesario usar agua fresca. Punto de tangencia de la curva compuesta con la línea de suministro de agua fresca. A éste corresponde el flujo mínimo de agua fresca para el sistema.

**Punto límite de tratamiento:** Punto en el cual la línea media de tratamiento cruza con el eje negativo de las abscisas y se usa para obtener el flujo de tratamiento.

**Red de uso de agua:** Representación gráfica de un sistema de distribución del agua a múltiples operaciones. Incluye reuso, regeneración o recirculación.

**Regeneración:** Cualquier operación que retira los contaminantes que impiden la reutilización del agua.

**Sistema distribuido de tratamiento de efluentes:** Sistema en el cual se tratan de manera individual las diferentes corrientes de efluentes.