

00553



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA
MAESTRIA EN INGENIERIA

"USO DE LA TECNOLOGÍA PINCH PARA MAXIMIZAR EL RE-USO DE AGUA Y MINIMIZAR LA GENERACIÓN DE AGUA RESIDUAL EN PLANTAS INDUSTRIALES"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA
P R E S E N T A :
MARCOS ALVAREZ PIMENTEL

TUTOR: DR. CARLOS ESCOBAR TOLEDO



CIUDAD UNIVERSITARIA

2005

m. 348647



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Unidad de Administración de Posgrado

Dirección General de Administración Escolar, UNAM

Fecha: 11/ Abril/ 2005

Presente

H. Comité Académico del Posgrado en Ingeniería, por este conducto, y con base en el artículo 19 del RGEP, solicito la integración del jurado para la presentación de mi examen de grado que, de acuerdo a mi tutor principal y/o comité tutorial, podría estar conformado por los miembros aquí propuestos.

Alumno: **Alvarez Pimentel Marcos**

Número de Cuenta: **8728534-7**

C. de Conocimiento: **Ing. de Sistemas**

Semestre de Ingreso: **2001-1**

Plan de Estudios: **05-4053**

C. Disciplinario: **Ingeniería y admn. de proyectos**

Fecha de Nac. : **9 de Junio de 2005**

Jurado	Grado - Nombre	Entidad Académica o Institución
Presidente:	Dr. Jorge Luis de Victorica Almeida	• Instituto de Ingeniería
Vocal	M. C. Celestino Montiel Maldonado	• Facultad de Química
Secretario:	M. C. Fernando Barragan Aroche	• Facultad de Química
Suplente	M. I. Jorge Luis Aguilar Gonzalez	• Facultad de Química
Suplente	M. I. Ezequiel Millán Velasco	• Facultad de Química

Título de la Tesis: **Uso de la Tecnología Pinch para Maximizar el Reuso de Agua y Minimizar la Generación de Agua Residual en Plantas Industriales**

Atentamente

Firma del Alumno

Va. Bo. del Tutor Principal

Dr. Carlos Escobar Toledo

Teléfono(s): **52-76-18-54** Correo Electrónico: **marcalpi@yahoo.com**

Para ser llenado por el SACC.

Se recomienda su aprobación: SI NO

Fecha de recepción en el SACC: **12/04/2005**

Observaciones y/o modificaciones:

Nombre y Firma del Presidente del SACC

Fecha: **12/04/2005**

Para ser llenado por el Coordinador del Programa.

Aprobado: SI NO

Observaciones y/o modificaciones:

Dr. Wilfrido Rivera Gómez Franco
Coordinador del Programa

Fecha de aprobación del CA



CONTENIDO

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo.....	2
1.2 Hipótesis.....	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Antecedentes.....	3
CAPITULO II. MARCO TEORICO.....	8
2.1 Integración de Procesos.....	9
2.1.1 Ramas.....	11
2.1.2 Metodologías Usadas.....	11
2.1.3 Aplicación de la Integración de Procesos.....	13
2.2 Minimización de Efluentes.....	14
2.2.1 Efluentes de Proceso.....	15
2.2.1.1 Reactores.....	15
2.2.1.2 Sistemas de Separación y Recirculación.....	16
2.2.1.3 Operaciones de proceso.....	16
2.2.2 Efluentes de Servicios.....	16
2.3 Análisis Pinch de Agua.....	17
2.3.1. Perfiles de Agua Limitantes.....	21
2.4 Modelo de Optimización Matemática para la minimización de agua.....	23
2.4.1. Modelo Expandido de Transbordo Aplicado a Redes de Intercambio de Agua.....	23
2.4.1.1 Analogía.....	24
2.4.1.2 Representación Gráfica.....	26
CAPITULO III. MINIMIZACION DE AGUA EN SISTEMAS DE UN SOLO CONTAMINANTE.....	28
3.1 Modelo.....	29
3.1.1. Intercambio de Masa.....	29
3.1.2 Operaciones que Usan agua.....	31

3.2	Flujo mínimo de agua sin re-uso.	36
3.3	Flujo mínimo de agua con re-uso.	38
3.3.1	<i>Curva de Concentración Compuesta.</i>	38
3.3.2	<i>Método Algebraico (Diagrama de Intervalo de Concentraciones).</i>	42
3.4	Diseño de redes de agua.	45
3.4.1	<i>Máximo Potencial (Diferencia de Concentraciones).</i>	48
3.4.2	<i>Número Mínimo de Fuentes de Agua.</i>	52
3.5	Minimización de agua con restricciones de flujo.	57
3.5.1	<i>Operaciones Simples con Flujo Fijo.</i>	58
3.5.1.1	<i>Diseño con Reciclaje Local.</i>	59
3.5.1.2	<i>Diseño con re-uso.</i>	60
3.5.2	<i>Operaciones Múltiples con flujo Fijo.</i>	63
3.5.3	<i>Múltiples Fuentes de Agua Fresca.</i>	74
3.5.4	<i>Procesos con Pérdidas de Agua.</i>	76

CAPITULO IV. MINIMIZACION DE AGUA EN SISTEMAS DE CONTAMINANTES MULTIPLES. 82

4.1	Re-uso con Variación de Flujo.	82
4.1.1	<i>Elección del Contaminante de Referencia.</i>	102
4.2	Re-uso con Restricciones de Flujo.	106

CAPITULO V. MINIMIZACIÓN DE AGUA CON REGENERACIÓN. 107

5.1	Re-uso con regeneración para contaminantes simples.	109
5.2	Re-uso con regeneración para múltiples contaminantes.	121
5.3	Reciclaje con regeneración.	130
5.4	Regeneración con restricciones de flujo.	134

CAPITULO VI. ESTUDIO DE APLICACIÓN. 135

6.1	Pasos del estudio de integración de procesos para re-uso de agua.	135
6.1.1	<i>Determinación de los objetivos del estudio.</i>	136
6.1.2	<i>Desarrollo del balance de materia.</i>	136
6.1.3	<i>Extracción de datos de proceso.</i>	137
6.1.4	<i>Aplicación de las técnicas de integración de procesos.</i>	137
6.1.5	<i>Presentación de resultados al personal de la planta.</i>	138
6.1.6	<i>Recomendación de un plan de acción.</i>	138

6.1.7	<i>Implementación del proyecto.</i>	139
6.1.8	<i>Evaluación y seguimiento del desempeño.</i>	139
6.2	Descripción del complejo.	139
6.2.1	<i>Uso de Agua en el complejo.</i>	140
6.3	Aplicación de la tecnología pinch para el caso de estudio.	145
6.3.1	<i>Determinación del objetivo del estudio.</i>	145
6.3.2	<i>Desarrollo del balance de materia.</i>	145
6.3.2.1	<i>Recopilación de información.</i>	145
6.3.2.2	<i>Procesamiento y análisis de la información.</i>	146
6.3.2.3	<i>Desarrollo del balance de agua.</i>	146
6.3.3	<i>Extracción de datos de proceso.</i>	148
6.3.4	<i>Aplicación de las técnicas de integración de procesos.</i>	150
6.3.5	<i>Presentación de resultados al personal de la planta.</i>	163
6.3.5.1	<i>Uso de agua desmineralizada y agua de río.</i>	163
6.3.5.2	<i>Uso de agua desmineralizada y mezcla de agua desmineralizada-agua de río.</i>	170
6.3.6	<i>Recomendación de un plan de acción.</i>	176
CAPITULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.		180
7.1	Conclusiones.	180
7.2	Recomendaciones.	182
GLOSARIO DE TERMINOS.		184
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA.		187

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo lo dedico con todo mi amor a mi alma gemela, mi esposa Lulú, quien me ha apoyado en mi incursión en el postgrado, durante el cual me dio los mejores regalos que la vida me pudo otorgar: mis tres hijos: Mariana Josiane, Marcos Jael y mi pequeño (a) que viene en este momento camino y que se ha aferrado a la vida a pesar de todas las adversidades que ha presentado. Para ellos, mis tres grandes motivos, también dedico este trabajo.

A Mis padres, Adela y Tomás, de los cuales siempre he recibido su apoyo y amor incondicional y gracias a ellos me he convertido en el hombre que ahora soy.

A mis hermanos, Javier, Mago, Memo y Elba y a esos buenos momentos de convivencia que hemos tenido y de los cuales he aprendido a conocerme mas a través de ellos.

A mis abuelas. Aurelia quien me enseña que la vida es serenidad y Margarita que en estos momentos difíciles por los que esta pasando me ha enseñado que la vida representa valentía.

Dr. Carlos Escobar, gracias por el apoyo para retomar como tutor este trabajo, así como su valiosa ayuda, sus sugerencias y comentarios para mejorarlo.

Ing. J. A. Ortiz, gracias por la oportunidad y la confianza depositada en mi para dirigir sus proyectos, de los cuales surgió esta tesis.

A mi grupo y gran equipo de trabajo de la UNAM, Aurelia, Ruiz, Davila, Chavez, Rangel, Olivares, Baldomero, Alejandro (Lacho), Mario, Sergio, Luigi, Beto, Lety, Blanca, Arturo Ortega, Lety, Gerardo, Elias, Charlie, George, Christian, Son un gran equipo.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

La industria aunque ha traído beneficios a los seres humanos también ha acarreado la generación de contaminación. Esto debido a que, un proceso, además de generar el producto deseado también genera sub-productos que ya no tienen utilidad o no tienen valor comercial y que por lo tanto se descargan al medio ambiente. Todas las plantas industriales generan en mayor o en menor grado compuestos líquidos, sólidos o gaseosos que por sus características resultan contaminantes.

Desde sus orígenes y en la medida que la industria crecía, la carga de contaminantes también lo hicieron y al presentarse signos visibles de los efectos de la contaminación las cosas comenzaron a cambiar. Surgieron leyes para regular las descargas de contaminantes y se creaban organizaciones ecologista que obligaban a la industria a reducir sus descargas.

Como parte de este problema, grupos de investigación se dedicaron a estudiar las descargas y la manera de reducir su concentración y para ello se presentaron dos panoramas: uno para tratar con procesos existentes y otro para tratar con procesos nuevos. Al tratar con procesos existentes el objetivo planteado fue reducir la concentración de los contaminantes en la descarga final y en cambio para los nuevos procesos su alcance fue reducir los componentes indeseables desde el proceso mismo.

El problema constante, y con el cual se enfrenta la industria, es que una vez creados los efluentes éstos no pueden destruirse. Se puede reducir su concentración, cambiar su forma física, cambiar su forma química pero no se pueden destruir. La solución sería evitar la producción de efluentes (estos es, reducción de efluentes) pero esto implicaría el desarrollo de un proceso ideal, en el cual se generen productos sin crear contaminantes, ó mas aún para recuperar y re-usar los materiales considerados como “residuos”.

Como no existe un proceso ideal, las opciones que tiene la industria para reducir los contaminantes, antes de usar el tratamiento de efluentes, son el realizar mejoras a los procesos (substitución de las materias primas, cambio de tecnología), el re-uso y el reciclaje. Cualquiera de estas puede emplearse en la medida que lo permitan las materias primas, subproductos y/o productos de desecho usados/generados en el proceso.

Para la industria el agua resulta un servicio muy importante y ha llegado a ser un elemento primordial por la gran variedad de usos que presenta, entre los cuales se encuentran: la generación de vapor, como disolvente, como agente de separación, como agente para limpieza, como medio para transferir calor (vapor, agua de enfriamiento, agua helada), etc. Debido al contacto que tiene el agua en sus diversos usos con las diferentes unidades que conforman el proceso, y a la capacidad que tiene para disolver diversos compuestos, ésta llega a contaminarse.

1.1 Objetivo

El objetivo de la presente tesis es demostrar que el análisis Pinch¹ [Wang, Y. P. & Smith R., 1994] puede resultar útil para reducir el consumo de agua fresca y por consiguiente reducir la generación de agua residual en plantas industriales, empleando el re-uso (incluyendo los tratamientos intermedios actuales) para recircular o reciclar el agua, revisando además metodologías de diseño para obtener un arreglo, entre las diferentes unidades que usan agua, que permita manejar el volumen de agua resultante de la reducción en el consumo de agua fresca y en la generación de agua residual.

1.2 Hipótesis

- 1) Que el análisis Pinch puede emplearse para establecer estrategias que permitan lograr reducciones significativas en el consumo de agua fresca identificando las corrientes que son factibles de re-usar o dar tratamientos intermedios para lograr la reducción el consumo de agua fresca y en la generación de agua residual, considerando la tecnología de tratamiento actualmente en operación.
- 2) Que se pueden diseñar redes entre las diferentes unidades que consumen agua fresca o que generen agua residual que permitan manejar la cantidad mínima obtenida del análisis Pinch.

1.3 Alcance

El alcance para realizar para este trabajo de tesis abarcan los siguientes puntos:

- a) Revisión bibliográfica de la metodología del análisis pinch de agua para reducir el consumo de agua fresca, sin considerar las técnicas para reducir el volumen de agua residual ni el tratamiento de efluentes.
- b) Diseño de redes de intercambio de agua que permitan usar el flujo de agua fresca obtenida del análisis pinch sin considerar las técnicas para reducir el volumen de agua residual ni el tratamiento de efluentes.
- c) Aplicación del análisis pinch de agua a un problema real. Se le aplicará a una planta existente considerando las condiciones a las cuales opera actualmente para determinar el flujo de agua fresca que es posible reducir y, como consecuencia de esta reducción, el efecto que traerá en el volumen de agua residual descargada.
- d) Conclusiones y recomendaciones resultantes del trabajo

¹ Debido a que no se encuentra una traducción adecuada que defina de manera clara la palabra "pinch" se mantuvo el término en inglés a lo largo de la tesis y se define como el conjunto de principios, herramientas y reglas de diseño para obtener la mejor manera de configurar los elementos de un proceso. La clave de su estrategia es el establecimiento de objetivos antes del diseño.

1.4 Antecedentes

El uso eficiente del agua es representa un camino para reducir los costos de operación en una planta. El considerar una aproximación sistemática para minimizar todos los tipos de residuos generados en una planta ayuda a una compañía a lograr los resultados finales y a ser mas competitiva.

Los principios esenciales sobre los cuales se basa las practicas de minimización se basan en la jerarquía de residuos mostrada en la figura 1.1. Este es el orden de preferencia para reducir los residuos basado en la filosofía que dice que la prevención es mejor que la cura. Al aumentar el orden de la jerarquía sobre los residuos aumentan los niveles de ahorro, de modo que al estar mas cercano a la primera etapa (eliminación) se tienen mejores ahorros.

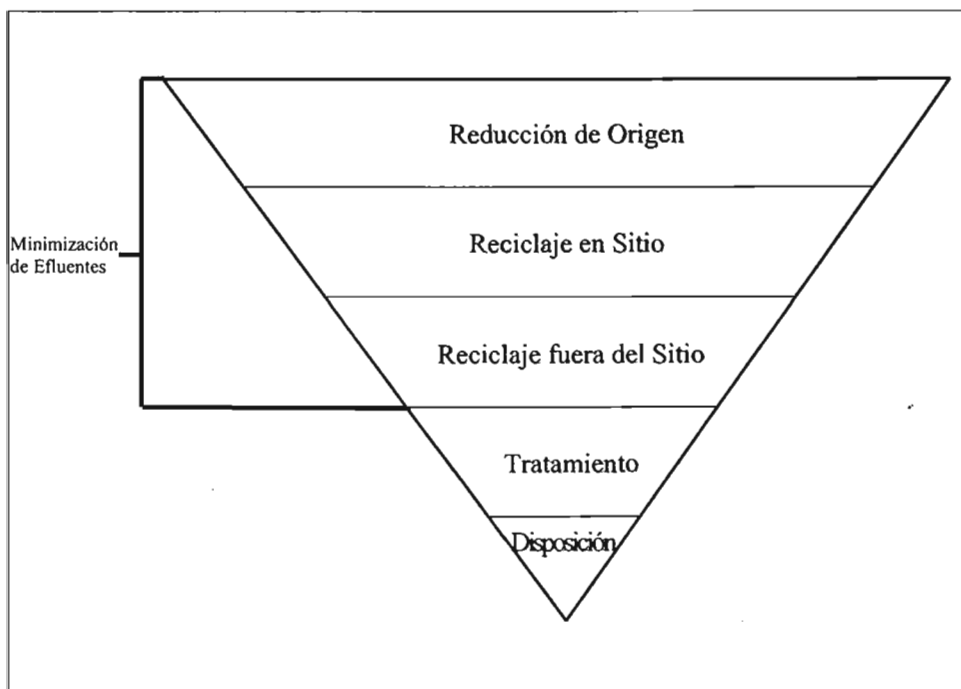


Figura 1.1 Jerarquía de los residuos

Los residuos que no son creados no necesitan eliminarse, re-usarse, reciclarse o mandarse a disposición por lo que la eliminación en sitio (o desde el mismo proceso) es la opción deseable, seguida de la reducción, el re-uso, reciclaje y finalmente si ninguna de estas técnicas funciona la disposición.

Implementando medidas para reducir los residuos o efluentes como parte de un programa de minimización, una compañía puede reducir los costos de tratamiento hasta en una cuarta parte, dependiendo del tamaño de la compañía.

Dentro de los efluentes líquidos descargados por la industria se encuentran principalmente los acuosos. En la medida que las legislaciones ambientales obligan a la industria a reducir las emisiones de agua residual, ésta tiene ante sí tres opciones para controlar o reducir sus vertidos:

- 1) Dentro de la planta, al hacer mas eficientes sus procesos
- 2) Tratamiento previo y descarga al sistema de depuración urbana o municipal.
- 3) Depuración completa en la planta y reutilización o vertido sin más a las corrientes o masas de agua superficiales.

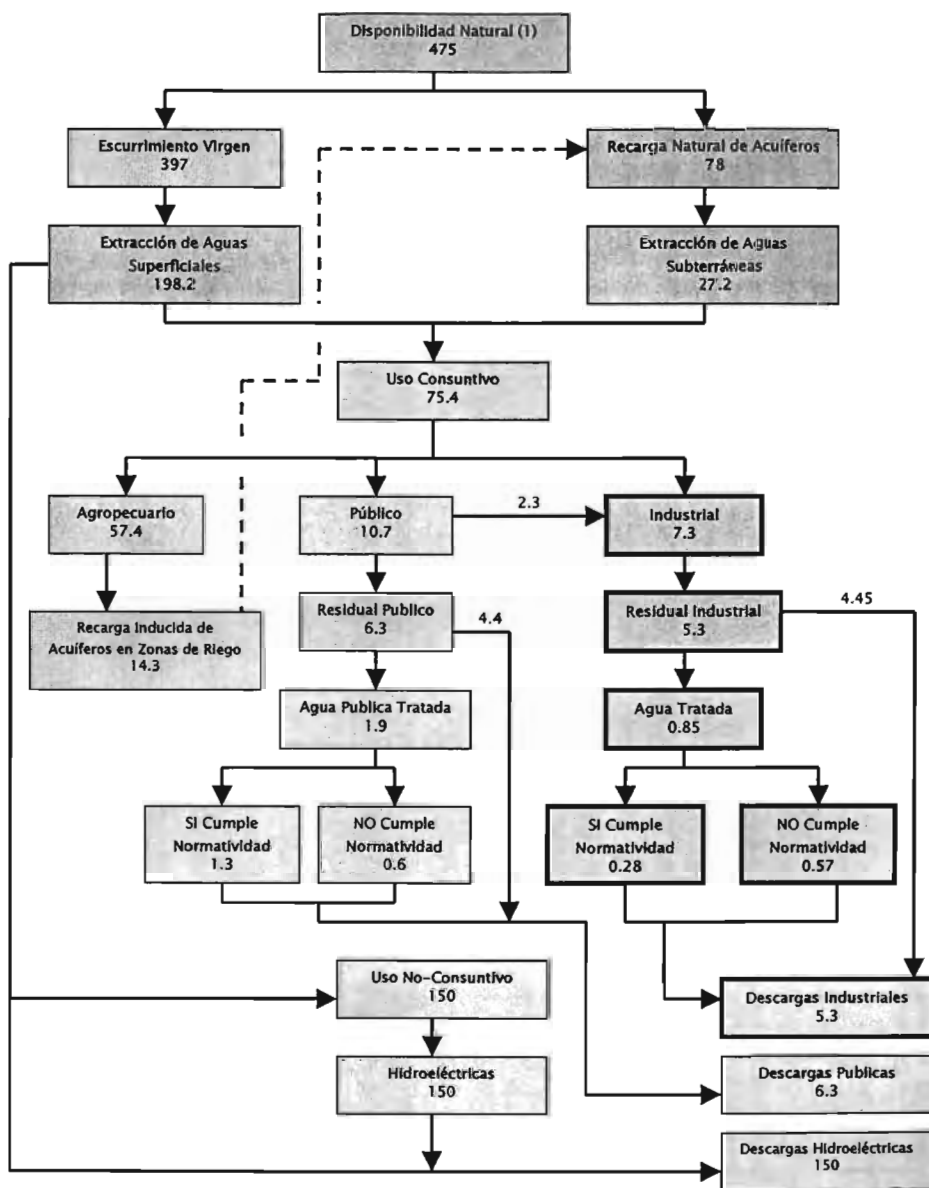
Aunque la industria no demanda grandes volúmenes de agua comparada con otros sectores, ésta genera 6.2 millones de toneladas de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) al año, tres veces lo generado por todos los centros de población [*Comisión Nacional del Agua, 2001*]. Las descargas de materia orgánica más importantes provienen de las industrias azucarera, petrolera y química. A pesar que las características de las aguas residuales difieren mucho entre las empresas, el impacto de los vertidos industriales no sólo dependen de sus características comunes, como la DBO, sino también del contenido de sustancias orgánicas e inorgánicas específicas.

En México el uso que tiene el agua se clasifica dos rubros [*Comisión Nacional del Agua, 2005*]: *uso consuntivo* y *uso no consuntivo*. El primer caso incluye al empleo en los hogares, comercios, servicios, la agricultura, la industria, y la acuicultura intensiva. El segundo es el destinado a la generación de energía hidroeléctrica.

Para uso consuntivo se estima que en la Republica Mexicana se extraen cerca de 75 mil millones de m³/año. De ésta el 76 % es para riego de cultivos, el 14 % para el abastecimiento de agua de las poblaciones, el 10 % para la industria (que normalmente tienen su propio sistema de abastecimiento) y para otros usos. Aunque las hidroeléctricas manejan 150 mil millones de m³/año, esta agua no se consume, ya que solo se aprovecha su energía potencial (Figura 1.1).

Respecto al consumo de agua por parte de la industria en México, ésta consume alrededor de 7,000 millones m³/año, y de este volumen cerca del 73 % se descarga como agua residual (Fig. 1.1). Asimismo, solo el 16 % del agua residual industrial es tratada y de esta agua tratada solo el 33 % cumple con la norma ecológica NOM-001-ECOL-1996. La mayoría de los cuerpos de agua superficial del país reciben las descargas de agua residual de tipo público, industrial y agrícola sin tratamiento alguno, provocando grados variables de contaminación que limitan su uso directo. Por ello, cuando el agua es reintegrada a la naturaleza (lagos, ríos, laguna o mares) contiene tóxicos que impiden su reutilización.

La importancia de usar métodos y técnicas para ahorro de agua y reducción de descargas residuales se puede apreciar aún más si se tiene presente la situación alarmante que guarda actualmente este recurso en México, ya que tal y como lo reporta la Comisión Nacional del Agua (CNA), de los 7,000 millones de metros cúbicos de agua descargadas por la industria solo el 16 % es tratada y solo el 5 % cumple con la normatividad.



1. Volumen en Km³
2. Fuente: Comisión Nacional del Agua 2005

Figura 1.1 Extracción, Usos, Consumo de Agua y Generación de Agua Residual en México 2004 (Estadísticas del Agua en México, 2005)

Siguiendo la ruta de la reducción de la contaminación, la ingeniería química ha participado para llevar a cabo cambios fundamentales, y una de las áreas que ha mostrado progresos en estos cambios se encuentra en el campo denominado “**integración de procesos**”. La integración de procesos es compatible y complementaria con la filosofía de la prevención de la contaminación.

Aunque en su origen la integración de procesos fue aplicada a redes de intercambio de calor, ahora abarca la aplicación de integración de masa, y dentro de ésta última ha surgido el análisis pinch de agua, que aplica técnicas de diseño para reducir el consumo de agua fresca y el volumen de agua residual a tratar.

Una aplicación exitosa del pinch de agua y que ha resultado ser la tarjeta de presentación de esta tecnología fue reportada en Gran Bretaña en 1995 [Peters J., 1995]. La compañía Monsanto en Newport recolectaba los efluentes de siete plantas de proceso, ajustaba su pH y posteriormente los descargaba al Río Severn. La NRA (National Rivers Authority) de éste país indicó que las descarga actuales no serían aceptables después de 1997 y que la demanda química de oxígeno (DQO) de las descargas tendría que reducirse en un 90%. Esto forzaba a instalar una planta de tratamiento de agua con un costo de \$15 millones de dólares. El problema fue atacado desde tres ángulos, empleando una combinación de minimización de efluentes, minimización de agua mediante re-uso y segregación de efluentes:

- Primero, cada proceso fue estudiado a través la tecnología del Pinch de Agua. Combinando cambios de la planta y el re-uso de agua, se concluyó que se podía ahorrar un 30% del agua. Tal ahorro tenía un importante impacto en el tamaño de la planta de tratamiento de agua y además en la reducción de la DQO. De hecho, aún sin tratamiento, se concluyó que podía reducirse la DQO en un 76%, un valor muy cercano al requerido de 90%. Todo ello implicaba que la inversión requerida se reducía a \$3 millones de dólares y además se podía obtener un ahorros de agua por \$300,000 dólares anuales y ahorros de materia prima de \$700,000 dólares anuales.
- Después se consideró el tratamiento de los efluentes resultantes mediante el análisis pinch de agua para diseñar un sistema de tratamiento de efluentes distribuido. Este método combinaba corrientes adecuadas para tratamiento especial y las segregaba cuando así se requería. Los resultados demostraron que los problemas de tratamiento podían resolverse con poca inversión. El volumen final fue tratado y pudo reducirse en un 95% lo cual representaba un ahorro de \$500,000 dólares anuales.

Los resultados finales excedían por mucho las expectativas de Monsanto ya que se resolvió el problema ambiental con una inversión total de \$3.5 millones de dólares y no de \$15 millones como fue previsto originalmente. Asimismo hubo un ahorro en los costos de operación de \$1 millón de dólares anuales. Con todo ello Monsanto fue premiado en 1995 con la Excelencia en Seguridad y Ambiental por el Instituto Británico de Ingenieros Químicos (British Institute of Chemical Engineers).

Como el método adoptado en este estudio se basa en un procedimiento sistemático, puede ser reproducible en cualquier tipo de industria, proporcionando ahorros en los costos de operación e inversión y además es capaz de resolver problemas ambientales.

En México, la aplicación de la integración de procesos es escasa. Son contadas las instituciones que proporcionan una enseñanza en el área de la integración de procesos y en algunas donde se enseñan, los planes se enfocan solo el ahorro de energía. Entre las instituciones que imparten cursos de integración de procesos solo la Universidad de Guanajuato cuenta con una maestría en esta área. Muchas de las áreas que actualmente abarcan la integración de procesos son desconocidas o se les demuestran poco interés. Dentro de estas áreas se encuentran el uso eficiente de materias primas, reducción de emisiones y mejora en operaciones de proceso. Estas aplicaciones cubren tanto la transferencia de masa como la de energía y dentro de las recientes innovaciones se tiene la integración de reactores y la integración de hidrógeno. Además, actualmente los avances de estas permiten combinarlas con técnicas de optimización para detallar y mejorar aun mas los arreglos obtenidos.

Aparte de la enseñanza, la investigación en esta área en México, también es escasa. Algunos institutos como el de Celaya y el IMP (Instituto Mexicano del Petróleo) cuentan con áreas dedicadas a la investigación en integración de procesos, pero dirigidas al uso eficiente de energía. Muy poco se ha reportado en integración de masa y particularmente en la integración (o pinch) de agua. La integración de masa es un área que puede tener gran aplicación ya que, por ejemplo, se puede usar en endulzamiento de gas o crudo amargo (si tomamos en cuenta que el crudo mexicano presenta un alto contenido de azufre) esta permitiría obtener ahorros en los reactivos endulzantes y mejorar la eficiencia de separación, sin embargo es muy poco conocida en México. Son pocos los investigadores que reportan el estudio en el área dedicada al pinch de agua, y dentro de estos solo el IMP (Instituto Mexicano del Petróleo) y el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología de Agua) han publicado algún estudio sobre el mismo, a pesar que en otros países esta tecnología ha demostrado ser un buen método para el ahorro de agua y en la reducción en la descarga de efluentes, sin embargo el atraso que tenemos sigue siendo grande, si lo comparamos principalmente en Europa, donde el avance ha alcanzado la integración de efluentes, mejora en sistemas de enfriamiento, estudio y mejora de la regeneración de agua, integración simultánea de agua y energía, estudio de integración simultánea de agua cruda y residual

Los ahorros que se pueden lograr mediante el uso del pinch de agua dependen del tipo de proceso, planta, complejo o industria así como de la calidad de agua disponibles en cada uno de ellos, por lo que los ahorros resultaran diferentes en cada aplicación. Por ejemplo, la compañía Linnhoff March (pionera en la aplicación de la tecnología pinch) ha reportado ahorros hasta del 60% en aplicaciones de la industria química y en algunos aplicaciones de la industria petroquímica reporta ahorros de hasta un 40%.

CAPITULO II. MARCO TEORICO

Los procesos deben diseñarse, como parte de un desarrollo industrial sustentable que mantengan la capacidad del ecosistema, para soportar tanto la actividad industrial como la vida. En términos prácticos esto significa que los residuos deben minimizarse y que cualquier sub-producto generado como desecho no debe ser ambientalmente dañino.

Para aplicar las técnicas y/o metodologías que logren la minimización de efluentes es necesario tener un buen conocimiento del proceso. Este conocimiento no solo debe incluir a las materias primas y productos sino también debe tomar en cuenta las impurezas presentes en las materias primas, en los sub-productos y en los efluentes. Una de las mejores herramientas lograr el conocimiento de un proceso es mediante un modelo matemático, para lo cual se puede emplear un simulador de computadora o una hoja de cálculo. El modelo ayuda a entender las operaciones y a identificar las deficiencias y cuellos de botella del proceso, lo cual es fundamental para tener un buen éxito en la minimización de efluentes.

La reducción de efluentes resulta en un beneficio dual: reducción de costos de tratamiento y de materia primas (Figura 2.1).

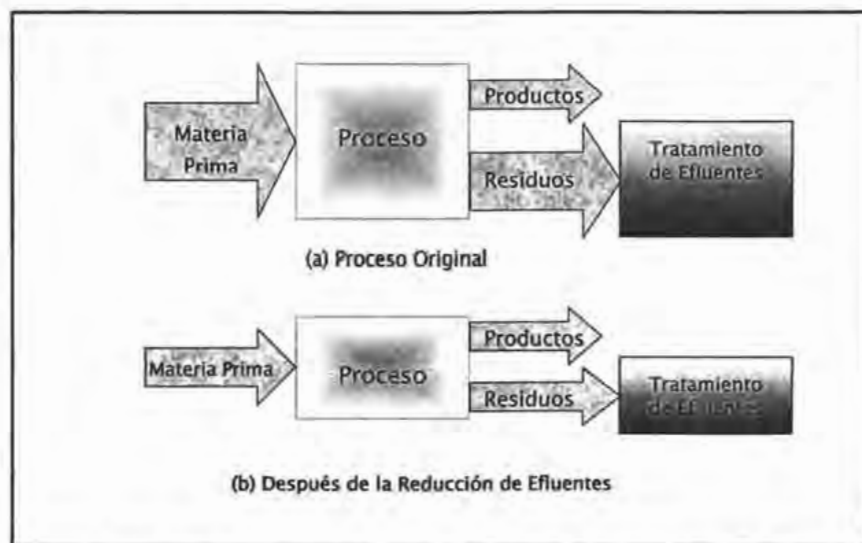


Figura 2.1. Beneficio que tiene la minimización de efluentes (Smith R., 1994)

Además, y como consecuencia de los anteriores, se pueden lograr también los siguientes beneficios:

- Mejora en la calidad del producto y en la eficiencia del proceso.
- Disminución del volumen de emisiones y desechos generados.

- Mejora en las condiciones de trabajo.
- Disminución de los accidentes laborales.
- Posibilidad de acceso a nuevos mercados.
- Reducción del impacto directo al ambiente y a la salud.
- Mejora de la Imagen Empresarial.

Las técnicas que se aplican en la reducción de efluentes forman parte de la *síntesis de procesos*, encargada de seleccionar la mejor manera de interconectar las operaciones o partes que componen un proceso para transformar las materias primas en los productos deseados. Dentro del área de la síntesis de proceso y como área que permite el diseño para reducir la generación de efluentes se encuentra la Integración de Procesos, que emplea herramientas gráficas y matemáticas para lograr este propósito. La integración de procesos como rama de la ingeniería se deriva de la síntesis de procesos, la cual pertenece a la Ingeniería de Sistemas (Fig. 2.2).

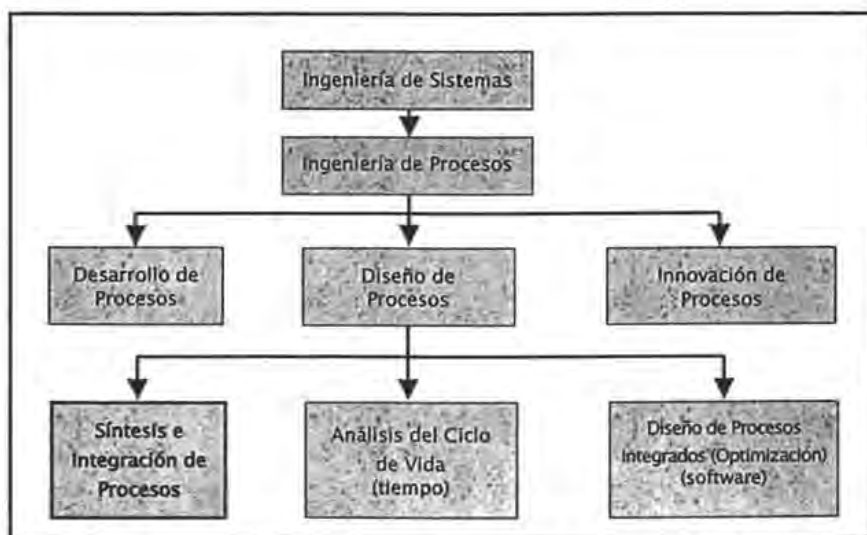


Figura 2.2 La Integración de Procesos se deriva de la Ingeniería de Sistemas

La integración y síntesis de procesos son sistemas con técnicas de *espacio* (la planta, el sitio y algunas veces la región incluyendo necesidades domésticas). El análisis del ciclo de vida es una metodología de sistemas orientada en *tiempo* y el diseño de procesos integrados es un sistema visto entre disciplinas científicas y sistemas de software.

2.1 Integración de Procesos.

El diseño para las operaciones y, en general para los procesos, ha evolucionado. Durante esta evolución el diseño ha pasado a través de distintas generaciones:

- I) Originalmente (*Primera Generación*) los inventos basados en experimentos de laboratorio por los químicos fueron probados en plantas piloto antes de construir las plantas industriales.
- II) La *Segunda Generación* estuvo basada en el concepto de Operaciones Unitarias, lo que dio origen a la Ingeniería Química como disciplina. Las operaciones unitarias representaron los bloques de un edificio para el diseño de procesos.
- III) La *Tercera Generación* considero la integración entre estas unidades para ahorrar energía, por ejemplo la recuperación de calor entre corrientes de proceso.
- IV) Hoy en día existe una fuerte tendencia para ir mas allá de la Operaciones Unitarias (*Cuarta Generación*) con un enfoque en los “Fenómenos”. Los procesos basados en el concepto de Operaciones Unitarias se enfocan en unidades de proceso con arreglos de tuberías demasiados complejos, pero al permitir que se tenga mas de un fenómeno físico ó químico en un mismo equipo (reacción, transferencia de calor, transferencia de masa, etc.) se pueden lograr ahorros significativos tanto en costos de inversión como de operación (materia prima y energía). La mayoría de las aplicaciones industriales que manejan esta idea se han basado en la prueba y error, sin embargo las investigaciones en esta área están progresando en el desarrollo métodos sistemáticos para reemplazar la prueba y error.

Como parte de la tercera generación, las investigaciones sobre la integración de procesos comenzaron a finales de los 70's y comienzos de los 80's con la conservación de la energía. La integración de procesos fue sinónimo de análisis pinch e integración de energía y fue utilizado para describir ciertos sistemas principalmente orientados al *diseño de procesos*.

Las ideas y técnicas desarrolladas para resolver los problemas de redes de calor proporcionaron las bases para extender esta tecnología a nuevas áreas. Actualmente las investigaciones en integración de procesos han permitido cubrir una mayor área y el alcance se ha ampliado para incluir eficiencia de materias primas, eficiencia de reactores, reducción de emisiones y operaciones de procesos.

No existe una definición completamente aceptada entre los diferentes grupos de investigación que trabajan en este campo, debido a que su aplicación ha crecido de manera considerable. La definición más general es la que propone la Agencia Internacional de Energía (AIE) [Gundersen Truls, 2001]:

“Método sistemático y general para el diseño de sistemas de producción integradas, tanto en sistemas nuevos como en existentes, cubriendo desde procesos individuales hasta sitios totales, con especial énfasis en el uso eficiente de la energía y reducción de los efectos ambientales, que aplica metodologías orientadas a sistemas y procedimientos integrados para el diseño de plantas industriales”

2.1.1 Ramas.

Mientras que la recuperación de calor fue el enfoque inicial de la integración de procesos, el alcance se amplió considerablemente a finales de los 80's y en los 90's cubriendo varios aspectos de diseño, desde metodologías para recuperación de calor, estrategias de diseño para reducir emisiones, mejor uso de materias primas y hasta mejorar el diseño de reactores. El uso de los conceptos básicos de recuperación de calor se ha expandido a otras áreas, encontrándose una analogía entre la transferencia de calor y la de masa. De este modo se han desarrollado dos ramas importantes en la integración de procesos:

- a) Integración de Energía (Redes de Intercambio de Calor)
- b) Integración de Masa (Redes de Intercambio de Masa)

La *integración de energía* desarrollada independientemente por Hoofmann (1971), Umeda (1979) y Linnhoff (1983) es un método sistemático que proporciona un conocimiento esencial en la utilización de la energía de los procesos, identificando las metas de energía y optimizando sistemas de servicios para la recuperación del calor y energía. La técnica más conocida es el análisis pinch térmico que se emplea para identificar requerimientos mínimos de calentamiento y enfriamiento de servicios auxiliares.

Del otro lado, la *integración de masa* desarrollada por El-Halwagi y Manousiouthakis es un método sistemático que proporciona un conocimiento medular de los procesos sobre el flujo global de masa, y emplea este conocimiento en la identificación de objetivos para optimizar la generación y el manejo de las especies del proceso. Los objetivos, tales como prevención de la contaminación, son el corazón de la integración de masa.

Las dos ramas de integración son compatibles. La integración de masa junto con la de energía proporciona un marco sistemático para el conocimiento general de un proceso, identificando objetivos y desarrollando soluciones que mejoren la eficiencia del mismo, incluyendo la prevención de la contaminación.

2.1.2 Metodologías Usadas.

Los métodos varían en cuanto a herramientas y alcances y se pueden aplicar a procesos continuos, semi-continuos e intermitentes. Los métodos de integración de procesos son de tres tipos y en la práctica, es posible emplear una combinación de ellos:

- 1) *Evolutivos (Heurísticos)*
- 2) *Con Objetivos Termodinámicos*
- 3) *Algorítmicos (Optimización Matemática)*

Los *métodos heurísticos* están basados en la experiencia e intuición del ingeniero. La heurística puede visualizarse como una guía, desarrollada por la experiencia, o por la prueba y error.

Los *métodos termodinámicos* emplean la primera y segunda ley de la termodinámica en sus diseños.

Las métodos de *optimización matemática* se utilizan para obtener el mejor arreglo de los procesos. En esta se genera una estructura conocida como superestructura la cual considera todas las operaciones y todas las interconexiones viables para un diseño óptimo. El problema se formula matemáticamente y de la superestructura se obtienen los valores que minimicen o maximicen una función objetivo, satisfaciendo las restricciones impuestas. Las técnicas de optimización pueden ser *determinísticas* (Programación Matemática) y *no-determinísticos* (algoritmos genéticos).

Con base a lo anterior, Gundersen [Gundersen Truls, 2001] sugiere una clasificación de los métodos usados en integración de procesos tal y como se muestra en la figura 2.3.

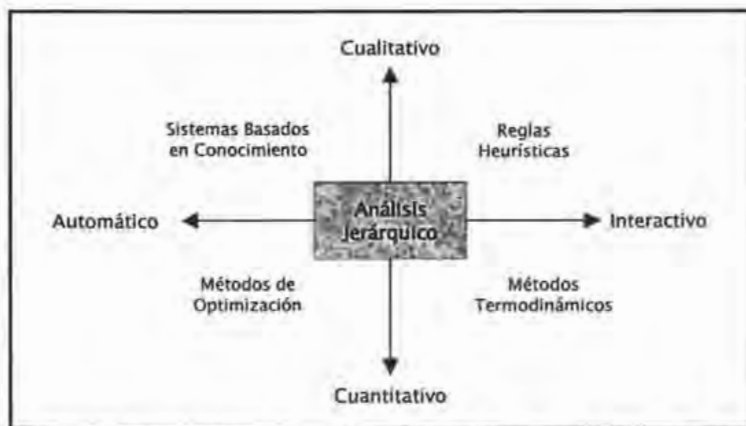


Figura 2.3 Posible Clasificación de los métodos de Integración de Procesos (Adaptado de Gundersen)

El Análisis Jerárquico se coloca en el centro de la figura para indicar que todos los métodos de diseño sensibles son o pueden ser basados en esta idea y hacer el problema de diseño manejable por métodos sistemáticos.

Los métodos termodinámicos (o el método pinch) pueden usarse junto con los de optimización de procesos, con lo cual se pueden atacar un número mayor de problemas, por lo tanto se puede considerar que la integración de procesos ahora cubre cuatro áreas principales:

1. Uso eficiente de materias primas
2. Uso eficiente de energía
3. Reducción de emisiones
4. Operaciones de proceso

Con estas áreas de investigación, la integración de procesos ahora esta mas relacionada con cuestiones de materia (masa) que en el pasado, además que la integración de energía y masa, de hecho, se relacionan una con la otra.

2.1.3 Aplicaciones de la Integración de Procesos

Entre las aplicaciones (principalmente de diseño) donde actualmente se pueden aplicar las técnicas de integración de procesos se encuentran las siguientes:

A) Uso eficiente de materias primas

- Diseños novedosos de sistemas de reactores
- Diseño de sistemas reactor-separador-reciclaje
- Destilación reactiva
- Diseño de separaciones a base de solventes
- Integración de hidrógeno en refinación de petróleo
- Procesos de gasificación integrados de ciclo combinado

B) Uso eficiente de energía

- Diseño de sistemas de destilación complejos
- Columnas de destilación de pared dividida
- Separación de mezclas azeotrópicas
- Análisis termodinámico de destilación
- Diseño de sistemas de separación por absorción
- Sistemas de cogeneración y servicios auxiliares
- Diseño de sistemas de agua de enfriamiento
- Diseño de sistemas a baja temperatura
- Diseño automático de redes de intercambio de calor
- Re-diseño o Re-ajuste de redes de intercambio de calor
- Diseño de redes de intercambio de calor usando transferencia de calor intensificada
- Diseño de estaciones de generación de energía eléctrica

C) Reducción de emisiones

- Diseño de sistemas de agua
- Minimización de emisiones de gas

D) Operaciones de proceso

- Optimización de procesos para químicos básicos
- Optimización de refinerías y eliminación de cuellos de botella
- Programación, diseño y operación óptimos de procesos intermitentes

- Operabilidad de sistemas de cogeneración y servicios auxiliares en sitio

2.2 Minimización de Efluentes

De las diversas aplicaciones que actualmente tienen las técnicas de la integración de procesos se encuentra la minimización en el uso de agua fresca que trae como consecuencia la minimización de efluentes acuosos.

Al igual que la seguridad, usualmente las consideraciones ambientales se dejan para una etapa final de diseño. Sin embargo, como en la seguridad, las decisiones en esta etapa final frecuentemente llevan a problemas ambientales difíciles de resolver y que más adelante requieren soluciones más complejas; así que es mejor considerar problemas de efluentes en la medida que el diseño progresa a fin de evitar sistemas complejos de tratamiento de efluentes.

Los efectos de los efluentes o contaminantes en el ambiente y los ecosistemas pueden ser directos (como las emisiones tóxicas) o indirectos (como la absorción de pesticidas por bacterias y que entran a la cadena alimenticia). De este modo las emisiones no deben exceder ciertos niveles en los cuales se consideran dañinos. Para evitar o reducir estos efectos se pueden usar dos métodos para atacar el problema de generación de efluentes:

- 1) Tratar el efluente usando incineración, digestión biológica, etc., hasta tenerlo en una forma apropiada para descargarlo al ambiente, a lo cual se le llama tratamiento de efluentes.
- 2) Reducir o eliminar la producción de efluentes desde su origen (en el mismo proceso) mediante minimización de efluentes.

Antes de usar cualquiera de los dos métodos anteriores, primero se debe identificar la generación de contaminantes en la planta industrial. Una herramienta útil para lograrlo es mediante el diagrama de capas (o de la cebolla) mostrado en la figura 2.4. El diagrama muestra el orden jerárquico de la mayoría de los procesos químicos y su relación con la generación de efluentes.

Como se puede observar (Fig. 2.4a) el corazón del proceso es el reactor; el cual dicta el tipo de separación y recirculación a efectuar. Una vez que se fijan estas dos capas se conocen los balances de materia y energía que permiten diseñar el sistema de recuperación de calor y conocer la demanda de calor (la tercera capa). Después de agotar las posibilidades económicas para la recuperación de calor se adicionan los servicios auxiliares (hornos, rehedidores, sistemas de refrigeración, etc.), el cual forma la última capa del diagrama.

Mientras que hay un flujo de información desde el corazón del diagrama hacia las capas exteriores, también hay interacciones importantes que, para resolver la mayoría de los problemas, requieren de iteraciones hacia el centro del diagrama, alternativa y simultáneamente, (Fig. 2.4b). En el diagrama se pueden identificar dos clases de efluentes:

- 1) *Efluentes de Proceso* correspondientes a las dos primeras capas (Reacción y Separación) generados como sub-productos y corrientes de purga.
- 2) *Efluentes de Servicios* correspondientes a las dos capas externas (Redes de Intercambio de Calor y Servicios Auxiliares), formados por gases y polvo de combustibles, efluentes de agua para calderas, etc.

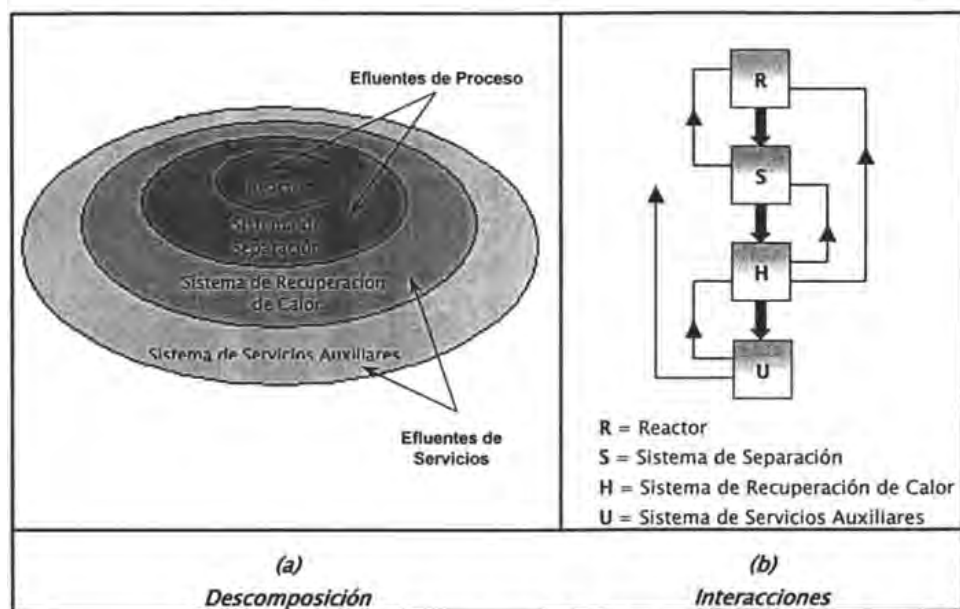


Figura 2.4. Diagrama de la Cebolla

Aunque el diseño de servicios auxiliares se encuentra ligado al diseño de las redes de intercambio de calor, en la práctica se consideran a las dos capas externas como fuentes de efluentes de servicios.

2.2.1 Efluentes de Proceso

Existen tres fuentes de generación de efluentes de proceso:

2.2.1.1 Reactores

Bajo condiciones de operación normal los reactores generan efluentes en varios formas:

- Si no es posible recircular nuevamente al reactor la materia prima que no reaccionó, entonces la baja conversión puede generar efluentes de la materia prima sin reaccionar.
- Se generan efluentes por la formación de sub-productos, ya sea por la reacción principal o por reacciones secundarias
- También se pueden generar los efluentes cuando las impurezas presentes en la materia prima reaccionan; cuando el catalizador se degrada o se pierde y requiere reemplazarse.

2.2.1.2 Sistemas de Separación y Recirculación

- Los sistemas de separación y recirculación generan efluentes debido a una mala recuperación y recirculación de material valioso de los efluentes.

2.2.1.3 Operaciones de proceso

- La tercera fuente de generación de efluentes de proceso cae dentro de la categoría de operaciones de proceso. Operaciones tales como arranque y paro de procesos continuos, cambio de producto, sacar de operación equipo para mantenimiento y llenado de tanques generan efluentes.

2.2.2 Efluentes de Servicios

- La fuente principal de efluentes de servicios auxiliares está asociada a corrientes o servicios auxiliares calientes y frías. Hornos, calderas, turbinas de gas y diesel generan gases de combustión. El vapor genera efluentes acuosos debido al tratamiento de agua de alimentación a calderas así como debido al purgado. El sistema de agua enfriamiento empleado en la mayoría de los procesos también generan efluentes acuosos mediante las purgas de las torres de enfriamiento. En general, los efluentes de servicios auxiliares suelen ser menos dañinos al ambiente que los de proceso.

Para reducir los efluentes en plantas industriales las operaciones de intercambio de masa desempeñan un papel importante en la separación de especies peligrosas o dañinas de las corrientes de proceso, mediante la transferencia de masa entre los materiales y las operaciones de proceso. Para diseñar un sistema óptimo de intercambio de masa se requiere la evaluación de tres factores importantes:

Primero y principal, se debe considerar solo aquellas operaciones donde sea termodinámicamente posible la reducción de efluentes.

Segundo, el diseñador debe seleccionar la operación de intercambio de masa óptima (o agentes de separación alternos) que deberá emplearse para separar al efluente.

Tercero, las unidades de intercambio de masa deben interconectarse de la mejor manera para obtener, en cuanto a costo, una solución efectiva en la minimización de residuos.

La metodología para analizar las opciones que permiten reducir la generación de efluentes cae dentro del campo de la *Integración de Masa ó Pinch de Transferencia de Masa*. Dentro de ésta área ha surgido un aplicación particular relacionada con el uso de agua a la cual se le ha dado el nombre de "**Pinch de Agua**" que ha resultado ser una metodología útil para reducir el consumo de agua fresca alimentada a una planta y en consecuencia reducir el volumen de agua residual generado. Su análisis considera el re-uso directo y también el potencial de re-uso con regeneración aun antes de alcanzar la saturación de contaminantes. El análisis hace posible minimizar el consumo de agua en un proceso mediante:

- El diseño óptimo de redes de agua
- El re-uso de agua en procesos secuenciales
- La elección de regeneradores (físico-químicos)
- La regeneración y re-uso de agua
- La regeneración y reciclaje de agua

2.3 Análisis Pinch de Agua

El-Halwagi y Manousiouthakis (1989) tomaron algunas ideas fundamentales del análisis termodinámico de redes de intercambio de calor para crear una nueva área: las redes de intercambio de masa. Posteriormente Wang y Smith (1994) tomaron las ideas de redes de transferencia de masa para aplicarlas al problema particular de redes de agua, con lo cual surgió el análisis "Pinch de Agua". El objetivo del diseño de redes de agua es reducir su consumo al maximizar el re-uso y, si además, se introducen tratamientos parciales (conocidos como regeneraciones) se pueden lograr aún mayores reducciones en el consumo de agua, permitiendo aumentar el re-uso y reciclaje.

En general una reducción de agua residual implica una reducción en la demanda de agua fresca lo cual puede lograrse por cuatro caminos:

1) *Cambios ó Mejoras al Proceso (equipo)*.- Los cambios en el proceso pueden reducir la demanda inherente de agua en las diferentes etapas del proceso así como en los equipos demandantes. Para lograrlo se deben estudiar las posibilidades de hacer mejoras o efectuar cambios en el proceso que permitan lograr la reducción en el uso de agua. Por ejemplo, mejorar boquillas, aumentar etapas de extracción o lavado, optimizar el sistema de vapor (aumentar el retorno de condensados, disminuir las purgas), uso de enfriadores de aire en lugar de los de agua, etc.

2) *Re-uso Directo*. El agua residual puede re-usarse directamente en otras operaciones siempre y cuando el nivel de contaminación del agua “gastada” no interfiera con el proceso. Esto reduce no solo el volumen de agua residual generada sino también la demanda de agua fresca en la operación (Figura 2.5).

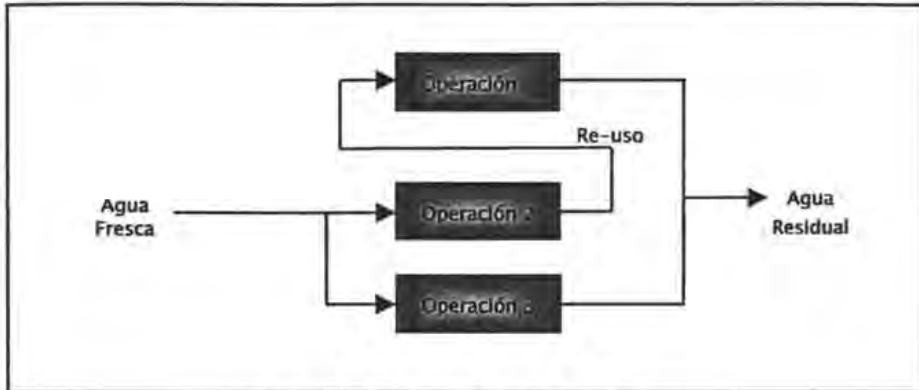


Figura 2.5 Re-uso Directo de Agua

3) *Re-uso con regeneración*. El agua residual puede regenerarse por medio de un tratamiento parcial o total para remover los contaminantes que afecten o limiten su uso en otra operación (que podrían impedir su re-uso). La regeneración es una operación de tratamiento que remueve contaminantes hasta un nivel donde sea posible re-usar el agua en otra operación, por ejemplo: filtración, ajuste de pH, osmosis inversa, etc (Figura 2.6).

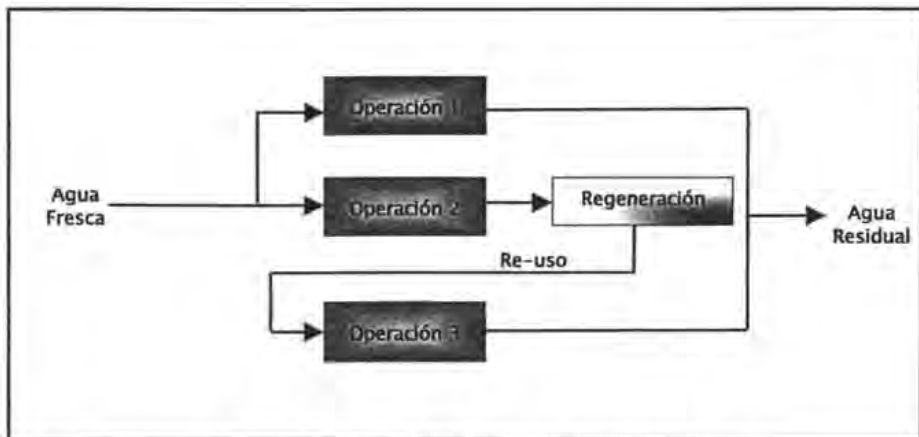


Figura 2.6 Re-uso de Agua con Regeneración

4) *Reciclaje con regeneración*. El agua residual puede regenerarse para remover los contaminantes formados y después puede reciclarse (Figura 2.7).

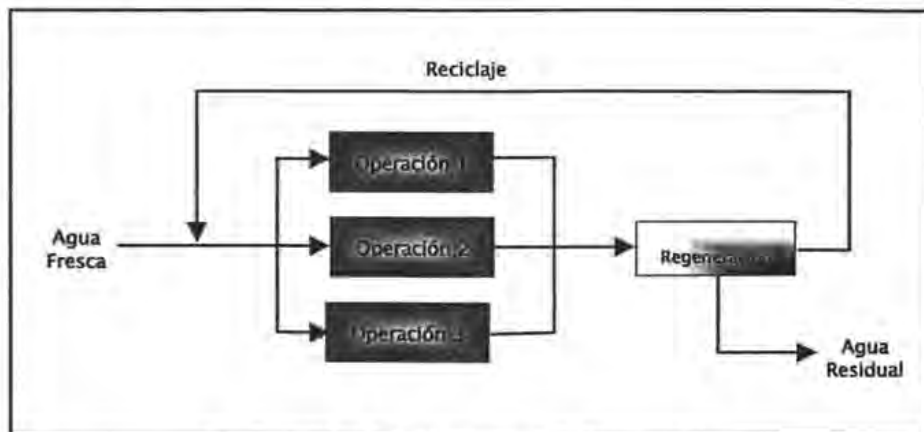


Figura 2.7 Reciclaje de Agua con Regeneración

Mediante estas cuatro opciones es posible disminuir el uso del agua fresca y las descargas de aguas residuales hasta un 50% o más, lo que también significa una reducción en la inversión de los sistemas de tratamiento.

El método pinch de agua permite analizar gráficamente diagramas de concentración de contaminante *versus* carga másica de contaminante para el intercambio de masa entre una corriente de proceso y una de agua. En particular, el análisis Pinch de Agua permite aplicar la metodología a un sistema y determinar:

- El flujo mínimo de agua fresca o cruda requerida en un proceso
- El flujo mínimo de agua residual generado en un proceso
- Una guía apropiada para una síntesis sistemática de redes de agua y sistemas de tratamiento de efluentes.

El análisis pinch de agua y su metodología y técnicas se basan en tres conceptos básicos, los cuales permiten lograr los objetivos establecidos:

- 1) Considera primero un panorama general, visualizando el proceso completo como un sistema integrado por unidades de proceso, interconectadas a los diferentes procesos, servicios auxiliares y corrientes de descarga.
- 2) Aplica los principios de la ingeniería de procesos, como la termodinámica y los balances de materia y energía, para ajustar los niveles de contaminante en cada proceso y establecer, a priori, los objetivos alcanzables en el uso de materia y energía y la generación de emisiones y efluentes (es decir, el consumo mínimo de servicios auxiliares, niveles mínimos de CO₂ y NO_x, requerimientos mínimos de agua fresca, etc.).
- 3) Finalizar los detalles del diseño de procesos (y después ajustarlos) para lograr el mejor arreglo del proceso y alcanzar las metas establecidas.

La metodología esta basada en el uso de perfiles de agua limitantes los cuales establecen los niveles de contaminante máximos permitidos a la entrada y a la salida del proceso. Estos perfiles representan las restricciones debido a la transferencia de masa mínima, incrustación de equipo, limitaciones de corrosión, etc.

Antes de aplicar el análisis pinch de agua se debe conocer el origen de la contaminación y para saber este origen se debe conocer bien el proceso y el uso de agua en él. Por ejemplo la figura 2.8 ilustra el uso de agua y la generación de efluentes acuosos en una planta química.

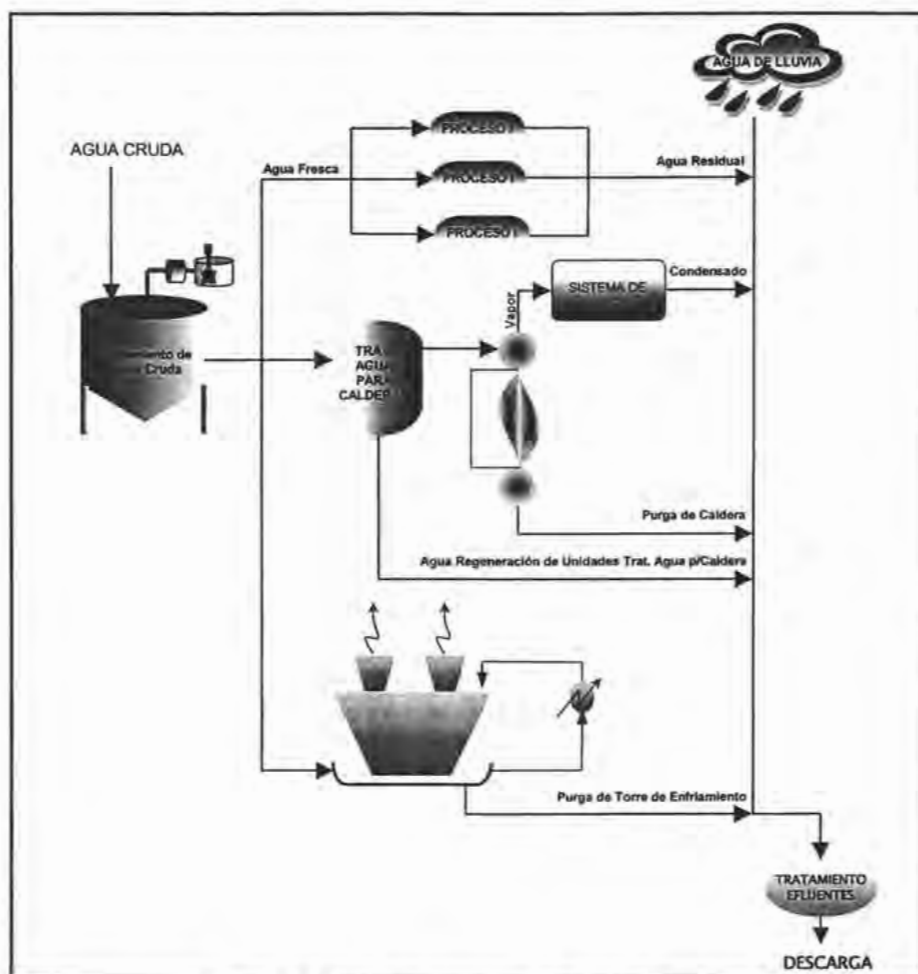


Figura 2.8. Uso de Agua en una Planta de Proceso

Como se puede observar en la figura 2.8 el uso del agua y la generación de efluentes acuosos en el proceso es como se describe a continuación:

- Al agua cruda se le proporciona normalmente algún tratamiento, que puede ser al menos filtración, antes de ser usada por los diferentes procesos (lavado de productos inorgánicos, limpieza de recipientes, operaciones de enjuague, etc.).
- El agua fresca que entra en contacto con estos procesos se contamina.
- Antes de entrar al sistema de generación de vapor al agua se le proporciona un tratamiento para alcanzar la calidad adecuada. El agua residual se genera en el sistema de tratamiento de generación de vapor (durante la regeneración de las resinas de intercambio iónico), purgas de calderas y pérdidas de condensados.
- Otra fuentes principal de generación de agua residual es en las purgas de las torres de enfriamiento.
- Finalmente las diferentes corrientes de agua residual generadas en la planta normalmente se mezclan junto con el agua de lluvia antes de enviarse al sistema de tratamiento de efluentes. El agua residual generada se caracteriza por el alto volumen y carga de contaminante a tratar.

Entre los mayores consumidores de agua en una planta o complejo figuran las torres de enfriamiento, y debido a la magnitud de las pérdidas por arrastre y evaporación estos equipos representan uno de los mayores consumidores de agua, por lo que limitan el obtener mayores ahorros.

Conociendo el proceso se puede aplicar la metodología del Pinch de Agua para reducir el consumo de agua fresca y que tiene como consecuencia una reducción en el volumen de agua residual, sin efectos negativos en el proceso.

Se cuentan muy pocas las industrias que han usado métodos de re-uso de agua. Al parecer PEMEX es uno de los iniciadores y pioneros en el empleo de la tecnología pinch de agua en México, y sin embargo la dificultad que presenta esta empresa es que el re-uso y tratamiento de agua no se encuentran dentro de sus proyectos prioritarios, ya que la atención y las inversiones en esta área es casi nula. Dentro de las diversas plantas con las que cuenta PEMEX, uno de los complejos que comienzan a llevar la vanguardia en esta área es el de Poza Rica, ya que ha invertido hasta un nivel de ingeniería de detalle y tiene planes de llevar a cabo la construcción de las propuestas surgidas del uso de la tecnología pinch.

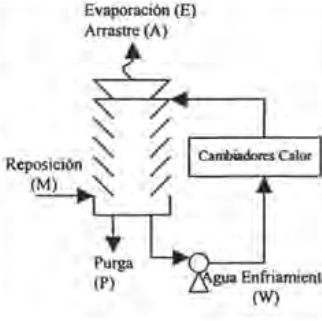
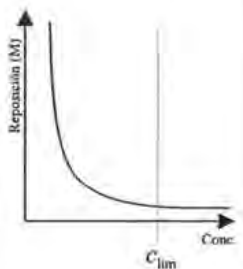
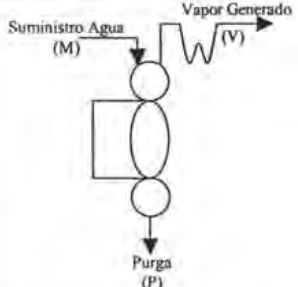
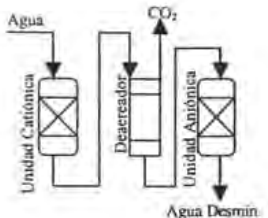
2.3.1. Perfiles de Agua Limitantes

Para cada una de los servicios mostrados en la Figura 2.8, incluyendo el agua residual, existen concentraciones limitantes, las cuales representan los niveles donde pueden operar los equipos sin que presenten problemas para su operación. Estas concentraciones son fundamentales para aplicar la metodología y permitir la reducción en el volumen de agua alimentada y de agua residual generada y por consiguiente el costo de tratamiento del agua fresca y residual.

La naturaleza de las concentraciones limitantes pueden ser *físicas* (por ejemplo, solubilidad máxima de soluto en el solvente), *económicas* (para optimizar el costo de alguna separación

sub-secuente en una corriente de efluentes), *técnica* (para evitar corrosión excesiva, viscosidad ó incrustación) y *ambiental* (como lo establecen las regulaciones de protección ambiental). El establecimiento de las concentraciones químicas limitantes en algunas operaciones presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Concentraciones Limitantes en Diferentes Operaciones de Proceso

ESQUEMA	EXPRESIONES MATEMATICAS	CONCENTRACIONES LIMITANTES
Sistema Enfriamiento		
	$W = \frac{\sum Q}{\Delta T}$ $E + A + P = M$ $Ac_{i,A} + Pc_{i,P} = Mc_{i,M}$ $c_{i,A} = c_{i,P}$ $\text{Ciclos Conc} = \frac{c_{i,P}}{c_{i,M}} = \frac{M}{A + P}$	
Caldera (Generación Vapor)		
	$M = V + P$ <p>Del ABMA:</p> $c_{i,M}^{lim} = f(\text{presión})$ $c_{i,P}^{lim} = f(\text{presión})$	<p>Valores establecidos por los estándares y códigos tales como ASME y ABMA</p>
Unidad de Intercambio Iónico		
	<p>Unidad Cationica:</p> $c_{Mg}^{lim} = f(\text{resina})$ $c_{Ca}^{lim} = f(\text{resina})$ $c_{Na}^{lim} = f(\text{resina})$ <p>Unidad Aniónica</p> $c_{OH}^{lim} = f(\text{resina})$ $c_{Cl}^{lim} = f(\text{resina})$ $c_{SO_4}^{lim} = f(\text{resina})$	<p>Valores establecidos por los fabricantes de las resinas de intercambio iónico.</p>

Las concentraciones limitantes permiten establecer el rango donde es técnicamente posible realizar la separación de componentes indeseables en un sistema de transferencia de masa. Los sistemas de agua se hacen mas eficientes al conocer estas concentraciones limitantes y aplicando el análisis pinch de agua. Asimismo permiten conocer el potencial de reuso de agua logrando con ello reducir la descarga de efluentes.

2.4 Modelo de Optimización Matemática para la minimización del consumo de agua

2.4.1 Modelo Expandido de transbordo aplicado a redes de intercambio de agua

Con el siguiente ejemplo se presenta una estrategia alterna para resolver el problema de encontrar el consumo mínimo de agua. Esta estrategia se basa en el modelo expandido de transbordo, el cual puede ser utilizado tomando en cuenta las analogías con el problema de redes de intercambio de calor.

Problema (Ejemplo ilustrativo)

Supóngase un conjunto de cuatro corrientes de proceso que usan agua (C_1 , C_2 , C_3 y C_4) donde se presenta un intercambio de masa de un componente no deseado (o contaminante), esto es, que aumentan su concentración de salida. Se supone que la diferencia de concentraciones de entrada (C^S) y salida (C^T) es tal y como se indica en la tabla 2.2. Además también se supone que se tiene disponible agua fresca a una concentración de contaminante igual a 0 ppm (C^{SA}), tal y como se indica en la tabla 2.3.

Tabla 2.2 Datos de las Corrientes de Proceso

Corriente	Flujo (Ton/h)	C^S (ppm)	C^T (ppm)
C_1	20	0	800
C_2	100	50	100
C_3	40	50	800
C_4	10	400	800

Tabla 2.3 Datos del Agua Fresca

Fuente de Agua	C^{SA} (ppm)	Costo [\$/ (Ton/h)*año]
Agua Fresca	0	100

El objetivo es diseñar una red de intercambio de agua para manejar las corrientes de proceso desde su concentración de suministro (C^S) hasta su concentración objetivo (C^T), de tal manera que se tenga un consumo mínimo de agua fresca, manteniendo las restricciones impuestas por el proceso.

2.4.1.1 Analogía

Se puede hacer la siguiente analogía de transferencia de calor con el modelo del transbordo para la transferencia de masa del contaminante. La masa del contaminante se puede considerar como la mercancía que ha de transportarse desde las corrientes ricas en contaminante (de proceso) hasta las corrientes pobres en contaminante (de proceso), a través de los intervalos de concentración. De esta manera, el modelo del transbordo aplicado a la red de intercambio de masa de contaminante toma las corrientes ricas en contaminante como las fuentes, los intervalos de concentración como los nodos intermedios y a las corrientes pobres y el agua fresca como los destinos (figura 2.9).

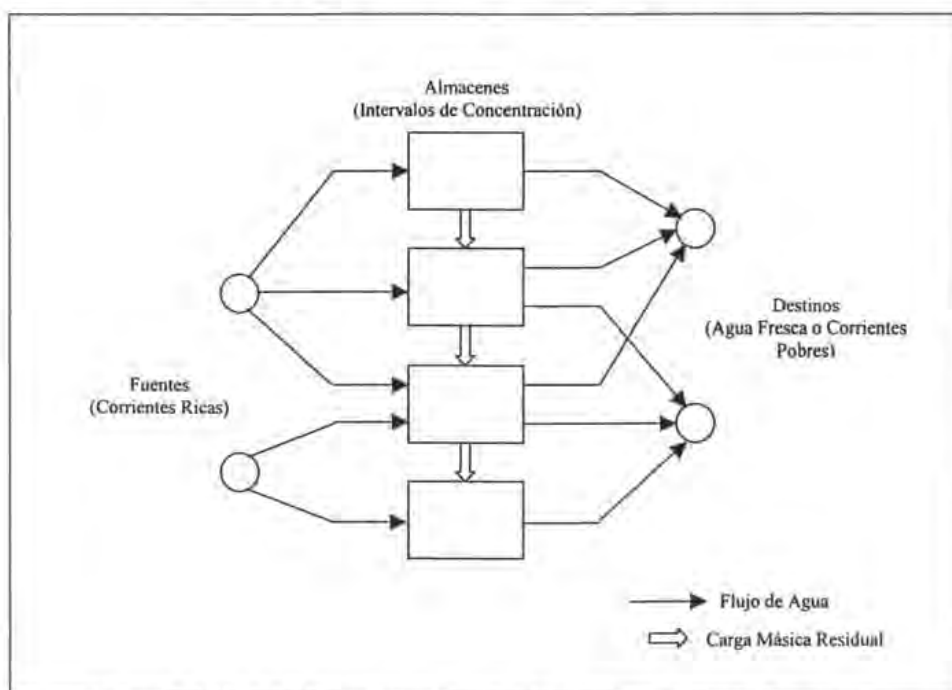


Figura 2.9 Modelo de transbordo aplicado a la transferencia de masa de contaminante

La identificación de los rangos de concentraciones de cada una de las corrientes para establecer los intervalos se realiza de acuerdo con las reglas propuestas por Manousiouthakis y El-Halwagi (1989), iniciadores de la integración de masa, aprovechando la analogía existente con la transferencia de calor. Para el ejemplo que estamos trabajando los intervalos de concentración se construyen de acuerdo a lo indicado en la tabla 2.4 de intervalo de concentraciones.

Tabla 2.4 Identificación de los intervalos de concentración

Intervalos (Int.) de Concentración (ppm)						
Int.	Conc. (ppm)	C ₁ (20)	C ₂ (100)	C ₃ (40)	C ₄ (10)	Carga Masica (Kg/hr)
	0	↓				
1						1
	50		↓			
2						8
	100		▼			
3						18
	400				↓	
4						28
	800	▼		▼	▼	

El modelo original toma en cuenta la segunda ley de la termodinámica para la transferencia de calor, la cual restringe el flujo de calor entre intervalos, desde una temperatura dada hasta otra temperatura inferior.

En el caso que nos ocupa esta restricción va a depender de cada operación y de sus concentraciones limitantes (Figura 2.10).

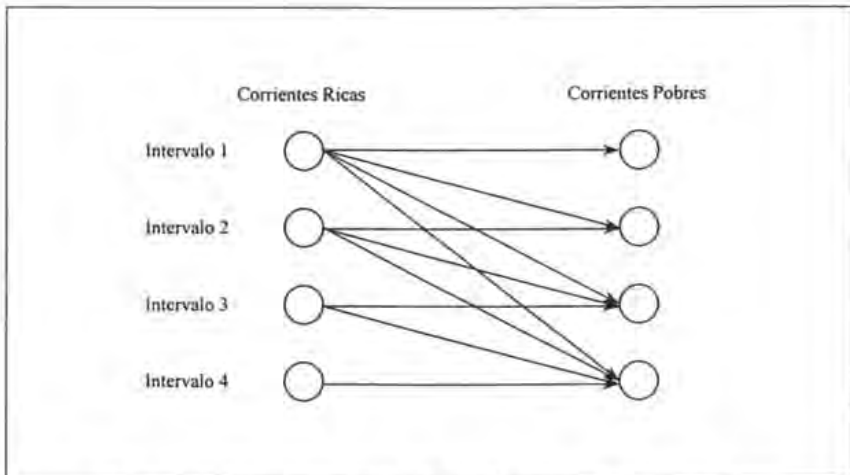


Figura 2.10 Restricción en el flujo de masa en los intervalos de concentración

2.4.1.2 Representación Gráfica

Para entender mejor la forma en que se construye el modelo matemático se presenta una representación grafica del modelo expandido de transbordo aplicado a redes de intercambio de masa (Figura 2.11).

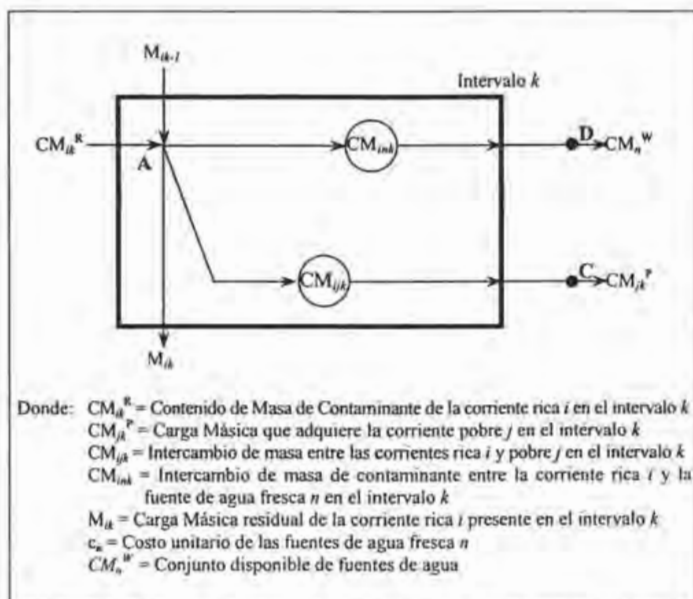


Figura 2.11 Flujo de Masa en el intervalo "k" para el modelo expandido de transbordo

Modelo Matemático

Función Objetivo

$$\text{Min. } z = \sum_{n \in W} c_n CM_n^W \quad (2.1)$$

Restricciones

Corrientes Ricas

$$M_{ik} - M_{i,k-1} + \sum_{j \in C_i} CM_{ij,k} + \sum_{n \in W_i} CM_{in,k} = CM_{ik}^R \quad (2.2)$$

Corrientes Pobres

$$\sum_{i \in C_j} CM_{ij,k} = CM_{jk}^P \quad (2.3)$$

Fuentes de Agua fresca

$$\sum_{i \in C_1} CM_{ink} - CM_n^W = 0 \quad (2.4)$$

Cotas de Intercambio de Masa

$$CM_{ij}^L \leq \sum_{k=1}^K CM_{ijk} \leq CM_{ij}^U \quad (2.5)$$

La función objetivo (ecuación 2.1) es una ecuación que involucra a las fuentes de agua fresca y el costo de cada una de ellas. En esta ecuación se supone un conjunto disponible "W" de fuentes de agua. La variable n se refiere a cada fuentes de agua dentro del conjunto "W".

La **ecuación 2.2** simboliza el conjunto de restricciones que representan balances de materia para las corrientes ricas. Se obtuvo al realizar un balance de materia sobre el punto "A" de la representación gráfica. Se puede plantear un balance de materia para cada corriente rica que esté presente en ese intervalo. La ecuación representa al conjunto de los balances de materia realizados sobre las corrientes ricas en cada uno de los intervalos. El tamaño de este conjunto depende del número de intervalos en los que esté presente cada una de dichas corrientes (su presencia puede ser a través de la carga másica residual). Para el caso del ejemplo ilustrativo la corriente rica "C₁" participa de todos los intervalos mientras que la corriente rica "C₃" lo hace a partir del segundo intervalo y hasta el último. Por lo tanto el número de restricciones que se generan será de siete, todas ellas con respecto a los balances de materia sobre las corrientes ricas.

De igual manera que para las corrientes ricas, existe un conjunto de restricciones que describen el flujo de masa para las corrientes pobres. Dicho conjunto está representado por la **ecuación 2.3**, obtenida a partir del balance de materia realizado en el punto "C" de la representación gráfica. A partir de esta ecuación y una vez identificado el punto "C" en cualquiera de los intervalos de la representación, se puede generar una restricción por cada corriente pobre que esté presente en el intervalo dado.

El conjunto de restricciones que condicionan a las fuentes de agua fresca está representado por la **ecuación 2.4**. Esta ecuación se obtiene a partir del balance de materia que se realiza sobre el punto "D" en la representación gráfica. Para el caso del ejemplo ilustrativo se genera solamente una restricción para las fuentes de agua fresca.

Para que el modelo pueda establecer un nivel de intercambio de masa entre dos corrientes de proceso, es necesaria la **inecuación 2.5**. Como el intercambio total de masa entre dos corrientes de proceso es la suma de "CM_{ijk}" sobre todos los intervalos, para especificar un nivel de intercambio de masa entre dichas corrientes, basta especificar que dicha suma debe caer en una cota superior "CM_{ij}^U" y una cota inferior "CM_{ij}^L" o simplemente con fijar un valor a dicha suma.

El sistema se resuelve mediante técnicas de programación matemática, para obtener la carga y costo mínimo por consumo de agua fresca, concentración y carga másica residual por intervalo.

CAPITULO III. MINIMIZACION DE AGUA EN SISTEMAS DE UN SOLO CONTAMINANTE

El análisis pinch actualmente ya es una herramienta madura y efectiva para obtener la energía mínima en un proceso mediante procedimientos de diseño sistemáticos. Aprovechando la semejanza entre los principios de transferencia de calor y masa, el análisis pinch se adaptó para reducir el consumo de agua fresca y la generación de agua residual.

Antes de re-usar o tratar agua contaminada, primero se debe asegurar que el consumo de agua fresca ha sido minimizada. La reducción de agua residual representa un beneficio dual, tanto en los costos del tratamiento de agua residual como en los de agua cruda. Como se mencionó en el capítulo 2, el agua residual se genera en las unidades de proceso y en los sistemas de servicios auxiliares. Si tomamos como ejemplo una refinería, el agua residual se genera, en el proceso, cuando entra en contacto en las operaciones de desalación, agotación y en operaciones de lavado. También se genera en los sistemas de servicios auxiliares debido a los sistemas de tratamiento para alimentación a calderas, purgas de calderas, purgas de torres de enfriamiento, etc. Si se excluye la posibilidad de hacer cambios fundamentales al proceso para reducir la demanda inherente de agua, existen tres posibilidades para reducir su consumo y la generación de agua residual: re-uso, re-uso con regeneración y regeneración con reciclaje.

Es importante distinguir entre estos casos. En algunos procesos o sistemas se puede permitir el re-uso o reciclaje entre las operaciones, pero en otros no debido al contenido de contaminantes presentes en el agua.

El problema de la segregación óptima de agua en una refinería fue estudiada por Takama (1980). En este se efectuaba una aproximación donde se generaba primero una superestructura de todas las posibles oportunidades de re-uso y regeneración y posteriormente esta superestructura se optimizaba y las posibilidades que no eran viables económicamente se desechaban. Posteriormente El-Halwagi y Manousiouthakis (1989) establecieron un problema más general de intercambio de masa entre un conjunto de corrientes ricas y uno de corrientes pobres la cual fue adaptada de las redes de intercambio de calor desarrollada por Linnhoff y Hindmarsh (1983). El-Halwagi y Manousiouthakis definieron una diferencia de concentración mínima permisible y la aplicaron a redes de intercambio de masa, sin embargo el método solo se aplicaba para un solo componente. Más tarde El-Halwagi y Manousiouthakis (1990) automatizaron la aproximación e incluyeron regeneración. En una primera etapa usaron restricciones termodinámicas para formular un problema de programación lineal (PL) cuya solución determinaba el costo mínimo así como el punto pinch, que limitaba el intercambio de masa entre las corrientes ricas y pobres; en una segunda etapa se formuló y resolvió un problema de programación lineal entera de transbordo de mezcla de enteros (PLME) para identificar el número mínimo de unidades de intercambio de masa. El-Halwagi (1992) aplicaron más tarde esta aproximación para un problema específico de tratamiento de fenol en agua residual de una refinería.

Wang y Smith (1994) tomaron las ideas de El-Halwagi y Manousiouthakis para aplicarlas a redes de agua. Wang y Smith consideraron el caso de un solo contaminante y una sola corriente para presentar una aproximación conceptual aplicándola a problemas de minimización de agua.

En la primera etapa de esta aproximación se emplea una construcción gráfica para representar los datos limitantes del problema, esto es, las concentraciones máximas permisibles a las cuales una operación puede aceptar el agua alimentada y la concentración a la cual puede descargarla. Después se identifica el punto pinch para obtener el flujo mínimo "objetivo" o flujo mínimo requerido por el sistema para satisfacer sus requerimientos de agua y que se usara para diseñar el mejor arreglo o interconexión entre las operaciones para manejar este flujo en el sistema.

Para el presente trabajo se usará la aproximación de Wang y Smith para la minimización de agua cruda y donde se aprovechan las diferencias de concentración mínimas de las corrientes de cada una de las unidades que componen el proceso.

Para entender los fundamentos primero se darán los fundamentos teóricos considerando procesos que manejan un solo contaminante y posteriormente se extenderá a procesos que manejan contaminantes múltiples y a procesos con regeneración y reciclaje.

3.1 Modelo

3.1.1 Intercambiador de Masa

Considere un número de corrientes de proceso ricas en contaminante que necesitan reducir el contenido de ciertas especies en un intercambiador de masa mediante un agente de separación de masa (ASM) o corriente pobre en contaminante. Sin pérdidas generales, se asume que este agente de separación de masa es agua, usada en muchas operaciones en las industrias de proceso, tales como lavado, absorción, agotamiento por vapor, etc. Cada corriente rica en contaminante tiene un flujo másico G_i y deben llevarse desde una composición de suministro y_i^{ent} a una composición deseada y_i^{sal} . Por consiguiente cada corriente de agua pobre en contaminante tiene un flujo másico L_i , una composición inicial x_i^{ent} y una composición final x_i^{sal} . Considérese el intercambiador de masa de la Fig. 3.1.



Figura 3.1. Un intercambiador de masa

La masa que será transferida en esta unidad, Δm , se determina estableciendo un balance de masa en el soluto (contaminante):

$$\Delta m = G_i(y_i^{ent} - y_i^{sal}) = L_i(x_i^{sal} - x_i^{ent}) \quad (3.1)$$

Para este modelo se considera que el flujo másico de cada corriente que pasa a través del intercambiador de masa permanece sin cambio esencial. Esta suposición es razonable, cuando se presentan variaciones de composición relativamente pequeñas o cuando existe alguna contradifusión desde las corrientes pobres a las ricas. En caso que los cambios en flujo sean considerables, es necesario usar flujos másicos de los componentes no transferibles (inertes) en lugar de usar las corrientes totales o relaciones de masa (masa de componente transferible/masa de componente inerte) en vez de fracciones de masa.

La ecuación 3.1 indica que para una cierta concentración de entrada de agua (corriente pobre) x_i^{ent} , si aumenta la concentración de salida, x_i^{sal} , disminuirá el flujo de agua para la misma masa intercambiada, alcanzando un flujo mínimo de agua cuando la composición de salida de agua se encuentra en su máximo, $x_i^{sal,max}$. Maximizando la composición de salida siempre es la mejor opción. Cuando se use agua fresca, $x_i^{ent}=0$, y se usa la concentración máxima de salida, esto llevará a minimizar tanto el consumo de agua y traerá como consecuencia una reducción en la generación de agua residual. Si la concentración de agua residual generada resulta mayor que el límite de descarga ambiental, esta puede llevarse a un sistema de tratamiento de efluentes distribuido resultando en un menor flujo y por consecuencia una menor inversión y costos de operación [Wang y Smith 1994b]. De este modo, la composición de salida debe ser siempre fijado a su valor máximo:

$$x_i^{sal} = x_i^{sal,max} \quad (3.2)$$

Para una cierta x_i^{sal} , el flujo mínimo se alcanza cuando se usa agua fresca, $x_i^{ent}=0$. Aunque, en este caso, el agua fresca lleva a una generación de agua residual mínima para una operación simple, esto no es necesariamente cierto cuando en el sistema hay mas de una operación. Si fuera posible reutilizar ó re-usar parte del agua residual en otras operaciones (siempre y cuando estas lo permitieran), se reduciría el consumo de agua fresca y el proceso global generaría menos agua residual. Por lo anterior se deben determinar las posibilidades de reutilización de agua residual al maximizar las composiciones de entrada, $x_i^{ent,max}$.

Supóngase que en el rango de composiciones involucrado, la relación de equilibrio que gobierna la distribución de soluto entre la corriente rica y la corriente pobre (de agua) es lineal (si la relación no es lineal, siempre puede linealizarse sobre un pequeño rango de composición variando los coeficientes de un rango a otro). En un diagrama de ordenadas-abcisas, la ecuación 3.1 representa una línea de operación que se extiende entre los puntos (y_i^{ent}, x_i^{sal}) y (y_i^{sal}, x_i^{ent}) y tiene una pendiente de L_i/G_i , entonces la relación puede representarse como una ecuación de la línea recta:

$$y = (pend)x + b \quad (3.3)$$

donde se considera que tanto $(pend)$ y b son constantes. La ecuación 3.1 tiene tres incógnitas: y_i^{sal} , L_i y x_i^{sal} . Si se fija la composición de salida, y_i^{sal} , entonces la composición máxima de salida teóricamente alcanzable por la corriente pobre, x_i^{sal} , sería la que este en

equilibrio con la y_i^{ent} . Esto quiere decir que todo el contaminante sería transferido a la corriente pobre. Dicho de otro modo, la concentración de salida de la corriente pobre será igual a la de entrada de la corriente rica. Entonces la transferencia de masa solo puede alcanzarse con un cambiador infinitamente grande. Lo mismo aplicaría cuando se especifica la composición de salida, x_i^{sal} . Por lo tanto es necesario asignar un valor mínimo para la diferencia de composiciones entre la línea de operación y la de equilibrio en la corriente de agua, ε , para prevenir el diseño de una unidad excesivamente grande. Para ello se necesitan satisfacer dos condiciones:

$$x_i^{ent} \leq x_i^{ent,max} = \frac{y_i^{sal} - b}{(pend)} - \varepsilon \quad (3.4)$$

y

$$x_i^{sal} \leq x_i^{sal,max} = \frac{y_i^{ent} - b}{(pend)} - \varepsilon \quad (3.5)$$

La selección de la diferencia de concentraciones en un intercambiador de masa determinará la relación entre los costos fijos y los de operación del sistema. Por lo tanto la diferencia de composición mínima permisible, ε , es un parámetro optimizable [El-Halwagi y Manousiouthakis, 1989]. Cuando es cercano a cero, se requerirá un separador infinitamente grande y consecuentemente, el costo de inversión de la red de intercambio de masa será infinito; sin embargo el costo de los servicios serán mínimos. Cuando el ε se incrementa, los costos de operación se incrementaran, mientras que los costos fijos decrecen. En general, el costo anualizado pasará a un mínimo, que corresponde al valor óptimo, cuando la diferencia de composición sea la mínima permisible. Se puede especificar un valor menor si es que se presenta algún problema, tal como excesiva incrustación de equipo, limitaciones de corrosión, posible precipitación del material en solución, posible sedimentación de material sólido, etc.

La relación entre costos de inversión y de operación se puede obtener usando los métodos desarrollados por Hallale y Fraser (1998) mediante el metodo "Supertargeting", para encontrar el costo de inversión antes del diseño. En el valor óptimo de ε , los métodos de diseño que usan el flujo mínimo de agua y el número mínimo de unidades llevan a una red que tiene un costo de inversión lo bastante cercano al costo objetivo.

3.1.2 Operación que usa agua

Para el caso específico de una operación que usa agua, se empleara el modelo del intercambiador de masa mostrado en la figura 3.1, pero a fin de mantener la misma notación de Wang y Smith, se usarán concentraciones en lugar de composiciones, de modo que se substituirá $x_i^{ent,max}$ por $C_{ENT,max}$ y $x_i^{sal,max}$ por $C_{SAL,max}$. Cuando $C_{ENT,i} = C_{ENT,max,i}$, el flujo de agua L_i , es el mínimo requerido ó limitante y se debe representar como f_i .

Considérese la operación que emplea agua mostrada en la figura 3.2. La corriente de proceso de proceso entra en contacto con la de agua a fin de reducir su nivel de contaminante, y por lo tanto, el agua llega a contaminarse. Esta operación podría ser, por ejemplo, el desalador de una refinería, donde el crudo se mezcla con agua para extraer la sal (del agua) emulsificada en el aceite. El aceite y el agua son entonces sedimentados, con la

ayuda de un campo eléctrico, separándose en dos fases. La figura 3.3 es una representación gráfica de este proceso en términos de concentración de contaminante vs masa de contaminante transferida (que para el ejemplo del desalador, el contaminante sería la sal). Aunque en la práctica la masa transferida en el desalador involucra un mayor número de contaminantes, aquí se supondrá que el contaminante principal ó clave es la sal, a modo de tratar con un solo contaminante.

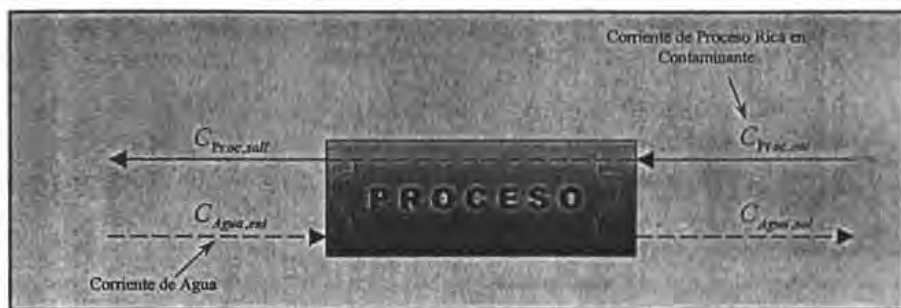


Figura 3.2. Unidad de Proceso que emplea agua

Las concentraciones de contaminante de la corriente de proceso a la entrada y a la salida son determinadas por los requerimientos del proceso mismo, al igual que la carga másica de contaminante transferido. La figura 3.3 muestra una posible combinación de las concentraciones de entrada y salida del agua para satisfacer los requerimientos de transferencia de masa. Si se determinan las concentraciones de entrada y salida del agua y la masa de contaminante a transferir, entonces se puede determinar el flujo de agua.

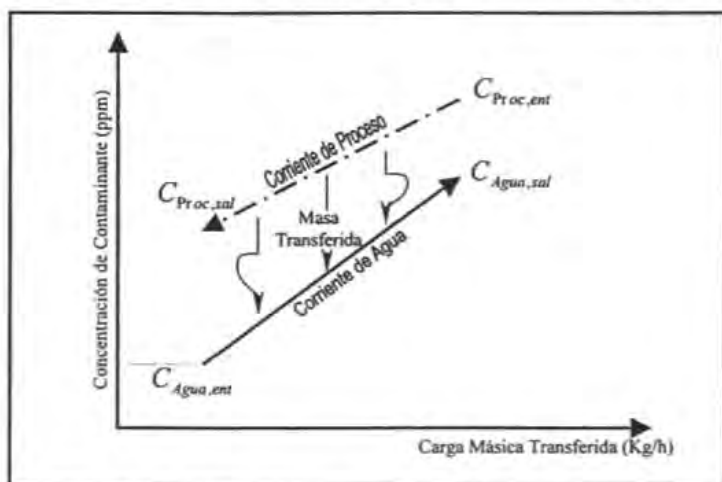


Figura 3.3. Unidad de Proceso que emplea agua representado como Concentración versus Masa de Contaminante

Basado en la representación de la figura 3.3, se puede deducir que diferentes flujos de agua a diferentes concentraciones de contaminante pueden resolver el mismo problema de transferencia de masa de contaminante (Figura 3.4).

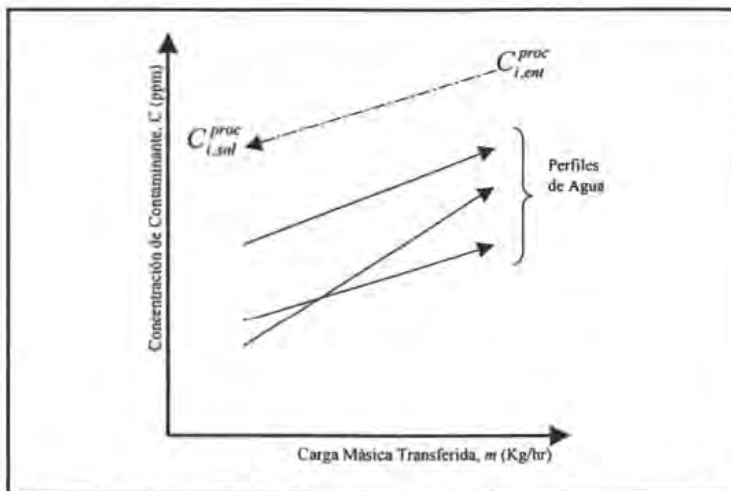


Figura 3.4 Diferentes niveles de contaminante presentes en el agua así como diferentes flujos pueden resolver el mismo problema de transferencia de masa.

Con el fin de aumentar la posibilidad de re-usar el agua desde una operación a otra se debe especificar el agua con la mayor concentración de entrada posible (tal como se vio en el apartado 3.1.1) y, entonces, especificando la mayor concentración de salida posible, se minimiza el flujo de agua a la máxima concentración de entrada (Figura 3.5). El perfil de agua mostrado en la figura 3.5 no necesariamente es el perfil de agua que se usa en el diseño final; simplemente representa el caso límite, por lo cual se designa como *perfil de agua limitante*.

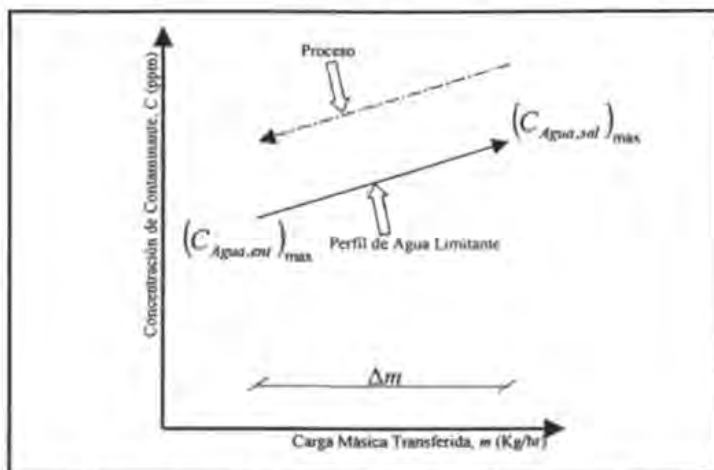


Figura 3.5 Maximizando las concentraciones de entrada y salida de agua se obtiene el flujo mínimo de agua o perfil de agua limitante

Cualquier línea de suministro de agua debajo del perfil de agua limitante cumplirá con los requerimientos del proceso. La figura 3.6 muestra dos ejemplos de líneas de suministro de agua que satisfacen los requerimientos del proceso.

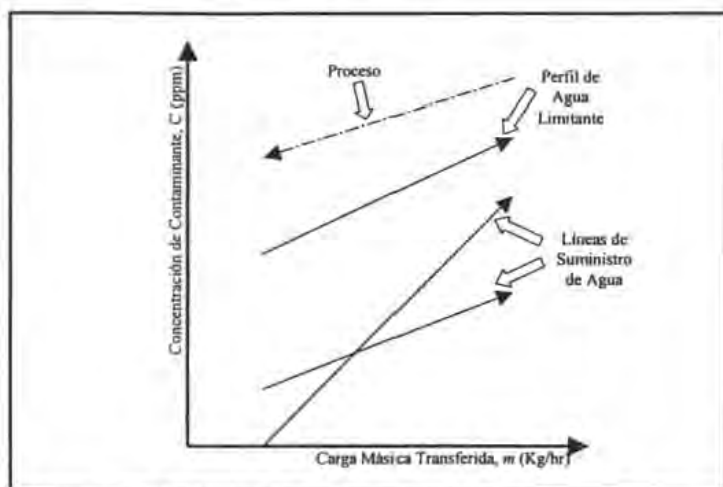


Figura 3.6. Cualquier línea de agua abajo del perfil de agua limitante satisface los requerimientos del proceso

Para que se efectúe la transferencia de masa, el agua fresca de entrada debe tener una concentración de contaminantes menor a la de salida del proceso y el agua de salida debe tener una concentración de contaminante menor a la de entrada del proceso (diferencia de composición mínima permisible). De este modo la unidad de intercambio de masa (desalador, absorbedor, agotador, etc) transfiere el contaminante a la corriente de agua, de modo que los límites de concentración de contaminante en las corrientes de entrada y salida lo establecen la solubilidad, la corrosión, la incrustación, etc. Las concentraciones máximas de entrada y salida de las especies indeseables las debe asignar el diseñador basado en las circunstancias o condiciones de la aplicación. La naturaleza de dichas circunstancias pueden ser físicas (por ejemplo, máxima solubilidad del contaminante en la operación), técnicas (es decir, evitar corrosión, viscosidad o incrustación excesivas), ambientales (es decir, para cumplir con la regulación ambiental), de seguridad (es decir, para mantenerla alejada de los límites de flamabilidad) o económicas (es decir, para optimizar el costo de subsiguientes regeneraciones). De este modo las restricciones se pueden fijar tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) Diferencia de concentraciones para la transferencia de masa mínima (que puede variar entre los diferentes procesos)
- b) Máxima solubilidad
- c) Necesidad de evitar precipitación del material en solución
- d) Incrustación de equipo
- e) Limitaciones por corrosión
- f) Requerimientos de flujo mínimo para evitar sedimentación de materiales sólidos

- g) Cumplimiento con alguna normatividad
- h) Por factores de seguridad
- i) Por razones económicas

Para obtener el flujo mínimo de agua se usarán perfiles de agua limitante en lugar de las corrientes de proceso, debido a que los mecanismos de transferencia de masa son diferentes en las operaciones de proceso de un sistema (por ejemplo un desalador contra un agotador de vapor) y las restricciones debido a la transferencia de masa (limitaciones por corrosión, etc.) son variables, por lo que se necesita un medio para que las operaciones puedan manejarse de modo uniforme.

Existe una relación entre el perfil de agua limitante y la línea de proceso de una operación i (Figura 3.6), tal y como se vio en el apartado 3.1.1. La relación es lineal y resulta inversa entre el flujo de agua limitante f_i y la pendiente de la línea de agua. Expresado en términos algebraicos:

$$pend = \frac{\Delta C}{\Delta m} \quad (3.6)$$

por lo que el flujo es,

$$f_i = \frac{\Delta m}{\Delta C} \times 10^3 = \frac{1}{pend} \times 10^3 \quad (3.7)$$

y

$$f_i = \left(\frac{\Delta m}{C_{Agua,Sal} - C_{Agua,Ent}} \right) \times 10^3 \quad (3.8)$$

donde

- $C_{Agua,Ent}$, $C_{Agua,Sal}$ = Concentraciones de contaminante del agua fresca a la entrada y a la salida, respectivamente, de una operación i , en ppm.
- m = Carga Másica de contaminante, en Kg/hr
- f_i = Flujo de Agua Limitante de la Operación i , en Ton/hr

El flujo de agua limitante, f_i , es entonces el flujo de agua necesario para lograr la transferencia de masa de contaminante requerida Δm , dadas las concentraciones de entrada y de salida máximas (ó limitantes).

Como las concentraciones limitantes representan las concentraciones mas altas posibles que permiten que suceda la transferencia de masa desde una corriente rica en contaminante (proceso) hasta una corriente pobre en contaminante (agua), el potencial para la transferencia de masa es la mínima posible.

Se debe tener presente que en esta etapa de diseño el nivel de detalle con la cual se obtiene el modelo de las redes de agua es simple. Una vez que se ha establecido la estructura para la red, se puede efectuar un diseño mas detallado mediante un modelo mas elaborado.

3.2 Flujo Mínimo de Agua sin Re-uso

Cuando en 1994 Wang y Smith desarrollaron un nuevo método para la integración de agua el concepto que manejaron fue el re-uso de agua para reducir su consumo y la generación de efluentes. Este concepto puede aplicarse a casi cualquier sistema industrial que maneje agua, donde se tengan usuarios de agua fresca y generadores de agua residual. Esta tecnología también es capaz de analizar sistemas de agua mas complejos y puede aplicarse a diferentes tipos de industrias.

El primer paso el desarrollo de un sistema que maneje los requerimientos mínimos de agua fresca es analizarlo sin considerar su re-uso y empleando las concentraciones máximas permisibles de entrada y salida de la especie considerada como contaminante principal o "contaminante clave", asegurado que las diferencias de concentración de masa se satisfagan, aun cuando las unidades de transferencia de masa a ser manejadas o dischadas tengan diferentes mecanismos de transferencia de masa y mínimas diferencias de concentraciones para que se lleve a cabo la transferencia.

Se aplicara el modelo descrito en el apartado 3.1 al siguiente caso, para ejemplificar la aplicación de las técnicas para obtener el flujo mínimo del sistema, pero sin considerar, en este momento, el re-uso de agua que sale de alguna operación en otra operación:

Considérese un sistema con cuatro procesos que usan agua llamados proceso 1, 2, 3 y 4 y que contienen un solo contaminante (contaminante principal), como se muestra en los datos de la tabla 3.1. Los valores indicados en la tabla representan los datos limitantes, esto es, el valor de la concentración de contaminante de entrada y salida son los máximos y mínimos requeridos por los diferentes procesos. Se considera que la transferencia de masa es una función lineal respecto a la concentración (válido en sistemas diluidos). Si el comportamiento fuera significativamente no-lineal el método puede emplearse pero representando al proceso no-lineal como una serie de segmentos lineales. El flujo de agua se obtiene aplicando la ecuación 3.8 a cada una de las operaciones.

Tabla 3.1 Datos de Proceso para el ejemplo 1

Número Proceso u operación	Carga Másica de Contaminante C_m (Kg/hr)	C_{em} (ppm)	C_{sa} (ppm)	Flujo de Agua (Ton/hr)
1	2	0	100	20
2	5	50	100	100
3	30	50	800	40
4	4	400	800	10

La figura 3.7 muestra una gráfica del perfil de agua limitante de cada una de las operaciones (línea discontinua) de la tabla 1. También se muestran las líneas de suministro de agua (línea continua) para cada operación suponiendo que están libres de contaminante, esto es, que se emplea agua fresca y que se ha minimizado el flujo en cada caso considerando que su concentración de salida es máxima. Se indica además el flujo mínimo resultante para cada uno de los procesos obtenido mediante la ecuación 3.8.

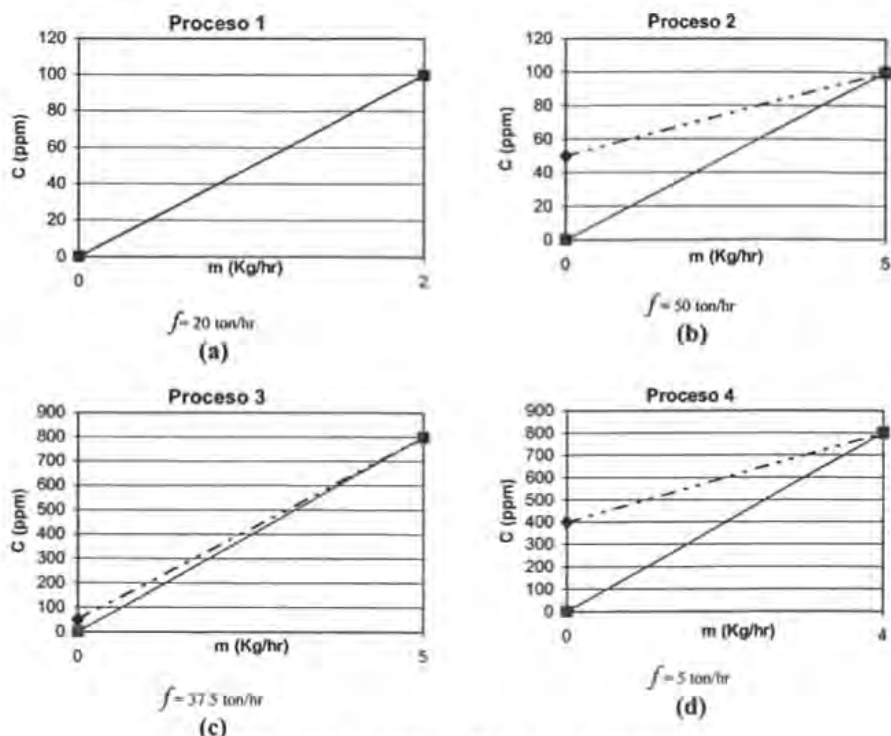


Figura 3.7 Ejemplo 1 sin Re-uso de Agua

Se puede observar que para cada operación la línea de agua y el perfil de agua limitante coinciden en su concentración de salida, esto es, al maximizar la concentración de salida se minimiza el flujo de agua fresca. La operación 1 tiene una concentración limitante de entrada "cero" y debido a que el agua fresca también tiene una concentración de entrada "cero" ambas líneas coinciden en sus perfiles, por lo tanto el requerimiento de agua fresca es igual al flujo de agua limitante de la operación. Para las operaciones 2, 3 y 4 la línea de agua se encuentra abajo del perfil de la operación debido a que las concentraciones de entrada de las operaciones son mayores a cero, por lo tanto el flujo de agua fresca requerido en estos casos es menor al flujo limitante de cada operación.

Una vez encontrado el flujo mínimo de agua fresca requerido para cada operación, el flujo mínimo de agua fresca total del sistema se obtiene sumando los flujos mínimos individuales de cada una de las operaciones, y la concentración final de contaminante en el agua a la salida se obtiene mediante el promedio de los flujos individuales. La figura 3.8 muestra el diseño correspondiente al uso de agua fresca para todo el sistema sin re-uso de agua, de modo que resulta un flujo minimizado total de 112.5 ton/hr y una concentración de salida de 364.44 ppm.

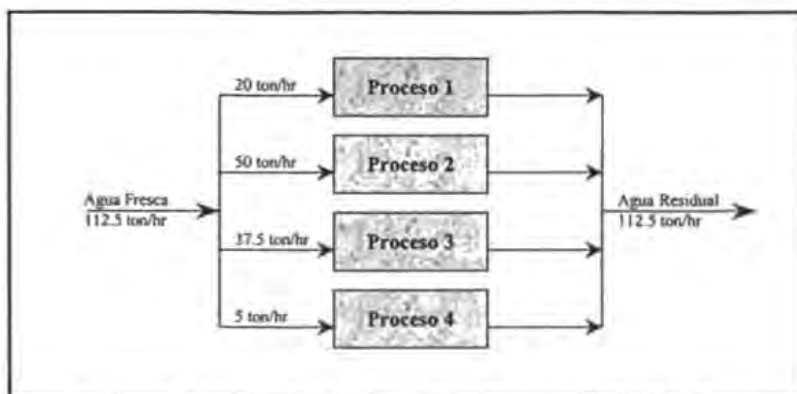


Figura 3.8 Consumo Mínimo de Agua Fresca SIN REUSO

3.3 Flujo Mínimo de Agua con Re-uso

Una vez determinados los requerimientos de agua fresca sin re-uso, ahora se aplicaran los métodos de la integración de procesos tomando en cuenta el re-uso de alguna operación a otra, siempre y cuando se cumplan las restricciones impuestas por el proceso. El beneficio que se obtiene por re-usar el agua residual de una operación en otra es la reducción tanto del flujo agua fresca a usar como del agua residual generada.

Si se desea minimizar el flujo total de agua, se debe re-usar ésta al máximo posible. Para lograrlo se debe analizar el comportamiento de todos los procesos de forma global, esto es, como si se tratara de un solo proceso, para lo cual existen dos maneras:

- 1) Método Gráfico. En forma gráfica representando todas las operaciones en una sola curva a la cual se le denomina "*Curva de Concentración Compuesta Limitante*".
- 2) Método Algebraico. Se puede representar en una tabla, la cual es construida usando la ecuación 3.8 y se le denomina "*Diagrama de intervalo de concentraciones (DIC)*".

Ambos métodos permiten llegar a la misma solución, esto es, encontrar el punto pinch de agua del sistema.

3.3.1 Método Gráfico (*Curva de Concentración Compuesta*)

Se realiza una representación grafica de cada una de las operaciones considerando como ejes la concentración de contaminante *versus* carga másica de contaminante. Las concentraciones de entrada y salida de los procesos definen intervalos de concentración (Figura 3.9) y para cada intervalo lse supone que la rapidez de transferencia de masa es constante. Si alguno de los procesos presenta un comportamiento significativamente no-lineal se puede representar el proceso por una serie de segmentos lineales que podrían

provocar la creación de intervalos de concentración adicionales (en los puntos de intersección de los segmentos).

En cada segmento la inversa de la pendiente de cada curva corresponde al flujo de cada uno de los procesos. La distancia vertical de cada curva representa la carga másica de contaminante ganada por la operación o corriente. Una manera conveniente de representar al sistema completo es arreglar cada una de las curvas de manera que el final de la carga másica de una operación sea el inicio de la otra, y así sucesivamente hasta completar la carga másica total del sistema.

Una vez representados los procesos individuales, se puede construir la curva de concentración compuesta del sistema (esto es, la representación global de todos los procesos). La idea de la curva compuesta fue introducida primero por El-Halwagi y Manousiouthakis (1989) y fue adaptada de la curva compuesta de temperatura-entalpía de Linnhoff (1979). Para el presente trabajo se usará la curva de concentración compuesta en un contexto diferente, es decir, el perfil de agua limitante.

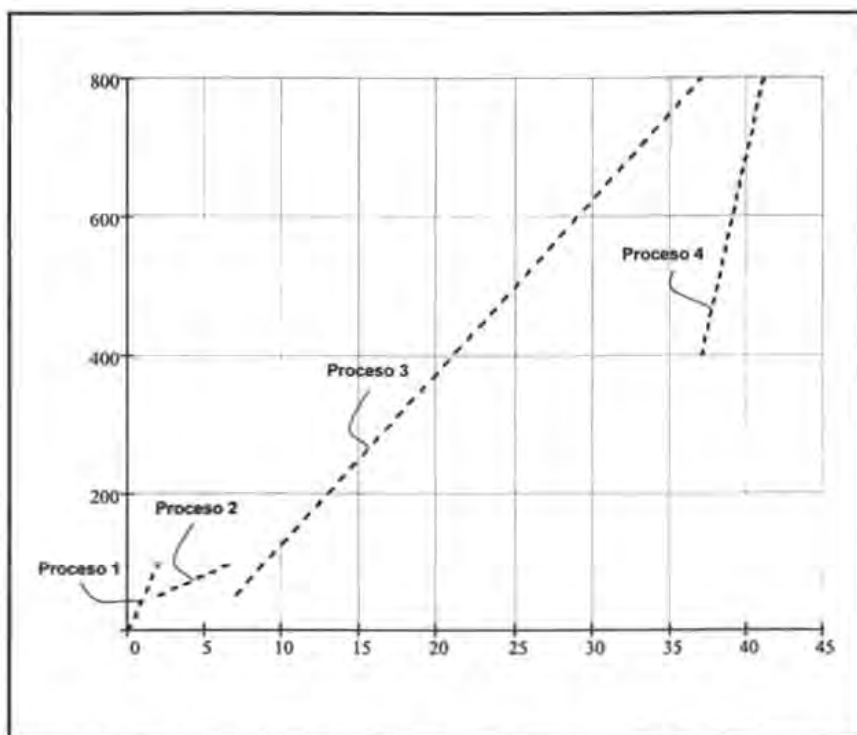


Figura 3.9 Perfiles de Agua Limitante Representados como un Solo Sistema

Se puede construir fácilmente la curva compuesta por superposición, usando la “regla de la diagonal” adicionando masa en las regiones donde las corrientes se super-imponen; de este modo se obtiene la curva compuesta aplicando la superposición lineal de las corrientes de

todos los procesos. Para el ejemplo de estudio, si combinamos las operaciones con sus intervalos de concentración se obtiene la curva de concentración compuesta mostrada en la Figura 3.10 donde se observa el comportamiento de todo el sistema como si fuera un solo proceso. No debe olvidarse que estas curvas representan los datos limitantes del proceso, por lo que también se le conoce como curva compuesta, curva de composición compuesta limitante o perfil de agua limitante.

La curva de concentración compuesta ya incorpora las restricciones del proceso directamente, sin embargo el mayor contraste se observara mas adelante cuando se extienda el método a contaminantes múltiples, re-uso con regeneración y reciclaje con regeneración. Una curva compuesta representa la carga másica de contaminante acumulada que se elimina o pierde en todas las corrientes de proceso.

Una vez obtenida la curva de concentración compuesta el siguiente paso es obtener el punto pinch. Para ello se asume que se tiene disponible agua sin contaminante (agua fresca), esto es, con concentración cero de contaminante y que puede usarse en los procesos. Maximizando la concentración de suministro de agua a la salida, tanto el uso de agua fresca como la generación de agua residual son minimizados Si graficamos el agua fresca partiendo desde el origen pasando por un punto donde toque a la curva compuesta (tangente a la curva) y terminando en el rango total de la carga másica de contaminante se obtiene así la curva de suministro de agua.

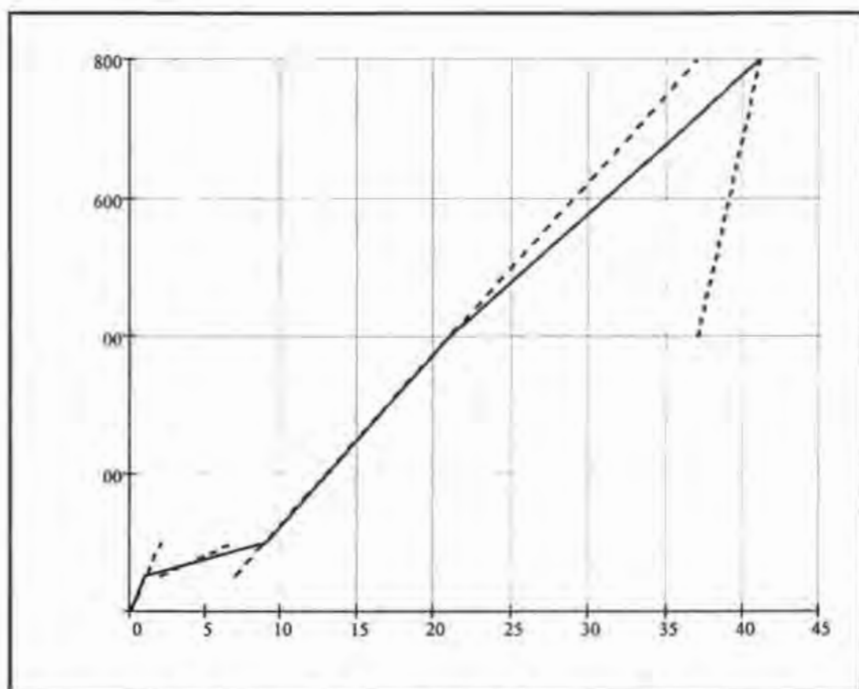


Figura 3.10 Curva de Concentración Compuesta Limitante

La figura 3.11 muestra la línea de suministro de agua que toca un punto de la curva de composición compuesta. Para garantizar la factibilidad del intercambio de masa la línea de agua debe permanecer abajo de la curva compuesta. Esto equivale a afirmar que a cualquier nivel de intercambio de masa la composición de la curva de suministro de agua debe ser menor que la de la curva de composición compuesta para asegurar la factibilidad del sistema.

Como se puede observar en la figura 3.11, la línea de suministro de agua toca la curva compuesta en dos puntos: en la concentración cero y en un punto intermedio. Cada punto donde la línea de suministro de agua toca a la curva compuesta crea un punto pinch en el diseño; en general debe haber al menos un punto pinch. Debido a que la línea de suministro de agua toca a la curva compuesta esto no significa que en este punto se tenga una transferencia de masa (por diferencia de concentraciones) de cero, sino que la transferencia en el punto pinch ha sido incorporada en los datos. Alternativamente las restricciones en el punto pinch en lugar de tener una transferencia de masa por diferencia de concentraciones mínima pueden ser debido a limitaciones por corrosión, solubilidad, incrustación, etc.

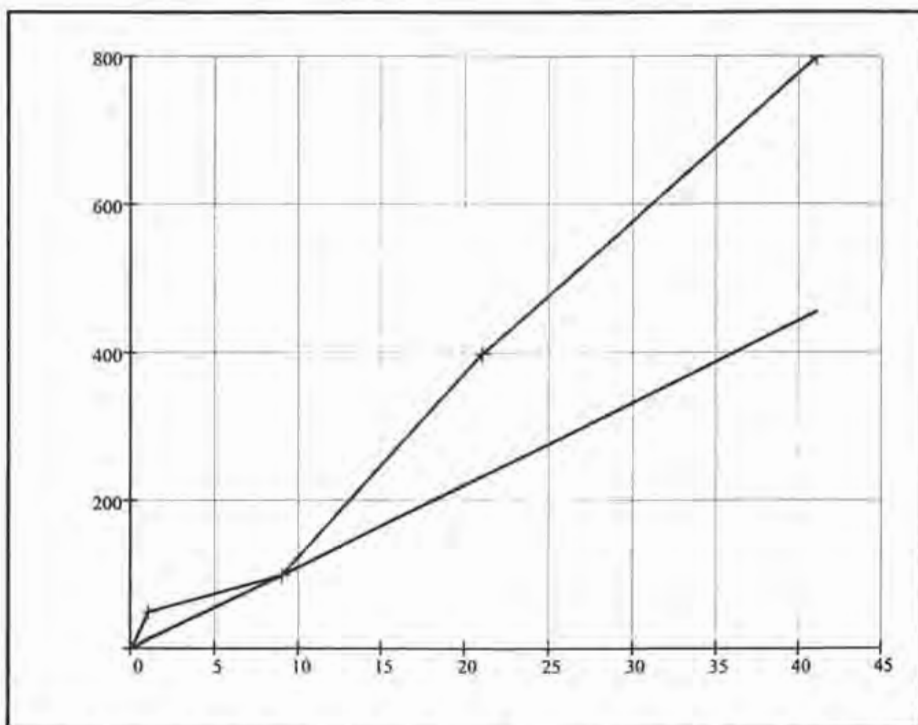


Figura 3.11 El punto de unión entre línea de suministro de agua y la curva de composición compuesta define el flujo mínimo de agua

En la figura 3.11 el flujo de agua mínimo que se obtiene para el ejemplo 1 es de 90 ton/hr y, comparadas contra las 112.5 ton/hr de la figura 3.6, implica una reducción del 20%. Para

que el flujo de 90 ton/hr sea manejable en el sistema debe encontrarse un diseño que sea capaz de usar este flujo en donde las concentraciones no excedan las máximas de entrada y de salida tengan la misma carga másica indicada en la tabla 1.

Al analizar el "sistema integrado" (Figura 3.12) se puede observar que el punto pinch divide al sistema en dos regiones: arriba del pinch o región rica en contaminante y abajo del pinch o región pobre en contaminante. La región rica en contaminante (arriba del pinch) comprende a todas o parte de las corrientes con una concentración mayor a la del pinch. De forma similar, la región pobre en contaminante (abajo del pinch) incluye a todas o parte de las corrientes con una concentración menor a la del pinch. La importancia de encontrar el punto pinch es que arriba de éste se puede saber las corrientes que se pueden re-usar o regenerar y abajo del pinch las que deben usar agua fresca para satisfacer sus requerimientos. Además en la figura 3.12 se puede identificar que si algo de masa de contaminante es transferida alrededor del pinch, entonces se requerirá agua adicional para que el sistema continúe siendo factible. Por lo anterior, para minimizar el costo por suministro de agua no se debe transferir carga másica de contaminante en el punto pinch.

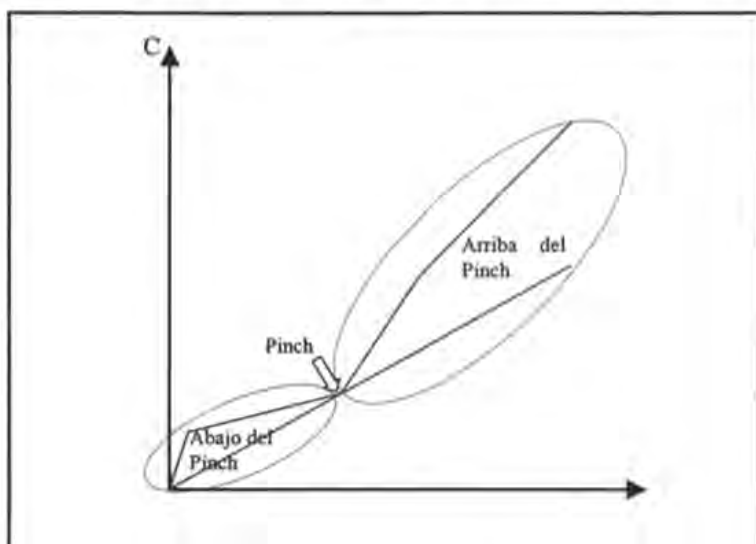


Figura 3.12 Regiones del sistema integrado

3.3.2 Método Algebraico (Diagrama de Intervalo de Concentraciones)

El análisis pinch gráfico presentado en la sección 3.3.1 proporciona al diseñador una herramienta muy útil para representar la transferencia global de masa desde las corrientes contaminadas hacia las corrientes de agua. A pesar de su utilidad, el diagrama pinch tiene la desventaja de su exactitud (presente en los problemas con una aproximación gráfica). Esta desventaja se hace patente cuando existe un rango amplio de composiciones en las

corrientes de proceso y las de agua. En tales casos se recomienda el método algebraico, que genera resultados equivalentes a los obtenidos por el análisis gráfico.

El-Halwagi y Manousiouthakis (1989) introdujeron el Diagrama de Intervalo de Concentraciones (DIC), o Tabla de Intervalo de Composiciones, para redes de intercambio de masa con la finalidad de calcular el requerimiento mínimo de agentes de separación y permitir la separación de contaminante desde las corrientes ricas a las corrientes pobres. Debido a que la formulación del problema en redes de agua es diferente a la presentada por El-Halwagi y Manousiouthakis, se usara una tabla modificada donde los datos de las corrientes ricas estén incorporados en las corrientes pobres. Además se usara carga masica en vez de composiciones para lograr una mejor correspondencia entre los problemas de redes de intercambio de masa con los de redes de intercambio de calor.

La mayoría de los problemas con un solo contaminante se pueden representar de manera tabular mediante el DIC ya que en éste se incluye toda la información del sistema. Con el DIC se identifican los intervalos de concentración en orden ascendente y, una vez definidos los intervalos de concentración, se calcula la carga másica de cada operación involucrada en cada intervalo, mediante la ecuación 3.8.

El DIC es una herramienta útil para asegurar la factibilidad termodinámica del intercambio de masa. Primero se generan las escalas o intervalos de composición, los cuales corresponden a las concentraciones de entrada y salida de cada uno de los procesos. Cada corriente de proceso se representa con una flecha vertical cuyo inicio corresponde a la concentración de entrada del proceso y el final a la composición de salida, esto es a la concentración limitante de entrada, C_{ENT} y de salida C_{SAL} . Asimismo se establecen una serie de intervalos de carga masica de manera que, a lo largo de cada intervalo, siempre se tengan presentes las mismas operaciones. El número de intervalos de concentración, N_{int} , esta relacionado al número de corrientes de agua y de proceso de la siguiente manera:

$$N_{int} \leq 2(N_{CP} + N_{CA}) - 1 \quad (3.9)$$

donde: N_{int} = Número de intervalos
 N_{CP} = Número de Procesos
 N_{CA} = Número de Fuentes de Agua

Aplicando la igualdad para los casos donde no se presente ninguna coincidencia en el inicio y final de alguna flecha. Después se procede a numerar los intervalos de composición de arriba hacia abajo en orden ascendente. La representación del número de intervalos, concentraciones y operaciones constituyen las tres primeras columnas del DIC (Figura 3.13). Se puede usar el índice k para designar un intervalo, siendo $k = 1$ el intervalo inicial y $k = N_{int}$ el final. La cuarta columna indica la suma de los flujos de agua limitantes, $\sum f_i$, de la operaciones presentes en cada intervalo, mientras que la quinta representa la carga másica de contaminante de las corrientes de proceso transferida en cada intervalo de composición. La masa intercambiada de una corriente de proceso i -ésima que pasa a través de un intervalo k -ésimo se calcula mediante la ecuación 3.3:

$$\Delta m_k = \frac{\sum f_i (C_k - C_{k-1})}{10^3} \quad (3.10)$$

$$\text{con } C_{k-1} = \min_i \{C_{ENT,i}\}$$

donde: C_k, C_{k-1} = Escalas de composición de las corrientes de proceso que corresponden a la escala superior e inferior del intervalo.

Figura 3.13 Diagrama de Intervalo de Concentraciones para el ejemplo 1

Intervalo Conc. (lo)	Concentración (ppm)	Procesos				Σ Flujo	Carga Másica (Kg/hr)	Carga Másica Acumulada (Kg/hr)	Flujo Agua (ton/hr)
		Proceso 1 20 ton/h	Proceso 2 100 ton/h	Proceso 3 40 ton/h	Proceso 4 10 ton/h				
1	0	↓				20	1.0	0.0	0.00
2	50		↓			160	8.0	1.0	20.00
3	100			↓		40	12.0	9.0	90.00
4	400				↓	50	20.0	21	52.50
5	800				↓		41	41	51.25

Habiendo obtenido la carga másica individual en cada intervalo de las corrientes de proceso se puede obtener la sexta columna, que representa la carga másica acumulada, sumando la carga másica de cada intervalo individual del intervalo k -ésimo (de las corrientes que pasan a través de ese intervalo), de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \Delta m_{acumulada} &= \Delta m_1 + \dots + \Delta m_{k-1} + \Delta m_k \\ &= \sum m_{i,k} \end{aligned} \quad (3.11)$$

El DIC solo puede aplicarse para una fuente de agua y para que sea capaz de manejar la carga másica total intercambiada, la concentración de contaminante en la fuente de agua, C_{CA} , debe cumplir la siguiente condición:

$$C_{CA} \leq C_{k=i} \quad (3.12)$$

El flujo mínimo de agua que puede usarse, f_{agua} , respetando las restricciones del problema se determina en la séptima columna mediante:

$$f_{agua} = \max_k \left\{ \frac{\Delta m_{acumulada,k}}{C_k - C_0} \right\} \quad (3.13)$$

donde C_0 = Concentración de la fuente de suministro de agua.

El valor máximo de flujo de la séptima columna representa el punto pinch, y la concentración en este punto representa la concentración pinch. En los casos donde mas de un intervalo tengan al mismo flujo de agua, f_{agua} , el punto pinch será el que tenga la menor concentración.

Para el ejemplo de estudio existen cuatro procesos y una fuente de agua donde se obtienen cinco intervalos de concentración. Si en cualquier intervalo resulta termodinámicamente posible transferir masa desde la corriente de proceso hasta la corriente de agua, entonces, es posible transferir carga masica de contaminante desde un intervalo k -ésimo de una corriente de proceso hasta un intervalo inferior. El punto pinch se obtiene en la séptima columna de la tabla, siendo este el que presenta el flujo máximo, que equivale a 90 ton/hr de agua requerida para el sistema, el mismo que se obtuvo mediante el método gráfico y además se puede comprobar que los datos de los intervalos obtenidos mediante el DIC corresponden a los puntos o escalas que permitieron construir la curva compuesta en el análisis gráfico.

En resumen, el DIC genera un número de intervalos de composición N_{int} y dentro de cada intervalo es, termodinámicamente y técnicamente, posible transferir una cierta carga másica de contaminante desde una corriente de proceso hasta una de agua.

3.4 Diseño de Redes de Agua

Una vez que se ha encontrado la estrategia para obtener el flujo mínimo de agua requerido por el sistema ahora se establecerá un método para diseñar la red de agua que satisfaga los datos de proceso limitantes empleando la menor cantidad de agua fresca y el menor número de unidades. El-Halwagi y Manousiouthakis (1989) adaptaron el método de diseño pinch de redes de cambiadores de calor de Linnhoff y Hindmarsh (1983) al diseño de redes de intercambio de masa. En la mayoría de las redes de intercambio de masa simple el método de El-Halwagi y Manousiouthakis puede fallar debido a los problemas se presentan por el uso marcado de la heurística. Por lo anterior se requiere que una vez identificado un nodo entre dos corrientes, el intercambio de masa en esta unidad se tome igual a la carga menor de las dos corrientes involucradas.

Para poder diseñar una red de agua del sistema, se debe conocer el punto pinch, el cual es muy importante, ya que debajo de este punto se requiere usar agua fresca y arriba de este punto el sistema ya no requiere agua fresca y se puede reusar el agua en el sistema. Entonces, se debe considerar la posibilidad de usar agua "gastada" de una operación a otra. El consumo mínimo de agua se puede alcanzar si se observan las siguientes reglas:

- Toda el agua alimentada al proceso debe llevarse hasta la concentración pinch
- El agua que tenga una concentración menor al pinch no debe usarse en una operación situada arriba del punto pinch.

Los procesos u operaciones en la red de agua que componen el sistema se pueden clasificar en distintos tipos (Figura 3.14), cada una de las cuales tiene diferentes implicaciones de re- uso en el diseño.

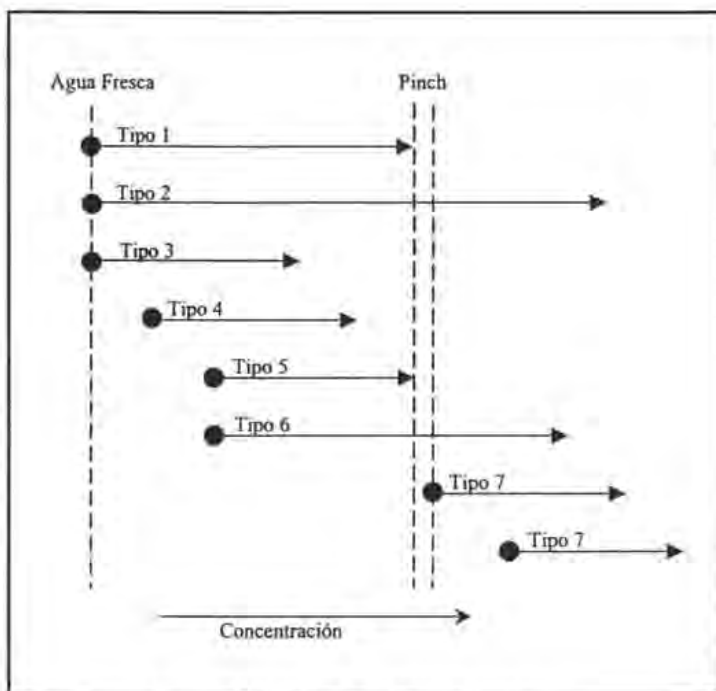


Figura 3.14 Clasificación de Corrientes

Tipo 1. Procesos que requieren agua fresca y terminan en el punto pinch.

A estas corrientes se les puede proporcionar agua fresca de forma que mantengan la concentración del agua gastada igual a la del pinch. Este es el flujo mínimo requerido para el proceso y no perjudica el “flujo objetivo” de agua. El agua de este tipo puede dividirse para usarla en otros procesos. Se debe usar primero el agua de este tipo de proceso a fin de reducir el tamaño del problema de diseño.

Tipo 2. Procesos que requieren agua fresca y terminan a una concentración arriba del pinch.

Se pueden manejar estas corrientes de la misma forma que las de tipo 1. Se asigna agua fresca para el flujo mínimo sin perjudicar el flujo. El agua de este tipo puede dividirse para usarla en otros procesos

Tipo 3. Procesos que requieren agua fresca y tienen una concentración máxima de salida menor a la del pinch.

El agua gastada de estos procesos puede re-usarse en otras antes de alcanzar la concentración pinch.

El agua de los procesos de tipo 1 y 2 deben considerarse para re-uso en otras operaciones del sistema siempre que las concentraciones limitantes así lo permitan. El uso de agua fresca en el proceso dependerá de la manera en que se diseñe la red de agua del sistema completo.

Tipo 4. Procesos que pueden usar agua gastada de otra operación y tiene una concentración máxima de salida menor a la del pinch.

El agua gastada de estos procesos puede re-usarse en otros antes de llegar a la concentración pinch. Si el sistema cuenta con un proceso de este tipo y el flujo de agua gastada no es suficiente para satisfacerla entonces se deberá emplear agua fresca para cubrir el resto de la demanda.

Tipo 5. Procesos que pueden usar agua gastada y terminan en el pinch.

Si el sistema no cuenta con operaciones del tipo 3 o 4, entonces se debe alimentar agua fresca para satisfacer los requerimientos de flujo para este tipo de operaciones. El manejo que se le da a este tipo de procesos u operaciones, es el mismo que para las del tipo 1. El agua gasta puede usarse en otros procesos si el nivel de contaminante así lo permite.

Tipo 6. Procesos que pueden usar agua fresca y que tienen una concentración máxima de salida mayor a la del pinch.

Este es el proceso mas difícil para satisfacer ya que se debe tener cuidado al manejar las concentraciones pinch y la máxima de salida de agua. El flujo de agua esta limitada por la carga másica en uno u otro lado del pinch, de forma que en el diseño se pueda comenzar por determinar el flujo mínimo de agua en ambos lados del pinch.

El flujo mínimo de agua requerido arriba del pinch se determina dividiendo la carga másica arriba del pinch, entre la diferencia de las concentraciones máxima de salida de agua y la pinch. El flujo mínimo de agua requerido abajo del pinch se determina dividiendo la carga másica abajo del pinch entre la diferencia de las concentraciones de entrada de agua y del pinch.

El agua usada para los procesos puede ser agua fresca o agua gastada proveniente de los procesos del tipo 3 y 4.

(c) En el siguiente intervalo, **intervalo 3**, solamente existe el proceso 3. Así que el agua de los procesos 1, 2 y 3 habiendo alcanzado 100 ppm se mezclan y se usan en el proceso 3.

b) En el **intervalo 2** los procesos 1, 2 y 3 existen simultáneamente, así que el agua, habiendo alcanzado 11.1 ppm en el proceso 1 ahora debe dividirse entre los procesos 1, 2 y 3 en proporción al flujo de agua limitante de estos procesos, definidos en la tabla 3.1. A la salida del intervalo 2 el agua de suministro ha alcanzado la concentración "pinch" de 100 ppm en el diseño.

a) Se comienza con agua fresca en el **intervalo 1**, como se observa en la figura 3.15b. Aquí solo existe el proceso 1 y este se une con el agua fresca. El agua fresca alcanza 11.1 ppm a la salida, establecido por la concentración de la línea de suministro de agua de la figura 3.15a tal como sale del intervalo 1.

siguiente forma:
 Linhoff y Flower (1978) para redes de intercambio de calor, el cual se maneja de la siguiente forma:
 modo que se divide el sistema en intervalos de carga másica. Entonces se diseña una red siguiendo estos intervalos de carga másica. Se usa el diagrama de mallas introducido por En donde existe un cambio en la pendiente de la curva compuesta se crea una frontera, de

Este método maximiza en el diseño el potencial de concentración aprovechando la diferencia de concentración que existe entre la curva compuesta y la línea de agua. La estrategia consiste en dividir la curva compuesta en intervalos verticales de carga másica (figura 3.15).

3.4.1 *Máximo Potencial (Diferencia de Concentraciones)*

Las dos, aunque tienen diferentes objetivos, son capaces de alcanzar el flujo mínimo dentro de las restricciones de concentración permitidas y para ello se debe conocer el tipo de corriente de acuerdo a la clasificación anterior.

- 1) Máximo Potencial
- 2) Número Mínimo de Fuentes de Agua

Dado que en este caso de minimización de agua se está tratando con un solo contaminante, una ruta simple se puede desarrollar para casi la mayoría de las redes complejas y no requerirán de programación matemática. Se tienen dos rutas diferentes con diferentes objetivos que permiten alcanzar el flujo mínimo en el diseño:

Estos procesos deben usar agua gastada que se encuentra en o arriba de la concentración pinch y normalmente se cuenta con gran libertad de manejarla en el diseño.

Tipo 2. Procesos que comienzan en o arriba del pinch.

d) En el **intervalo 4**, existen los procesos 3 y 4. Aquí el agua del intervalo 3 habiendo alcanzado 23.3.33 ppm se divide entre los procesos 3 y 4 en proporción al flujo de agua limitante de estos procesos. A la salida de este intervalo se alcanza una concentración de 455.56 ppm.

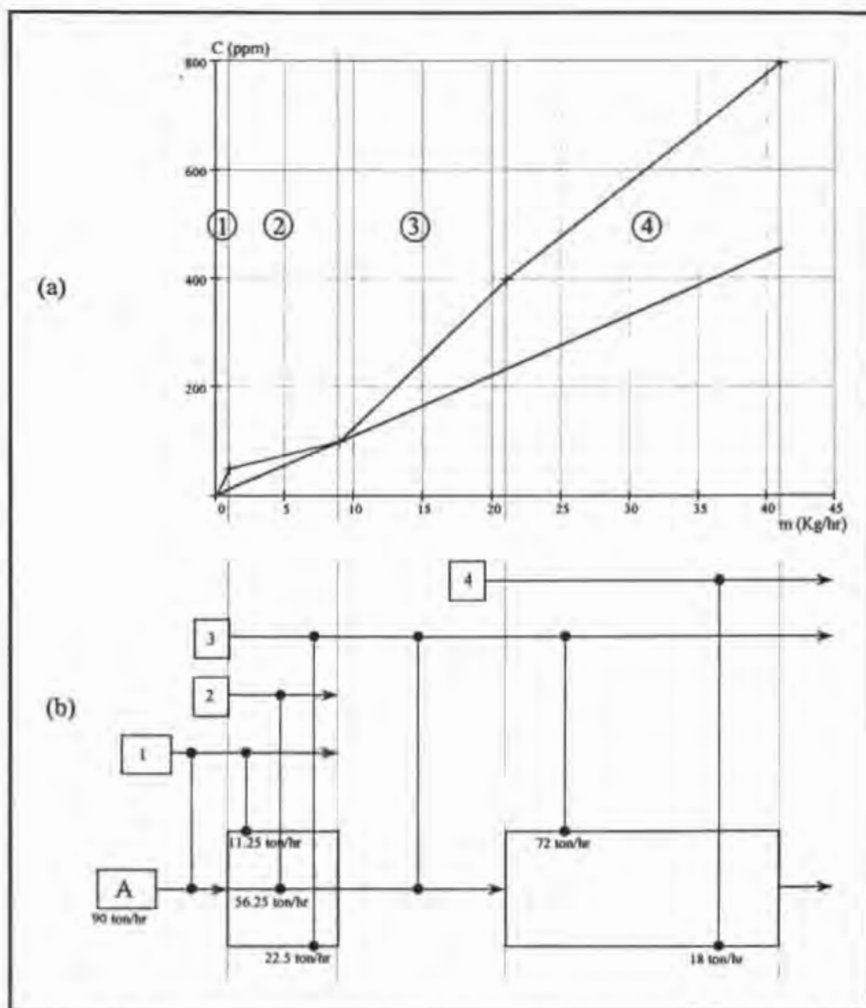


Figura 3.15 Las corrientes junto con la curva compuesta limitante define el diseño para el problema del ejemplo 1

La figura 3.16 muestra el diseño final de la red obtenida a partir de la figura 3.15 como un diagrama de flujo convencional. El diseño de redes de agua para alcanzar el flujo mínimo frecuentemente requiere arreglos complejos de división de corrientes y el método permite generarlos.

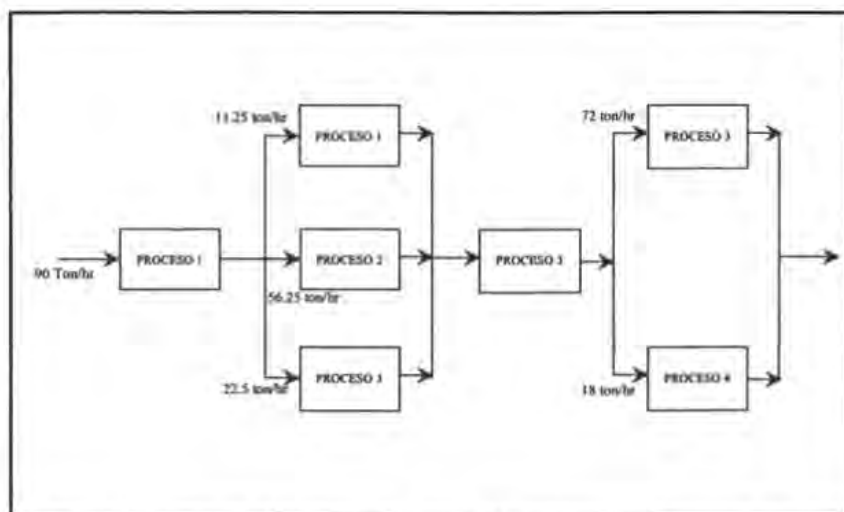


Figura 3.16 Diseño de la red de la figura 3.15 representado como diagrama de flujo convencional

Mientras esta aproximación siempre producirá un diseño que maneje el flujo mínimo de agua objetivo, también lleva a diseños que presenta una complejidad innecesaria. Linnhoff y Hindmarsh (1983) introdujeron un método de relajación de energía para la simplificación de redes de intercambio de calor. La misma aproximación puede adoptarse para simplificar redes de agua tal como la obtenida en la figura 3.15:

- Primero se identifican los ciclos (loops). El diseño de la figura 3.15 involucra tres ciclos. El número de ciclos independientes en el diseño puede predecirse por el teorema de Euler (Linnhoff *et al.*, 1979). Los tres ciclos están identificados en la figura 3.17a.
- Se puede cortar el ciclo 1 de la figura 3.17a cambiando la carga másica del nodo "B" al nodo "A". Esto provoca un cambio de concentración en la línea de suministro de agua, pero en este caso, todavía sale con una diferencia de concentración factible, de este modo la red se simplifica sin cambiar el flujo de agua.
- El ciclo 3 de la figura 3.17a puede cortarse cambiando la carga másica del nodo "E" al nodo "F". Nuevamente, cuando se calculan las nuevas concentraciones de la corriente de suministro de agua el diseño aún sigue siendo factible.
- Se puede cortar el ciclo 2 combinando los nodos D-F, sin embargo, si se hace esto las concentraciones en la corriente de agua exceden el máximo permisible por el proceso (definidas) en la tabla 3.1.

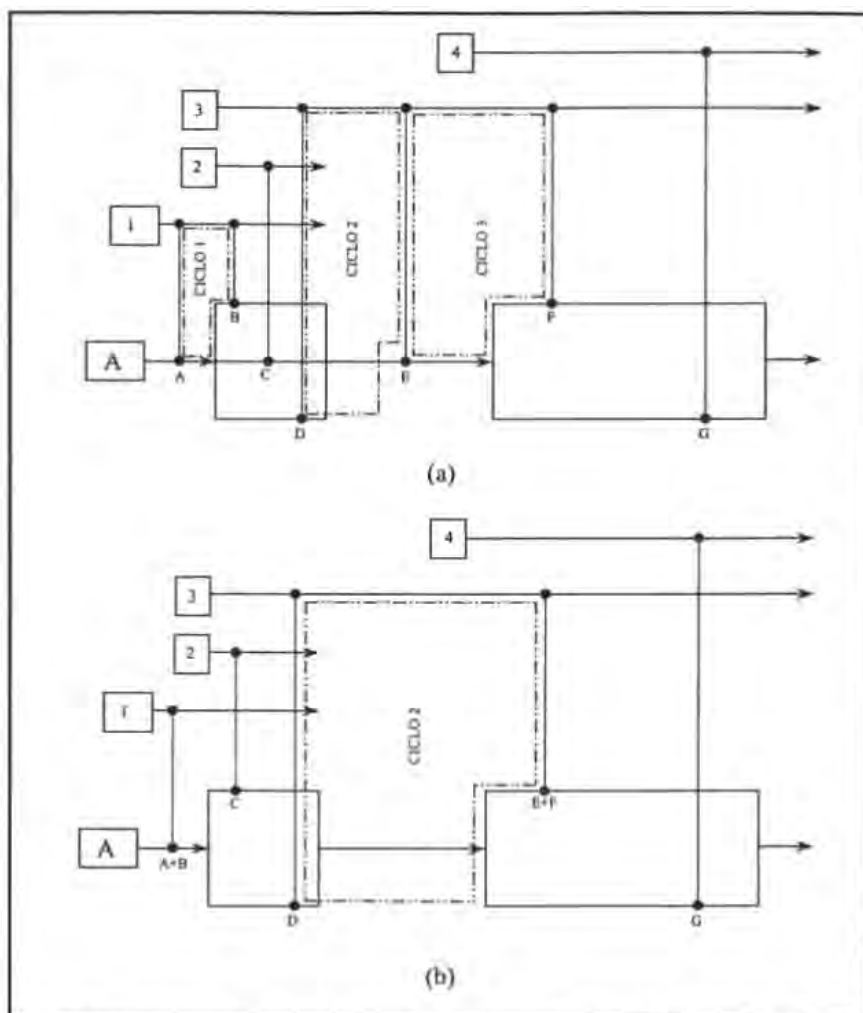


Figura 3.17 (a) Identificación de ciclos. (b) Diseño después de cortar los ciclos 1 y 3 empleando el cambio de masa

Para eliminar la violación se pueden reducir las concentraciones hasta sus límites permisibles incrementando el flujo de agua. Esta penalidad resulta aceptable para el diseñador ya que se logra la simplificación del diseño final. En este caso, y para propósitos de una comparación posterior, se mantendrá el diseño sin cortar el ciclo 2 y empleando el flujo mínimo. Por lo tanto se tiene el diseño de la figura 3.17b como el diseño final con el corte de los ciclos 1 y 3. El diseño se muestra en la figura 3.18 como un diagrama de flujo convencional.

En general, es posible cortar ciclos mas allá del pinch, donde la diferencia de concentraciones entre la curva compuesta limitante y la línea de suministro de agua es grande, sin incurrir en una penalidad. Cortando ciclos alrededor del pinch generalmente provoca penalidad.

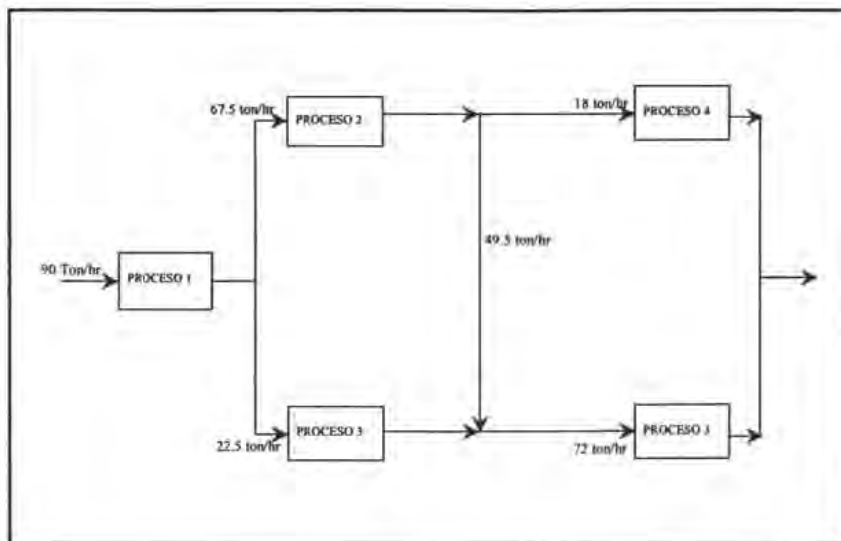


Figura 3.18 Diseño representado como diagrama de flujo convencional de la figura 3.17 para el ejemplo 1

La figura 3.18 muestra que para alcanzar el flujo mínimo objetivo se debe maximizar el re-uso de agua mediante un arreglo cuidadoso de re-uso de agua.

3.4.2 Número Mínimo de Fuentes de Agua

Cuando se diseñan redes de agua es importante asegurar que se obtenga la menor cantidad de nodos como sea posible. Dividiendo una operación de transferencia de masa entre varias fuentes de agua generalmente presenta mayor dificultad. Esto contrasta con el diseño de redes de intercambio de calor donde la división de las operaciones de transferencia entre varios cambiadores normalmente es mas simple.

Wood, Wilcox y Grossmann (1985) demostraron que la desviación y el mezclado de corrientes pueden emplearse en las redes de intercambio de calor para reducir el número de unidades mas allá del mínimo aparente en problemas donde el punto pinch divide el problema en dos partes. El método no se recomienda para el diseño de redes de intercambio de calor ya que, como lo han expresado Wood, Wilcox y Grossmann, lleva a un incremento considerable en el área de transferencia de calor. Sin embargo, para el caso de redes de agua se puede emplear la técnica de desvío y mezclado sugerida por Wood,

Wilcox y Grossmann de manera mas eficaz que para el caso de las redes de intercambio de calor.

Aunque Wood, Wilcox y Grossmann (1985) demostraron que el método de desvío y mezclado puede usarse en redes de intercambio de calor, no presentaron una metodología general para asegurar que el número mínimo de unidades de la red pudiera diseñarse siempre con el consumo mínimo de energía para problemas con aplicación de la metodología pinch.

En el diseño de procesos con redes de agua se desarrolló un método de aproximación general, alterno, que explota la idea del desvío y mezclado de corrientes con el fin de minimizar el numero de nodos (es decir, minimizar el numero de fuentes de agua para cada operación). En la figura 3.19 se ilustra este método aplicado al ejemplo de estudio de la tabla 3.1.

Aquí en lugar de seguir intervalos de carga másica (como fue empleado en el método del máximo potencial), ahora se siguen intervalos de concentración para definir los nodos de las corrientes. En cada nodo solo se usa el agua suficiente para mantener la factibilidad de la red. Así que se sigue la trayectoria de la curva compuesta limitante y se minimiza la diferencia de concentraciones en nodos individuales. En caso que se tenga mas agua disponible que la requerida entonces se desvía el exceso para mezclarlo mas adelante a modo de mantener la factibilidad.

La aplicación de método para el diseño mostrado en la figura 3.19 se hace de la siguiente forma:

- a) Se comienza con agua fresca en el **intervalo 1** (Fig. 3.19b). Aquí solo existe el proceso 1 y este es unido con el agua fresca. Ahora, sin embargo, solo se usa la cantidad de agua necesaria para mantener la factibilidad, es decir a 50 ppm a la salida; el resto se desvía para usarla mas adelante. Esto altera el volumen mínimo de agua en el intervalo 1.
- b) En el **intervalo 2** los procesos 1, 2 y 3 existen simultáneamente, por lo tanto el agua se divide entre estos tres procesos para obtener 100 ppm a la salida.
- c) En el **intervalo 3** solo existe el proceso 3. El agua mínima a la salida del intervalo 2 es usada en el proceso 3 y el resto es desviada.
- d) Finalmente en el **intervalo 4** existen los procesos 3 y 4. El agua se divide entre estos dos procesos y el exceso es desviado.

La figura 3.19b muestra el diseño inicial de la red el cual maneja el flujo objetivo, y como se puede observar, se presenta una estructura diferente a la del diseño inicial de la Fig. 3.15b.

La figura 3.20 muestra el diseño de la figura 3.19b pero representado como diagrama de flujo convencional.

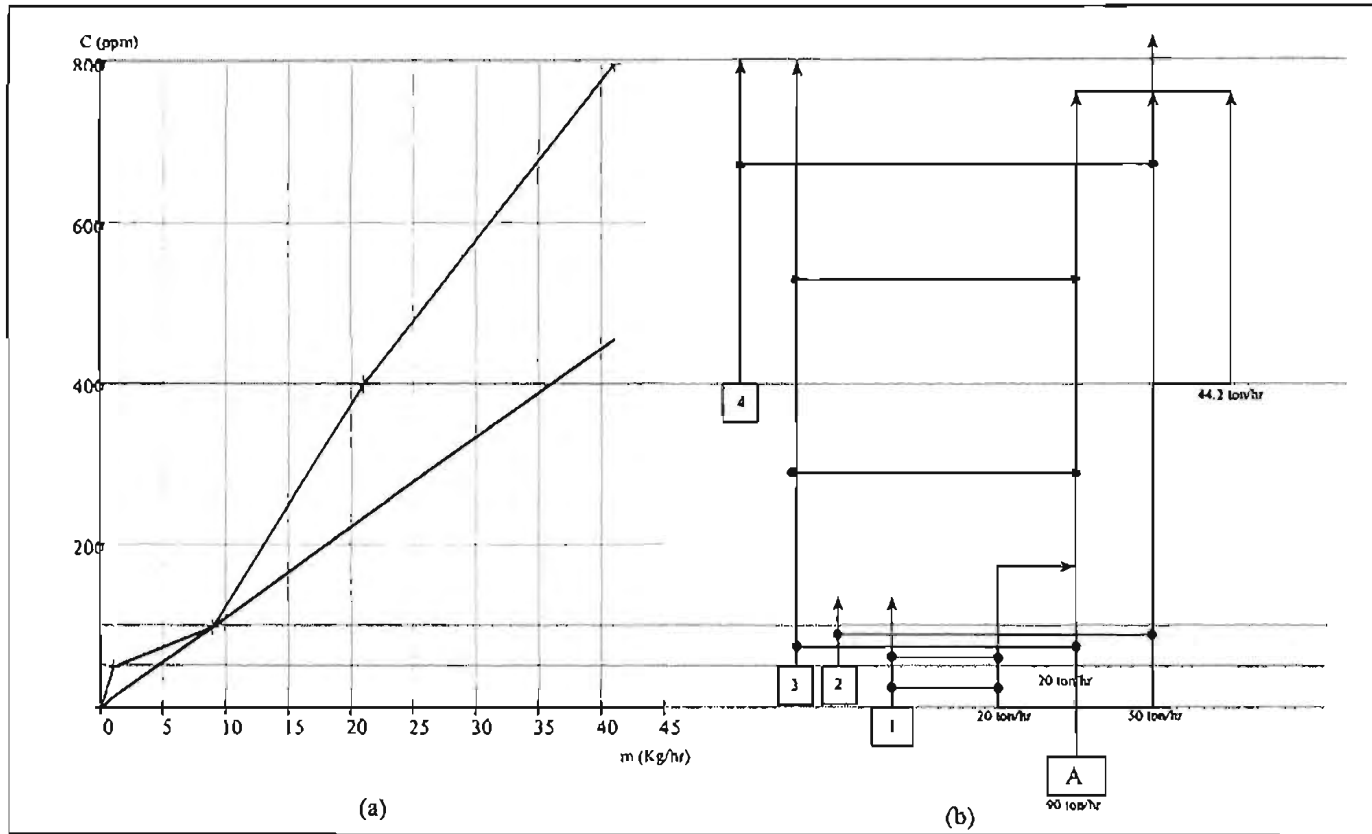


Figura 3.19 Diseño usando el método del número mínimo de fuentes de agua. (a) Curva Compuesta. (b) Diagrama de mallas

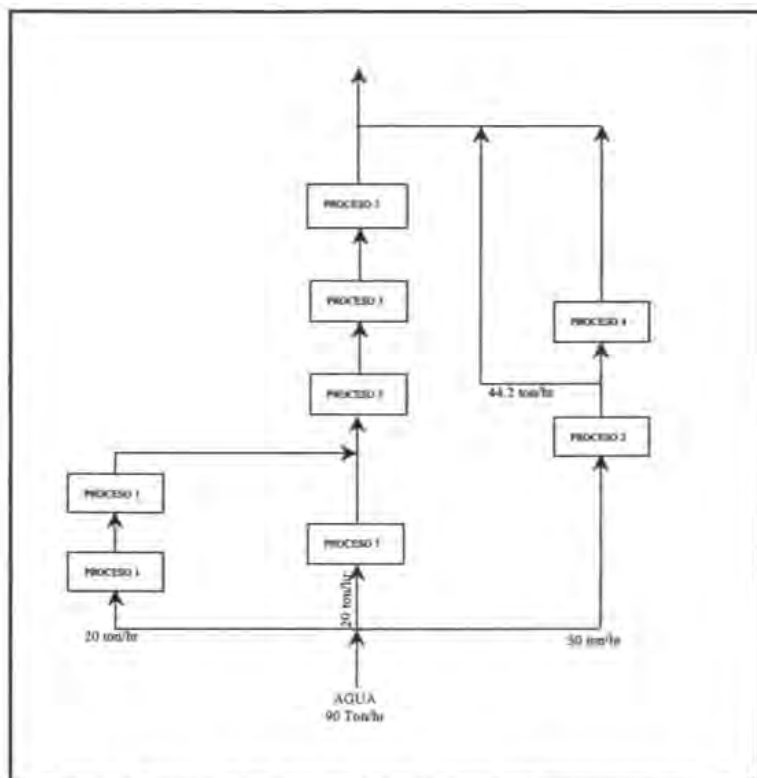


Figura 3.20 Diseño de la red de la figura 3.19 representado como diagrama de flujo convencional

La figura 3.21(a) muestra el diseño de la figura 3.19(b) mostrando los ciclos encontrados en el diseño. Combinando las cargas de los nodos A y B se elimina el ciclo 1. Combinando las cargas en los nodos C-F se eliminan los ciclos 2 y 3. El diseño final, que alcanza el flujo mínimo objetivo, se muestra en la figura 3.21(b) como diagrama de mallas y en la figura 3.22 se muestra como diagrama de flujo convencional.

La figura 3.22 se obtiene mediante un modelo cuidadoso de re-uso, usando el desvío y mezclado de corrientes para alcanzar el flujo mínimo objetivo. Si se compara el diagrama final de la figura 3.22 contra el mostrado en la figura 3.18, se observa que el diseño de la figura 3.22 solo requiere una fuente de agua en cada operación y emplea el flujo mínimo de agua objetivo obtenido del análisis pinch. Así que esta estrategia de diseño es capaz de combinar el flujo mínimo y permite simplificar la red explotando la técnica del desvío y mezclado de corrientes.

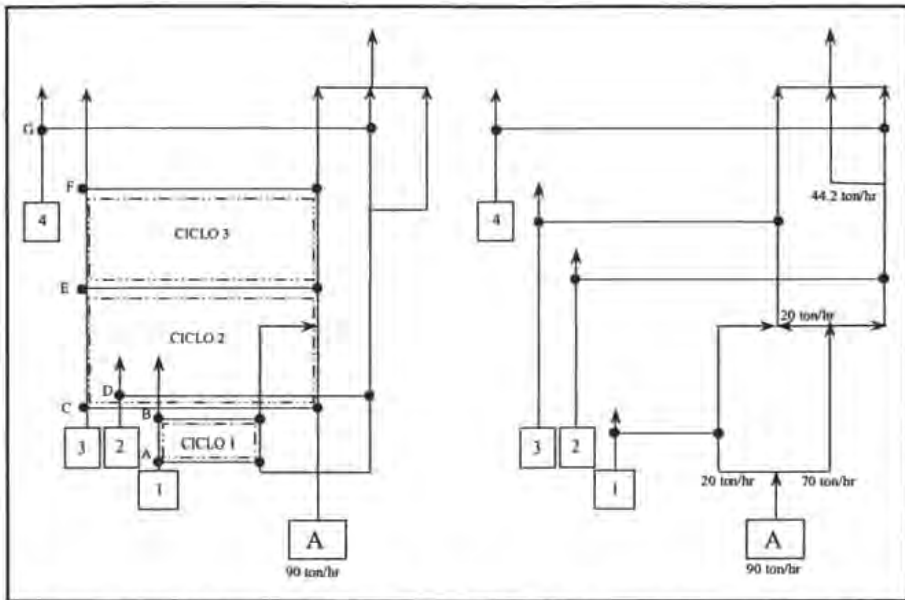


Figura 3.21 (a) Identificación de ciclos. (b) Diseño después de cortar los ciclos

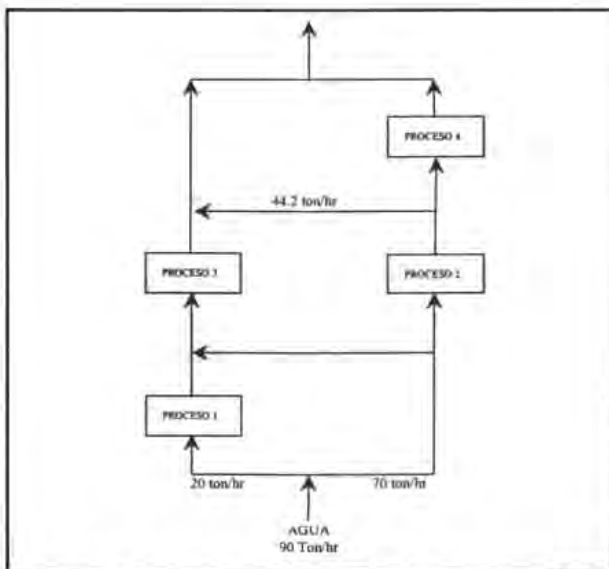


Figura 3.22 Diseño de la red de la figura 3.21 representado como diagrama de flujo convencional

3.5 Minimización de Agua con Restricciones de Flujo

La metodología del apartado 3.4 permite variar el flujo de agua en cada uno de los procesos en la medida en que varía la concentración. Sin embargo algunos procesos presentan requerimientos de flujo fijos, como por ejemplo, la limpieza de recipientes automática o manual, transporte hidráulico, etc. los cuales requieren el flujo fijo, independientemente de la concentración de contaminante que tenga el agua de entrada. Se presenta una complicación adicional cuando en algunos procesos se presenta un flujo fijo con pérdidas de agua y que por lo tanto no puede re-usarse (por ejemplo, el agua de repuesto de las torres de enfriamiento para reponer el agua debido a las pérdidas por evaporación y arrastre ó ejemplo es cuando el agua sale junto con el producto). El problema se complica aún mas cuando existen varias fuentes de agua fresca disponibles con diferentes calidades, por ejemplo, agua desmineralizada, potable o de pozo. Generalmente, el agua de menor calidad es mas barata, por lo que es preferible maximizar el uso de esta en vez de la de mayor calidad.

Si el flujo de agua es fijo, entonces la concentración de entrada puede variar pero la pendiente permanece fija, tal y como se muestra en la figura 3.23

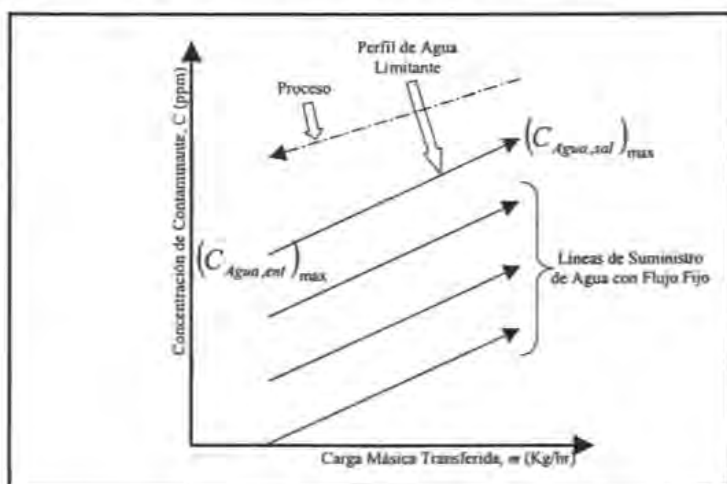


Figura 3.23. Si el proceso presenta requerimientos de flujo fijo de agua, entonces la pendiente de suministro de agua es fija

Supóngase que los datos de la tabla 3.1 representan los datos limitantes y que el flujo de cada uno de los procesos es fijo, así que el flujo total de agua requerido es simplemente la suma de los requerimientos individuales de la tabla 3.1, esto es, 170 ton/hr.

En las figuras 3.9 a 3.11 se construyó la curva compuesta del sistema donde se permitía variar el flujo de cada operación siempre y cuando la carga másica se mantuviera constante y las concentraciones máximas no fueran excedidas durante el diseño.

Ahora supóngase que cada operación de la figura 3.10 presenta un flujo fijo indicado por los datos limitantes. Para este caso se podría suponer que el flujo objetivo está dado por la pendiente menor (y por lo tanto el flujo mayor) de la curva limitante, como se muestra en la figura 3.24, el cual es de 160 ton/hr.

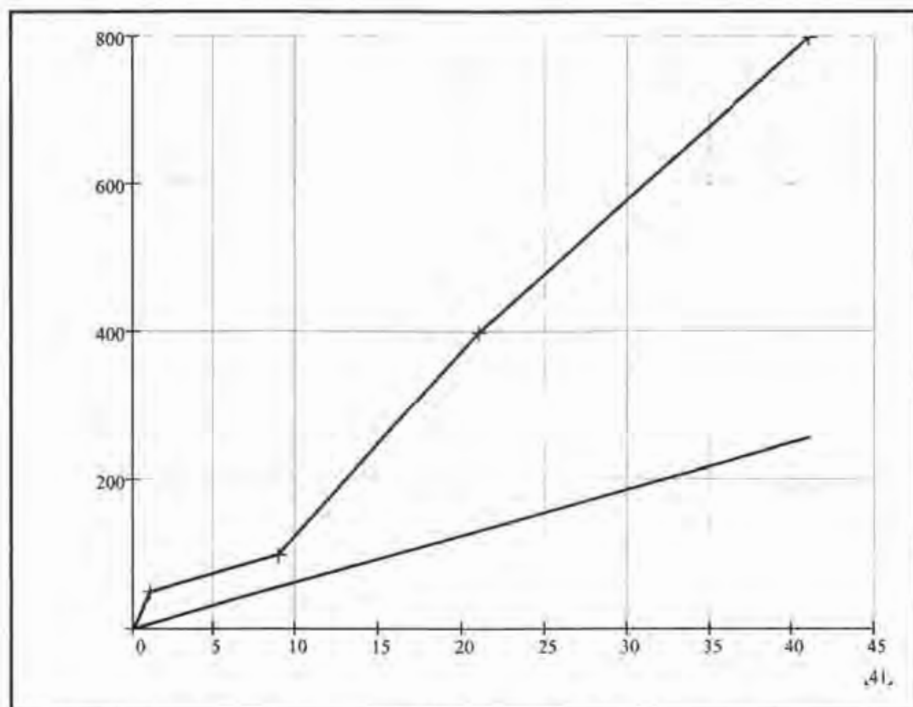


Figura 3.24 Fijando los requerimientos de flujo de agua de proceso aparentemente se restringe la pendiente de la línea de suministro de agua.

Como se verá más adelante el flujo objetivo obtenido en la figura 3.24 es demasiado conservativo y se entenderá mejor cuando se explique, a continuación, el caso de una operación simple con flujo fijo y posteriormente considerando operaciones múltiples con flujo fijo.

3.5.1 Operaciones Simples con Flujo Fijo

Considere una operación simple como la mostrada en la figura 3.25, donde la concentración máxima de entrada es $C_{ENT,max}$, la de salida es $C_{SAL,max}$, y el flujo de agua fijo es f_L . También se muestra el flujo mínimo objetivo f_{min} para una concentración de entrada C_o .

Parecería contradictorio que el flujo objetivo sea menor que el flujo fijo del sistema, sin embargo esto se entiende hasta que se demuestra (más adelante) como se puede alcanzar el flujo fijo en el diseño.

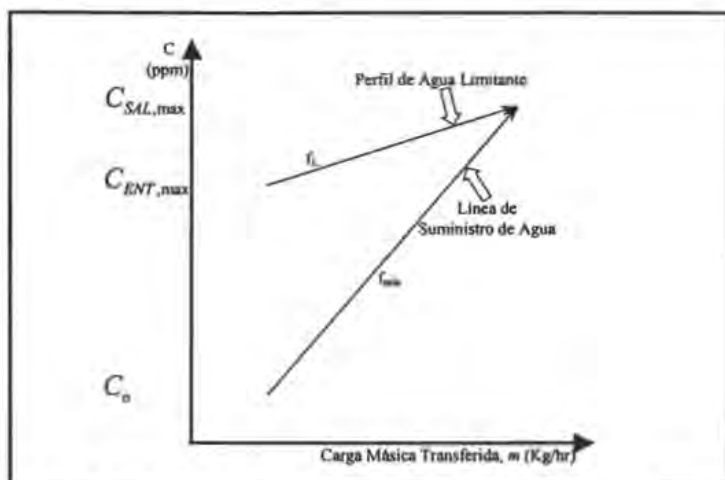


Figura 3.25. Flujo de agua mínimo para una operación simple con requerimientos fijos de agua

3.5.1.1 Diseño con Reciclaje Local

La figura 3.26 muestra un diseño que introduce el flujo f_{min} y alcanza el flujo fijo en el proceso f_L por reciclaje local ($f_L - f_{min}$).

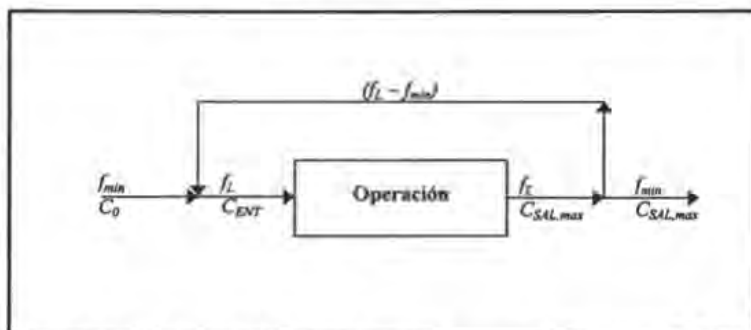


Figura 3.26. El reciclaje local puede usarse para mantener los requerimientos de flujo de la operación

Un balance de masa sencillo demuestra que la concentración de entrada al proceso se encuentra dentro del límite. La concentración resultante de mezclar el flujo f_{min} considerado en el reciclaje local ($f_L - f_{min}$) es:

$$C_{ENT} = \frac{C_o f_{min} + C_{SAL,max} (f_L - f_{min})}{f_L} \quad (3.14)$$

Del flujo objetivo se tiene que la carga másica del flujo fijo es la misma que la del flujo objetivo, por lo cual se deduce que:

$$f_{min} = \frac{C_{SAL,max} - C_{ENT,max}}{C_{SAL,max} - C_o} f_L \quad (3.15)$$

Remplazando f_{min} de la ecuación (3.15) en la (3.14):

$$\begin{aligned} C_{ENT} &= \frac{1}{f_L} \left(f_L C_o \frac{C_{SAL,max} - C_{ENT,max}}{C_{SAL,max} - C_o} + f_L C_{SAL,max} - f_L C_{SAL,max} \frac{C_{SAL,max} - C_{ENT,max}}{C_{SAL,max} - C_o} \right) \\ &= C_{ENT,max} \end{aligned}$$

Por lo tanto la concentración de entrada se encuentra dentro del límite máximo permisible para la operación.

3.5.1.2 Diseño con re-uso

Considérese ahora como la operación de la figura 3.25 puede diseñarse usando el flujo f_{min} , sin reciclaje local y considerando únicamente el re-uso. La figura 3.27 ilustra un método de diseño con re-uso, usando solo el flujo f_{min} y manteniendo las restricciones de flujo. En la figura 3.27(a) la operación se ha dividido en dos partes. El que una operación pueda dividirse en diferentes partes depende en gran medida de la naturaleza de la operación, por ejemplo, una operación de lavado multietapas puede ser fácilmente dividida, mientras que una operación de agotación con vapor no puede dividirse tan fácilmente.

En la figura 3.27(a) la operación se ha dividido a modo que cada parte tenga un requerimiento de flujo menor o igual a f_{min} ; la parte 1 se considera que tiene un flujo igual a f_{min} y la parte 2 tiene el resto del flujo. La figura 3.27(b) muestra que si el agua es re-usada entre estas dos partes el diseño será factible si la parte que requiere menor flujo se alimenta primero.

Por otro lado, la figura 3.27(c) muestra la misma corriente pero dividida en un orden diferente. La figura 3.27(d) muestra el re-uso de agua entre las dos partes, pero alimentando primero la parte con mayor flujo. Ahora la concentración de salida de la parte 2 excede la concentración máxima de entrada de la parte 1 por lo que no es factible el diseño.

En caso que se haya excedido el flujo f_{min} en cualquiera de las dos partes de la operación de la figura 3.27(a) ésta se puede dividir aún mas hasta que todas las partes alcancen un flujo igual

o menor a f_{min} . El argumento aplicable para ordenar cada una de las partes de la operación es que se debe usar primero el agua con los requerimientos de flujo menor, posteriormente la parte con un requerimiento mayor y así sucesivamente. Basado en lo anterior se puede concluir que puede diseñarse una operación simple como la mostrada en la figura 3.27 empleando el flujo f_{min} sin reciclaje local siempre que la operación pueda dividirse en partes y que cada una de ellas presente un requerimiento de flujo menor o igual a f_{min} .

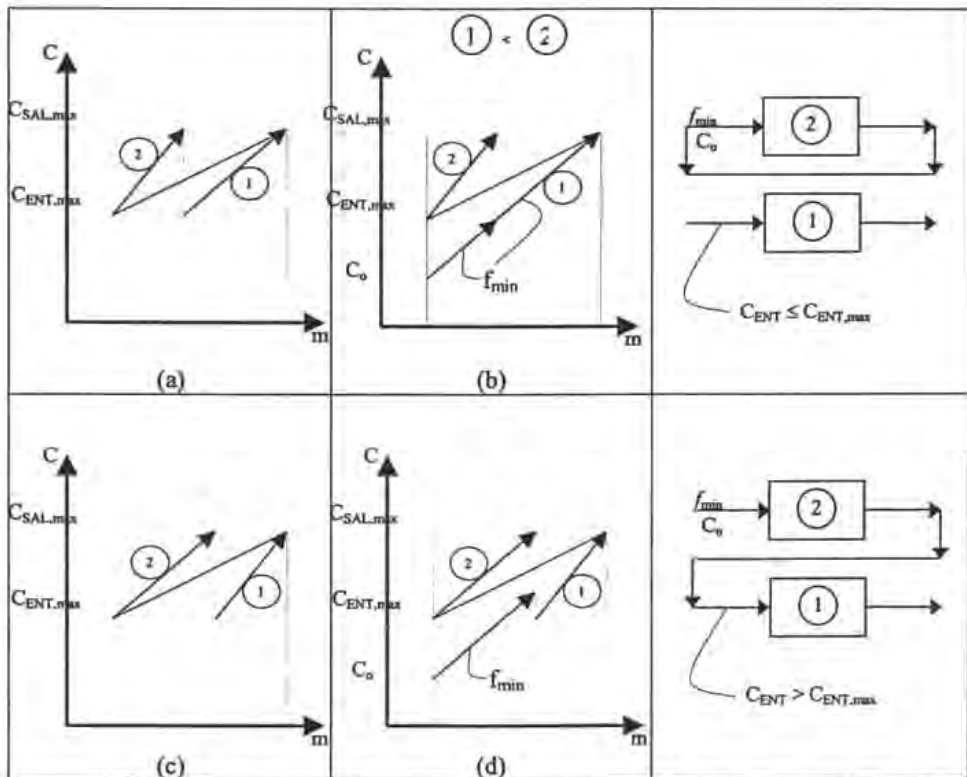


Figura 3.27. Si una operación simple es dividida en partes, entonces se puede emplear el re-uso para satisfacer los requerimientos de flujo siempre que la parte con el flujo menor se alimente primero.

- (a) Dividiendo la operación en dos partes con la parte 1 igual al flujo f_{min} .
- (b) El re-uso donde la parte con menor flujo se alimenta primero lleva a un diseño factible
- (c) Dividiendo la operación en dos partes con la parte 2 igual al flujo f_{min} pero en un diferente orden
- (d) El re-uso donde la parte con mayor flujo se alimenta primero lleva a un diseño no-factible

En resumen, el diseño usando el re-uso debe ser de tal forma que para cumplir con los requerimientos de agua, el uso debe ser en orden ascendente (Figura 3.28).

Se puede comprobar que la concentración de entrada en la parte final del proceso de la figura 3.28 es $C_{ENT,max}$ mediante un balance de masa sencillo. La concentración de entrada, C_{ENT} , es:

$$C_{ENT} = C_0 + \frac{(f_L - f_3)(C_{SAL,max} - C_{ENT,max})}{f_{min}} \quad (3.16)$$

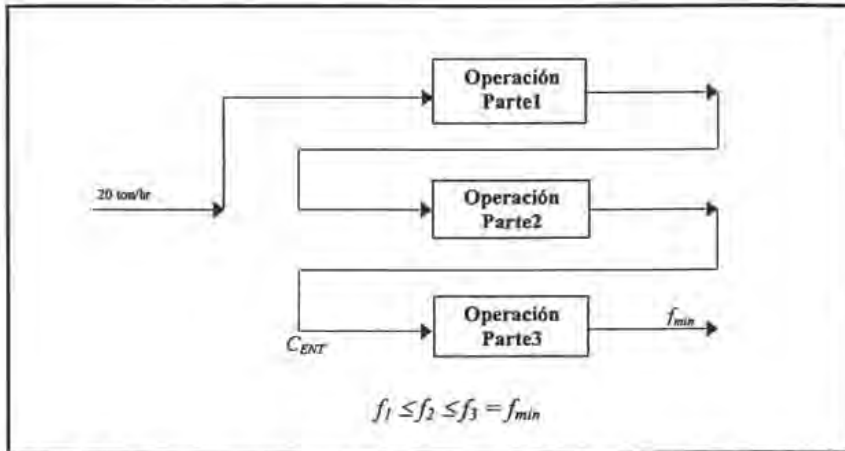


Figura 3.28. Una operación puede dividirse en cualquier número de partes pero el agua debe re-usarse con los requerimientos de flujo en orden ascendente

Del flujo objetivo:

$$f_L(C_{SAL,max} - C_{ENT,max}) = f_{min}(C_{SAL,max} - C_0) \quad (3.17)$$

Por lo tanto, suponiendo que $f_3 = f_{min}$:

$$\begin{aligned} C_{ENT} &= C_0 + \frac{1}{f_L} [f_L(C_{SAL,max} - C_{ENT,max})] - \frac{1}{f_{min}} [f_{min}(C_{SAL,max} - C_{ENT,max})] \\ &= C_0 + C_{SAL,max} - C_0 - C_{SAL,max} + C_{ENT,max} \\ &= C_{ENT,max} \end{aligned}$$

Para una operación simple con requerimientos de flujo fijo definido por f_L es posible diseñar con el flujo mínimo f_{min} , ya sea por reciclaje local o por re-uso dividiendo la operación de tal modo que cada parte use un flujo menor o igual a f_{min} y se alimenten con los requerimientos de flujo en orden ascendente.

3.5.2 Operaciones Múltiples con flujo Fijo

Considérese ahora la curva compuesta de la figura 3.29, donde todas las operaciones que forman la curva compuesta presentan flujo fijo. Se ha trazado una línea de suministro de agua y su pendiente incrementada al máximo, de forma que toque la curva limitante en el punto pinch.

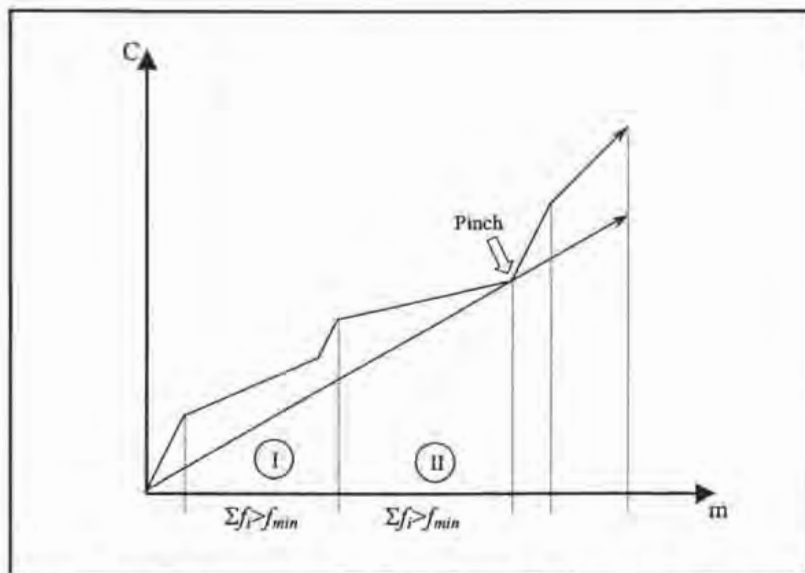


Figura 3.29 El flujo de la curva compuesta limitante es mayor que f_{min} en algunos intervalos de masa

La curva está dividida en intervalos de carga másica verticales de forma que donde se presenta un cambio en la pendiente se crea una frontera que divide el sistema en intervalos de carga másica. En algunos intervalos el requerimiento de flujo total es menor a f_{min} y cabe esperar que en estos el diseño sea sencillo. Sin embargo en los intervalos de carga másica I y II los requerimientos de flujo total exceden a f_{min} y en éstos el diseño presenta mayores problemas. De los dos intervalos, el intervalo II que alcanza el pinch es el más restringido.

La única diferencia, en principio, entre el proceso simple de la figura 3.25 y el intervalo 2 de la figura 3.29, es que la corriente del intervalo II cuenta con varias corrientes, por lo que es posible, para este intervalo, realizar el diseño usando reciclaje local, tal y como se muestra en la figura 3.30. En la figura 3.30(a) las corrientes de salida de las operaciones que forman la curva compuesta en el intervalo II son mezcladas antes de efectuar el reciclaje local. Un balance de masa simple demuestra que el flujo de reciclaje satisface las restricciones del sistema. Si se asume que el flujo total para los tres procesos es Σf_i , entonces el flujo de reciclaje es $(\Sigma f_i - f_{min})$.

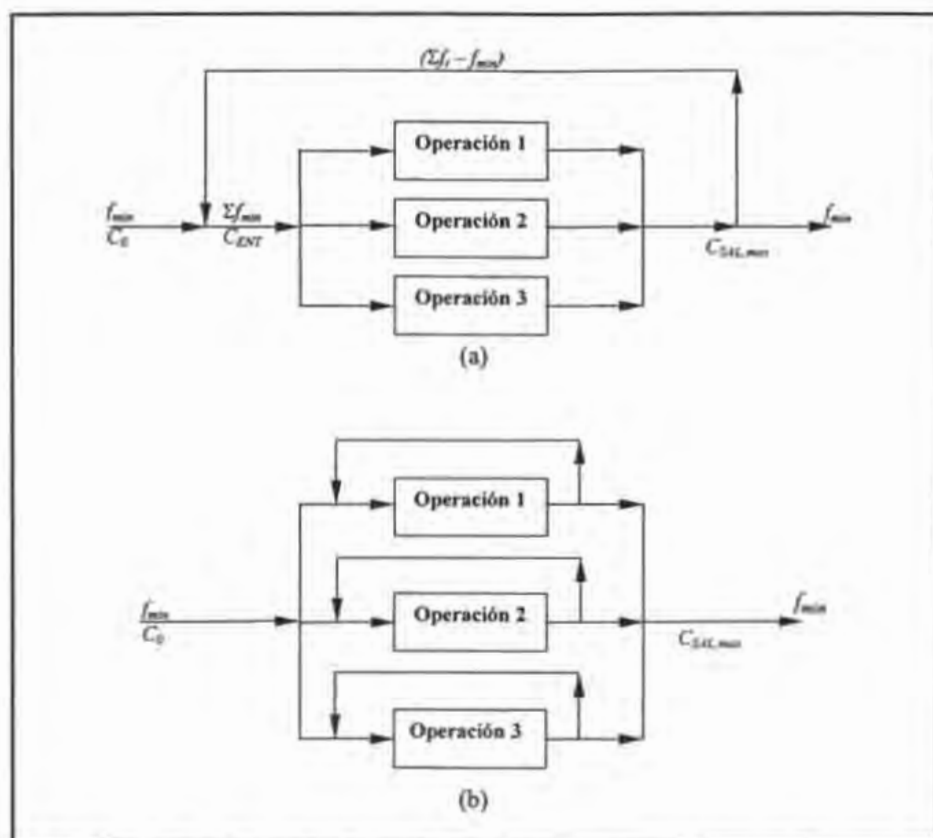


Figura 3.30 El reciclaje local puede implementarse en diferentes formas para satisfacer los requerimientos mínimos de flujo. (a) El reciclaje local alrededor de varias operaciones se puede usar para satisfacer las restricciones de flujo. (b) El reciclaje local alrededor de operaciones individuales se puede usar para satisfacer las restricciones de flujo.

La concentración de entrada al proceso es:

$$C_{ENT} = \frac{C_e f_{min} + C_{SAL,max} (\Sigma f_i - f_{min})}{\Sigma f_i} \quad (3.18)$$

Del flujo objetivo se tiene que:

$$f_{min} (C_{SAL,max} - C_e) = \Sigma f_i (C_{SAL,max} - C_{ENT,max}) \quad (3.19)$$

Por lo tanto,

$$C_{ENT} = \frac{\sum f_i(C_{SAL,max}) - \sum f_i(C_{SAL,max} - C_{ENT,max})}{\sum f_i}$$

$$= C_{ENT,max}$$

En la figura 3.20(b) se muestra un diseño alternativo para el intervalo II con reciclaje local. Aquí el reciclaje local es alrededor de las operaciones individuales en lugar de mezclarlas todas antes de efectuar el reciclaje local. La figura 3.30(a) y 3.30(b) representan dos opciones de diseño que pueden alcanzar el flujo objetivo f_{min} manteniendo las restricciones de flujo de los procesos individuales.

Si el reciclaje local no es permitido, entonces la figura 3.31 muestra un diseño para el intervalo II con re-uso. Este sigue la filosofía adoptada para re-uso en operaciones simples, pero ahora la diferencia es que el intervalo se divide, ya que el sistema total consiste de varias operaciones. En la medida que cada operación requiera un flujo menor o igual a f_{min} no hay necesidad de dividir las operaciones individuales.

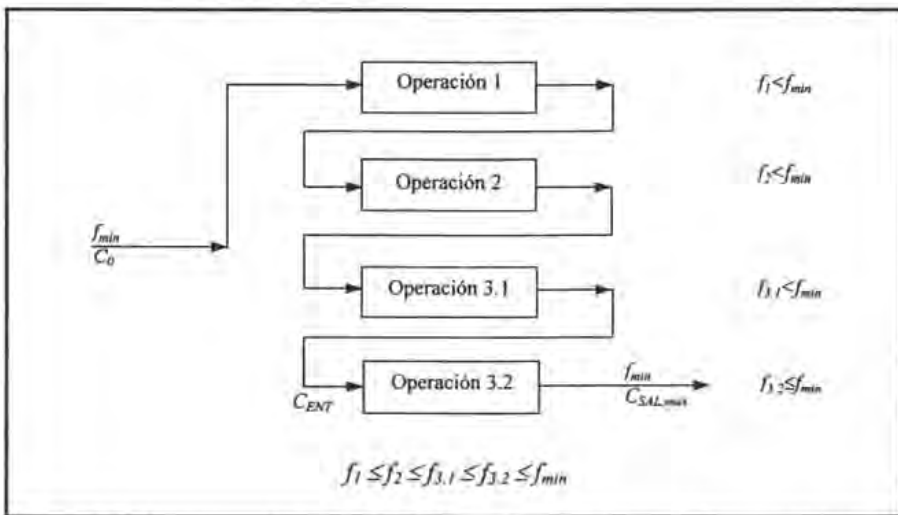


Figura 3.31 Los requerimientos de flujo mínimo pueden satisfacerse por re-uso de agua en orden ascendente.

En la figura 3.31 las operaciones 1 y 2 requieren flujo menor a f_{min} , mientras que la operación 3 tiene requerimientos de flujo mayores a f_{min} , por lo tanto la operación 3 se ha dividido en dos partes. En este caso una división en dos partes satisface las restricciones que cada operación o puede suceder que parte de la operación puede requerir con un flujo menor o igual a f_{min} .

También en la figura 3.31 el orden de re-uso es ascendente y sigue los mismos argumentos presentados en la figura 3.27. Un balance sencillo puede, nuevamente demostrar la factibilidad La concentración de entrada de la parte 3_2 de la operación es:

$$C_{ENT} = C_0 + \frac{(\sum f_i - f_{3_2})(C_{SAL,max} - C_{ENT,max})}{f_{min}} \quad (3.20)$$

Del flujo objetivo:

$$\sum f_i (C_{SAL,max} - C_{ENT,max}) = f_{min} (C_{SAL,max} - C_0) \quad (3.21)$$

Por lo tanto, suponiendo que $f_{3_2} = f_{min}$:

$$\begin{aligned} C_{ENT} &= C_0 + \frac{1}{\sum f_i} [\sum f_i (C_{SAL,max} - C_{ENT,max})] - \frac{1}{f_{min}} [f_{min} (C_{SAL,max} - C_{ENT,max})] \\ &= C_0 + (C_{SAL,max} - C_0) - (C_{SAL,max} + C_{ENT,max}) \\ &= C_{ENT,max} \end{aligned}$$

Que pasaría, sin embargo, si el reciclaje local no es deseable o no esta permitido y la operación no puede dividirse?. En este caso el flujo mínimo objetivo para cualquier intervalo no debe ser mayor a f_{min} . Debido a que cada operación para su re-uso debe tener un requerimiento de flujo menor o igual a f_{min} y si la división de la operación no está permitida en el intervalo, entonces el flujo objetivo mínimo f_T esta dado por:

$$f_T = \max\{f_{min}, f_i\} \quad (3.22)$$

donde f_{min} esta dado por la pendiente mayor de la línea de suministro de agua (la cual puede ó no tocar a la curva compuesta), y f_i es el requerimiento de flujo para cada operación i . Nótese que la ecuación 3.22 solo garantiza que la división de la operación en algún intervalo no sea necesaria, aunque podría ser necesario dividir aun mas una operación entre intervalos.

Regresando al ejemplo 1 de estudio, ya se ha deducido que el flujo objetivo mínimo es de 90 ton/hr cuando se permite variar los flujos de proceso. Se puede establecer que si se permite reciclaje local o re-uso dividiendo la operación, entonces el flujo objetivo debe permanecer en 90 ton/hr. Sin embargo, en caso que no se permita reciclaje o re-uso se puede dividir la operación en el intervalo o intervalos restringidos y entonces el flujo objetivo mínimo estara dado por:

$$\begin{aligned} f_T &= \max\{f_{min}, f_i\} \\ &= \max\{90, 20, 100, 40, 10\} \\ &= 100 \text{ ton/hr} \end{aligned}$$

donde los flujos f_i se tomaron de la tabla 3.1 y corresponden al de cada uno de los procesos.

Para que este flujo objetivo sea manejable en el sistema, considerando los requerimientos de proceso con flujo fijo, debe obtenerse un diseño que permita alcanzar estos requerimientos y donde la concentración para cada operación no exceda los máximos de entrada y salida permisibles. Los métodos de diseño estudiados en el apartado 3.4 se han manejado para situaciones donde se permite la variación del flujo y se basaron en la maximización del uso de la diferencia de concentraciones entre la curva compuesta limitante y la línea de suministro de agua o minimizando el número de fuentes de agua para cada operación. Nótese que aquí el número de fuentes de agua se refiere al agua fresca, agua re-usada, etc., en vez de tratarse a diferentes fuentes de agua fresca con diferentes calidades. Cuando se diseñan las redes de agua con requerimientos de flujo fijo usualmente es deseable usar solamente una fuente de agua para cada operación, esto es, evitar la división de las operaciones. Si el proceso permite la división de las operaciones, entonces el número de divisiones se debe mantener al mínimo.

En el apartado 3.3 se permitía variar el flujo de las operaciones individuales y ahora éste se combinara con el método de diseño presentado en el apartado 3.4 para tener un método capaz de manejar restricciones de flujo en operaciones con reciclaje local ó con división de operaciones. La figura 3.32 ilustra el uso de la aproximación para el ejemplo 1 considerando que los datos de la tabla 3.1 presenta requerimientos de flujo fijo.

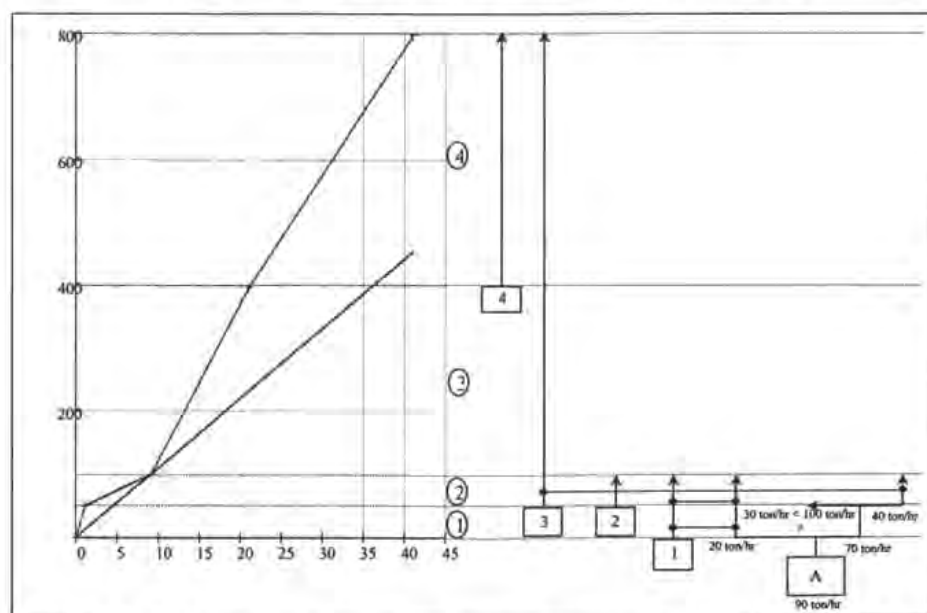


Figura 3.32 El diseño para el ejemplo 1 inicia satisfaciendo los requerimientos del primer intervalo de concentración pero el flujo que entra al segundo intervalo resulta insuficiente

El método comienza dividiendo el problema en intervalos de concentración para definir los nodos. En cada nodo solo se usa el agua necesaria para mantener la factibilidad de la red y de este modo se continúa a través de la curva compuesta limitante minimizando la diferencia de concentraciones en los nodos individuales. Si se tiene disponible mas agua que la requerida entonces cualquier exceso es desviado para ser mezclado mas adelante y así mantener la factibilidad.

Comenzando en el **intervalo 1** con 90 ton/hr de agua fresca, (figura 3.32), solo existe la operación 1 y esta se une con agua fresca. Solo se usa la cantidad de agua necesaria para mantener la factibilidad, esto es 20 ton/hr, dando una concentración de salida de 50 ppm, el resto del agua se desvía para usarse mas adelante. Esto altera el volumen mínimo de agua en el intervalo 1.

En el **intervalo 2** las operaciones 1, 2 y 3 existen simultáneamente, así que el agua se divide entre estas operaciones. El nodo de la operación 1 se repite en el segundo intervalo; la operación 3 requiere 40 ton/hr de agua y se une con 40 ton/hr de las 70 ton/hr desviadas del primer intervalo. Ahora se presenta un problema ya que la operación 2 en este intervalo requiere 100 ton/hr y solamente se tienen disponibles 30 ton/hr. El problema se resuelve en la figura 3.33 introduciendo reciclaje local para satisfacer las restricciones de flujo de la operación 3. Las corrientes de agua en este punto han alcanzado la concentración pinch de 100 ppm. El diseño se completa en la figura 3.34 sin complicaciones siguiendo la metodología descrita en el apartado 3.4.

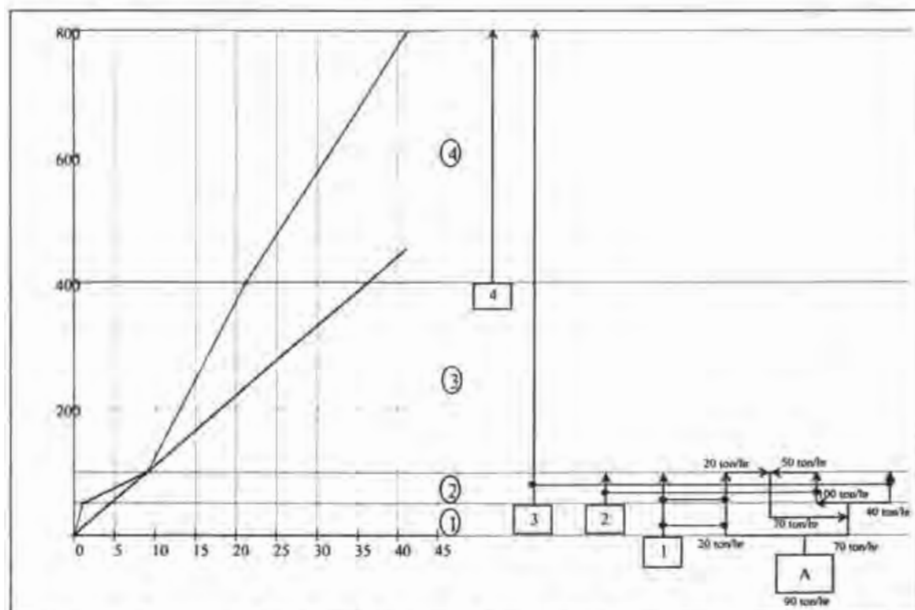


Figura 3.33 Reciclaje local en el segundo intervalo de concentración del ejemplo 1 satisface los requerimientos de flujo

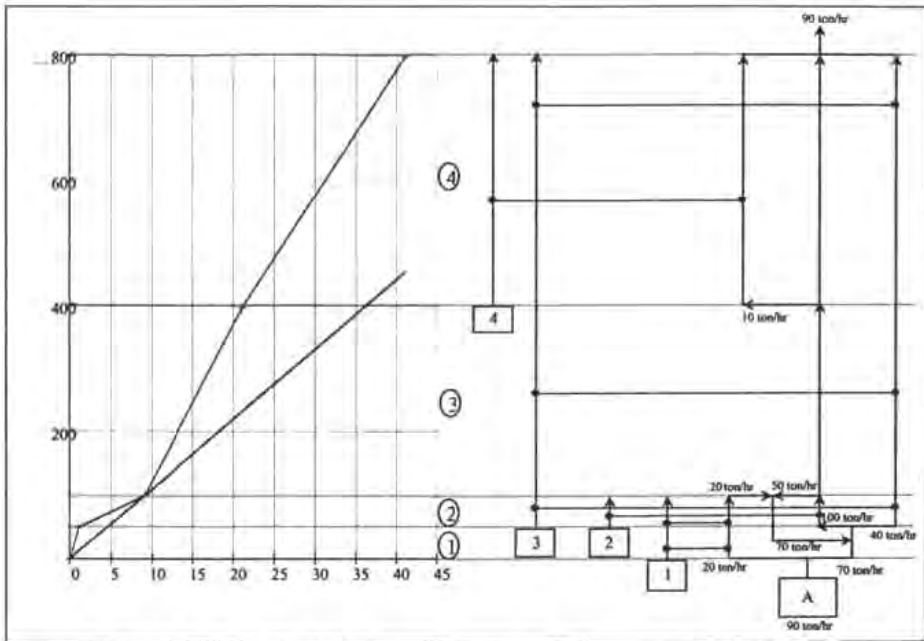


Figura 3.34 Diseño inicial completo para el ejemplo 1 con reciclaje local

El diseño de la figura 3.34 presenta una complejidad innecesaria por lo que se usa el método para la simplificación de la red presentada en el apartado 3.4. Primero se identifican los ciclos en el diseño como se muestra en la figura 3.35(a).

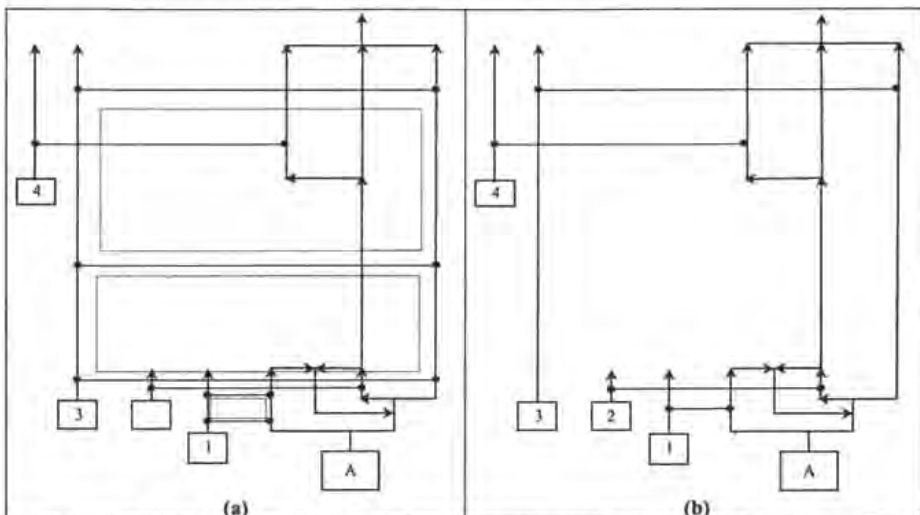


Figura 3.35 Diseño final para el ejemplo 1 con reciclaje local. (a) Diagrama de mallas inicial mostrando ciclos. (b) Diagrama de mallas final

Estos ciclos entonces se cortan combinando las cargas másicas entre las unidades que componen el ciclo. El resultado se muestra en la figura 3.35(b) y el diseño final mostrado como diagrama de flujo convencional se presenta en la figura 3.36, el cual maneja el flujo objetivo de 90 ton/hr usando una sola fuente de agua para cada operación y aplicando además el reciclaje local.

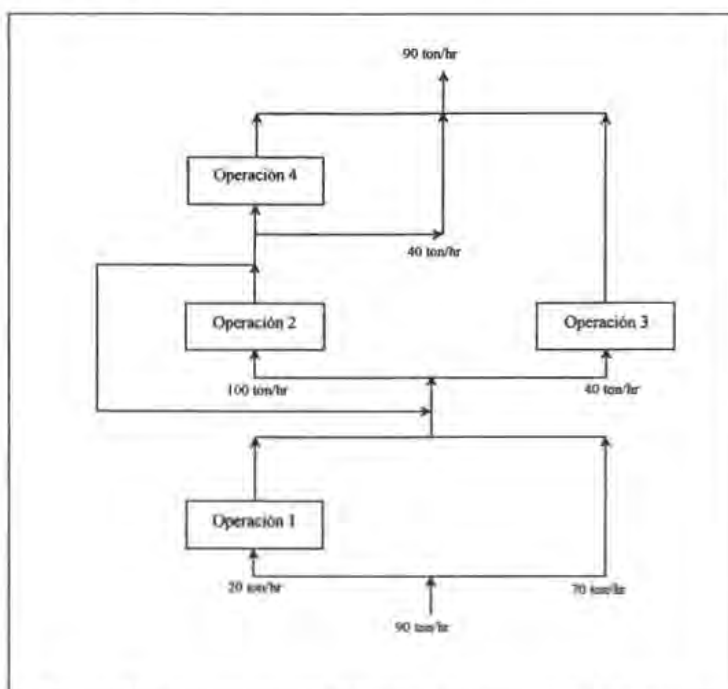


Figura 3.36 Diseño final representado como un diagrama de flujo convencional para el ejemplo 1 aplicando el reciclaje local

Para fines de comparación se presentara un diseño alternativo en la figura 3.37, el cual no presenta reciclaje local sino solo re-uso, y que maneja también el flujo objetivo de 90 ton/hr. Para poder manejar el flujo objetivo, la operación 2, en el intervalo 2, se ha dividido en dos partes: una parte con 70 ton/hr y la otra con 30 ton/hr. La figura 3.38(a) muestra el diseño inicial identificando los ciclos y la figura 3.38(b) muestra la red después de haber cortado los ciclos. El diseño final, después de la simplificación de la red, se muestra como un diagrama de flujo convencional en la figura 3.39.

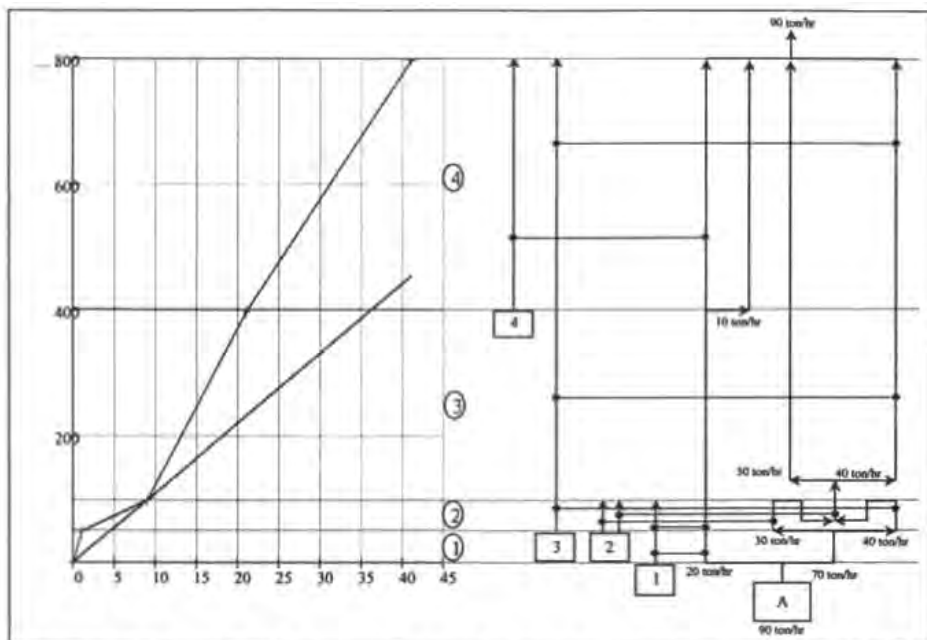


Figura 3.37 Diseño para el ejemplo 1 con reciclaje local permitiendo la división de la operación en los intervalos

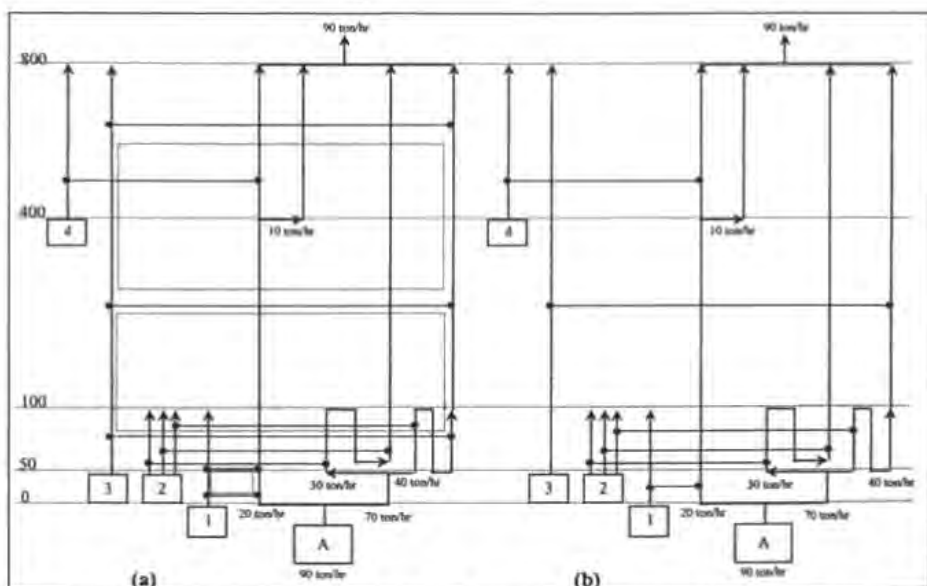


Figura 3.38 Diseño final sin reciclaje local permitiendo división de las operaciones en los intervalos. (a) Diagrama de mallas inicial mostrando los ciclos. (b) Diagrama de mallas final

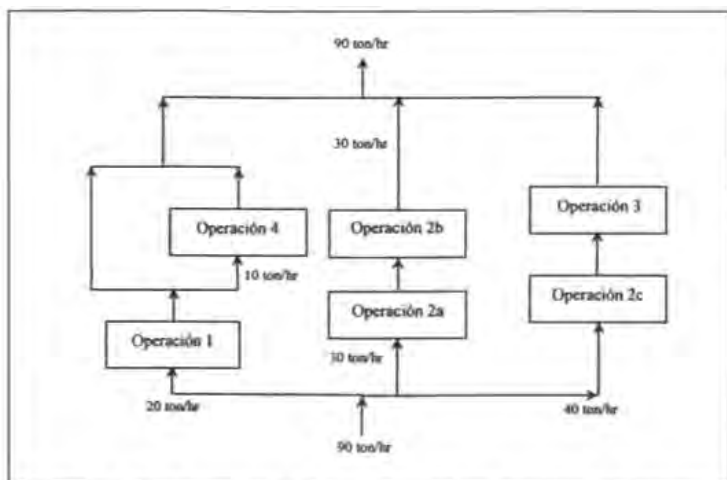


Figura 3.39 Diseño final representado como un diagrama de flujo convencional sin reciclaje local permitiendo división de las operaciones en los intervalos

Finalmente, ahora supóngase que para el ejemplo 1, de la tabla 3.1, no se permite en los intervalos ni el reciclaje ni la división de las operaciones. Entonces el flujo mínimo objetivo para este caso es de 100 ton/hr. La figura 3.40 muestra el diseño inicial para este caso.

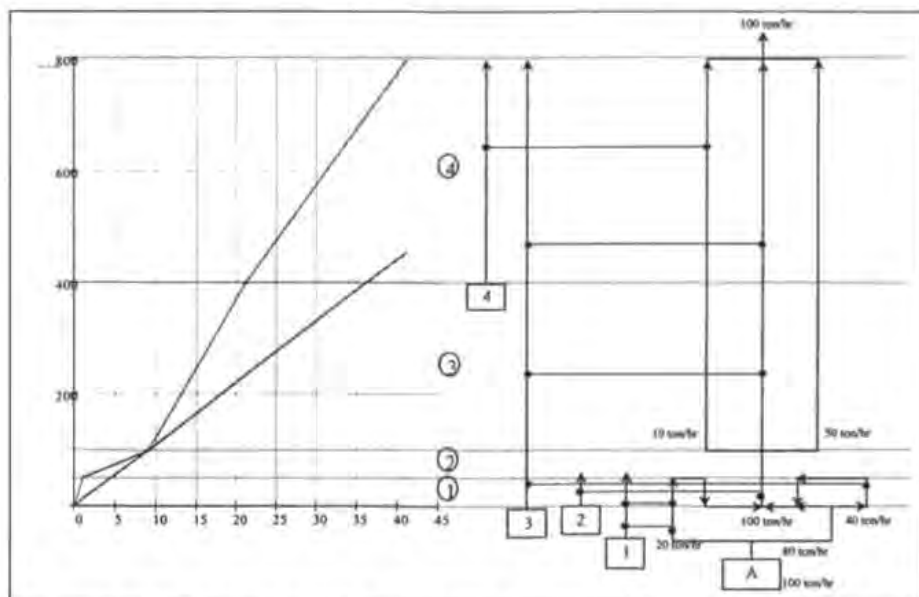


Figura 3.40 Diseño inicial para el ejemplo 1 sin reciclaje local y sin permitir la división de las operaciones en los intervalos

La figura 3.41(a) muestra el diseño con los ciclos identificados y la 3.41(b) lo muestra después de haber cortado los ciclos. Nótese que en la figura 3.41(b) se ha mantenido un ciclo sencillo. Si este ciclo se corta la red no resulta factible y para restaurar la factibilidad se debe incrementar el flujo de agua. El que se mantenga el ciclo de la figura 3.41 significa que la operación 3 se ha dividido y debe satisfacer sus requerimientos con dos fuentes de agua diferentes. Aquí debe recordarse que la ecuación 3.22 solo garantiza que una operación no será dividida en algún intervalo. La figura 3.42 muestra el diseño de la figura 3.41 representado como un diagrama de flujo convencional.

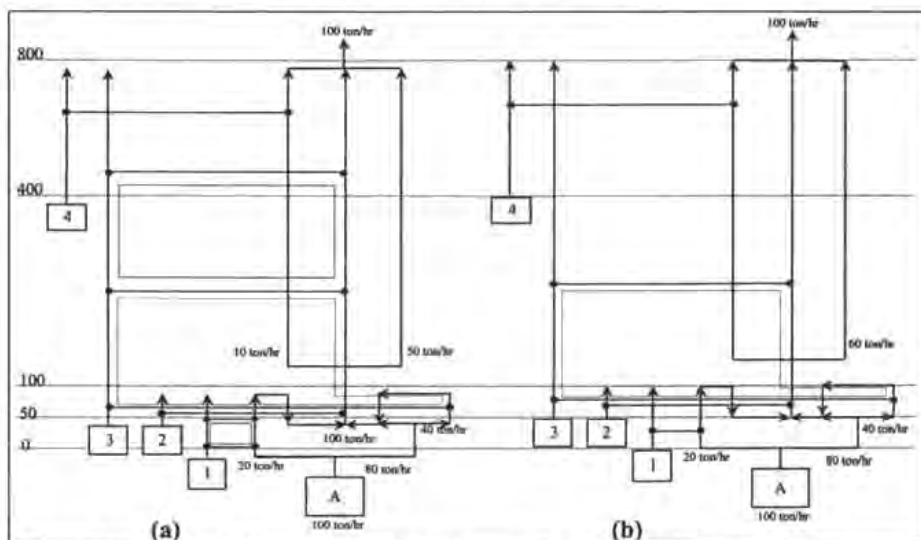


Figura 3.41 Diseño final para el ejemplo 1 sin reciclaje local y sin división de las operaciones en los intervalos. (a) Diagrama de mallas inicial mostrando los ciclos. (b) Diagrama de mallas final

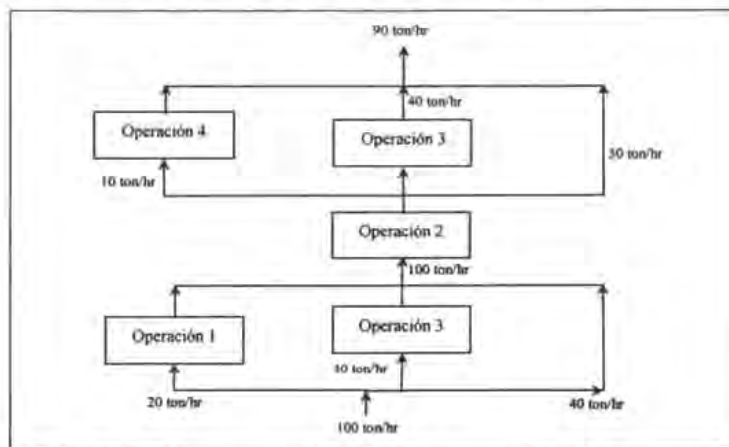


Figura 3.42 Diseño final representado como un diagrama de flujo convencional para el ejemplo 1 sin reciclaje local y sin división de las operaciones en los intervalos

Si la división de corrientes de la operación 3 en los intervalos mostrados en la figura 3.42 es inaceptable, entonces el ciclo se puede cortar incrementando el flujo de agua para mantener la factibilidad, como se muestra en el diseño de la figura 3.43. En este último las restricciones de flujo y concentración se mantienen sin el reciclaje local ni la división de la operación pero con una penalidad adicional de 11.4 ton/hr. Nótese que a pesar de esto, el flujo aun es considerablemente menor que las 160 ton/hr mostradas en la tabla 3.1, esto es, el total demandado por el sistema.

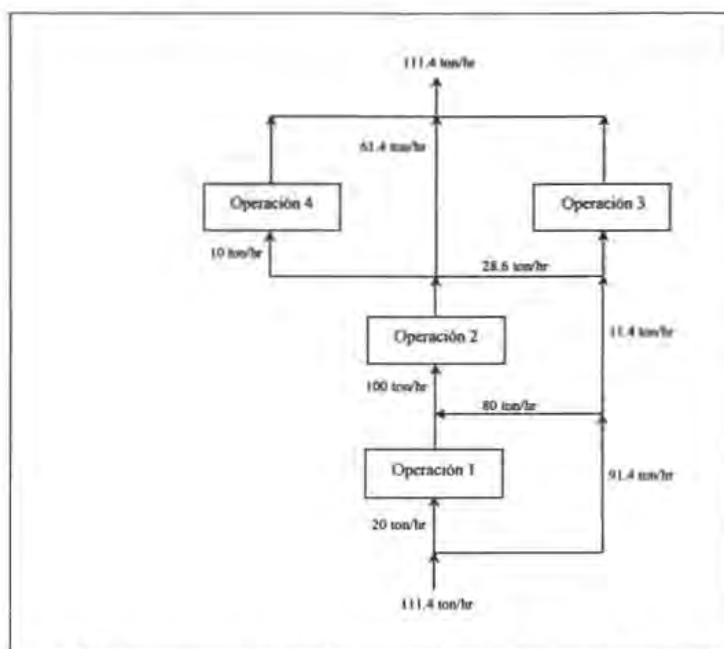


Figura 3.43 Diseño para el ejemplo 1 sin reciclaje local y sin división de las operaciones

3.5.3 Múltiples Fuentes de Agua Fresca

Frecuentemente existen en la planta o complejo varias fuentes de agua fresca disponibles con diferentes calidades que pueden usarse en las diferentes operaciones. Para satisfacer sus requerimientos, generalmente el agua fresca con mejor calidad es la mas cara, por lo que normalmente el flujo objetivo de ésta requiere minimizarse a expensas de las de menor calidad.

Considérese una situación donde existen tres fuentes de agua fresca disponibles: agua desmineralizada, agua potable y agua de pozo. El agua de mejor calidad es la desmineralizada y la de mejor calidad es la de pozo. La figura 3.44 muestra una curva compuesta usando solo agua fresca de mejor calidad sin contaminantes.

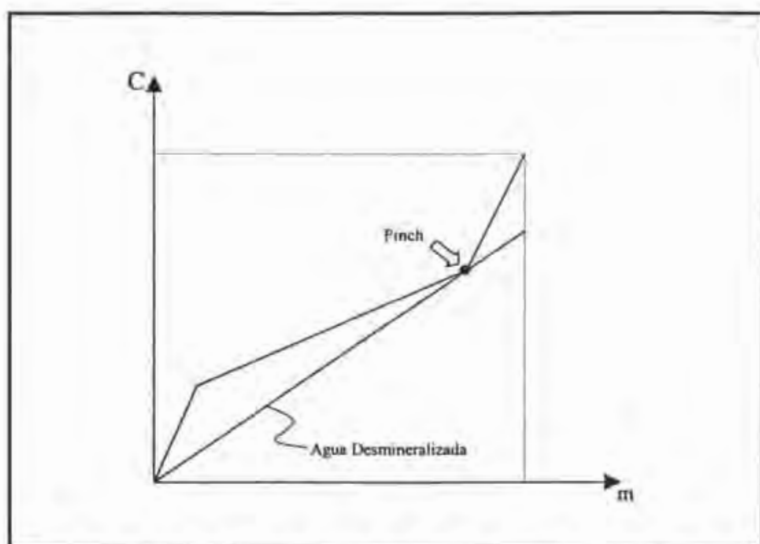


Figura 3.44 Flujo Objetivo con el de mejor calidad de agua (desmineralizada)

En la figura 3.45 el agua desmineralizada es sustituida por agua potable a partir del punto de la curva compuesta donde se encuentra C_{POT} . La pendiente abajo de C_{POT} de la curva compuesta limitante determina el flujo mínimo de agua desmineralizada que se necesita en el sistema. La diferencia de la pendiente entre la línea de suministro de agua arriba y abajo de C_{POT} determina la cantidad de agua potable.

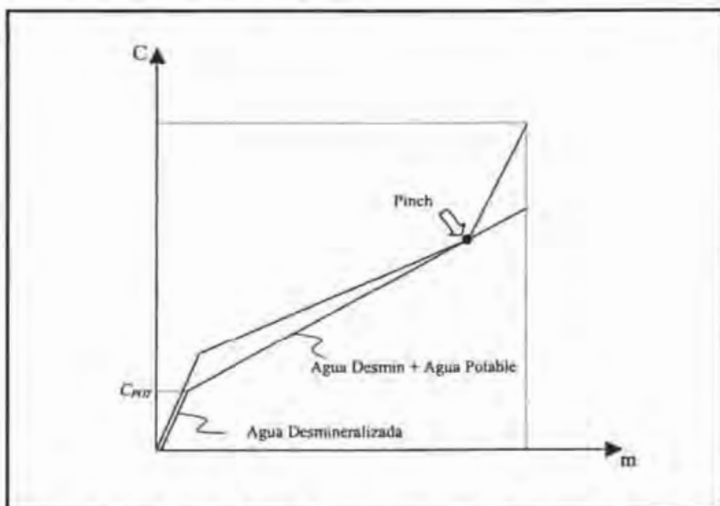


Figura 3.45 Flujo objetivo con una mezcla de agua de mayor calidad (desmineralizada) y agua de calidad intermedia (potable)

En la figura 3.46, parte del agua potable es sustituida por agua de pozo a partir de la curva compuesta donde se encuentra C_{POZO} . La construcción de la curva de agua en la figura 3.46 minimiza el uso de agua fresca de mejor calidad a expensas del agua de menor calidad.

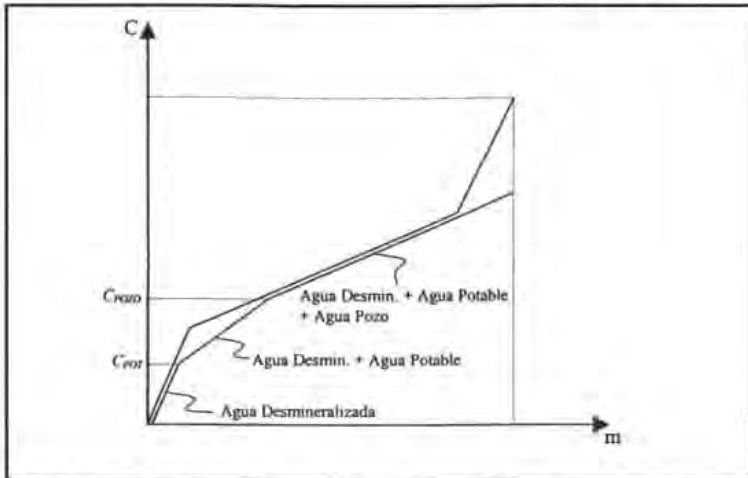


Figura 3.46 Flujo Objetivo con una mezcla de agua de mayor calidad (desmineralizada), agua de calidad intermedia (potable) y agua de baja calidad (pozo)

3.5.4 Procesos con Pérdidas de Agua

Varios procesos involucran pérdidas de agua, como en las torres de enfriamiento donde el agua podría re-usarse para suministrar el agua de repuesto a las torres de enfriamiento, sin embargo las pérdidas evaporativas provocan que el agua en cuestión no llega a estar disponible para re-uso. Considérese ahora como tales pérdidas se pueden incluir en el análisis. La figura 3.47 muestra una curva compuesta limitante con una línea de suministro de agua unida en el punto pinch sin presentar pérdidas de agua.

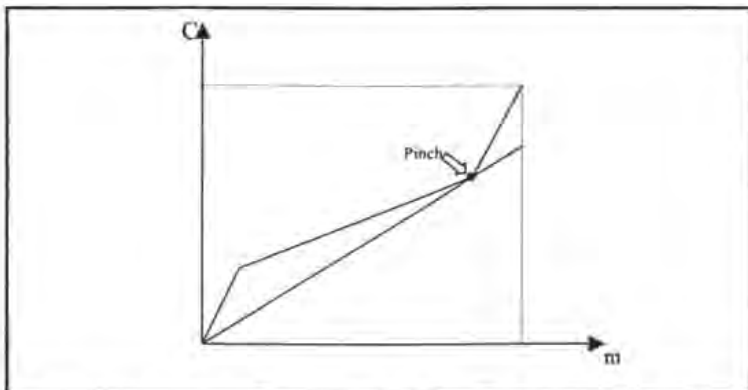


Figura 3.47 Línea de suministro de agua sin pérdidas de agua

Ahora supóngase que un proceso con una concentración máxima de entrada C_{PERD} presenta una pérdida de flujo conocida. Esta pérdida (reducción de flujo) se muestra en la figura 3.48 como un incremento en la pendiente de la línea de suministro de agua a partir de C_{PERD} . La pérdida de flujo determina el cambio en la pendiente y ahora el flujo objetivo no es factible.

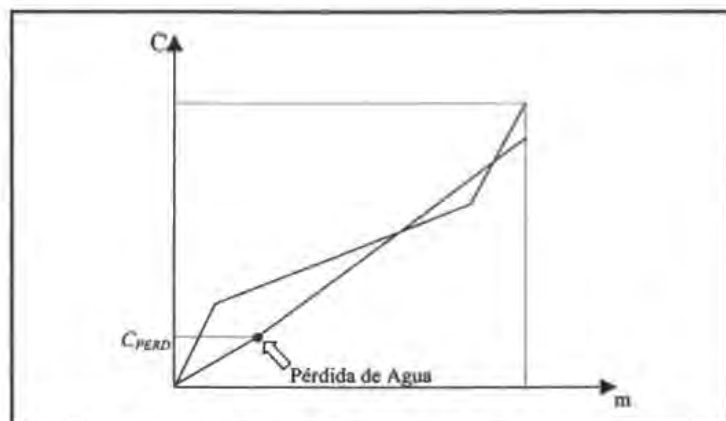


Figura 3.48 El introducir una pérdida de agua al sistema provoca un incremento en la pendiente de la línea de suministro de agua y el flujo objetivo no es factible

La figura 3.49 muestra un incremento en el flujo objetivo para restaurar la factibilidad del sistema. La pendiente de la línea de suministro de agua abajo de C_{PERD} proporciona el flujo objetivo de agua fresca y la pendiente arriba de C_{PERD} proporciona el agua residual.

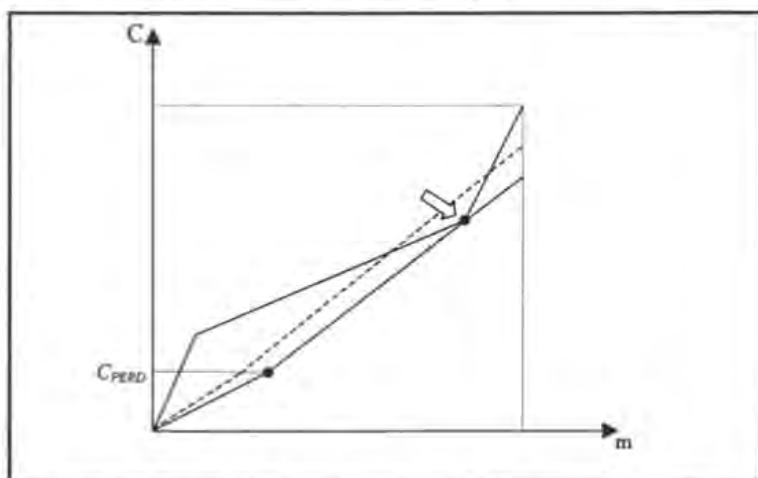


Figura 3.49 El flujo de la línea de suministro de agua se incrementa para mantener la factibilidad

Para entender el concepto, considérese ahora el ejemplo 2 que ilustra como pueden tratarse los flujos de agua variables y fijos, las fuentes de agua múltiples y las pérdidas de agua. Para ello se modificaran los datos de la tabla 3.1 para incluir un proceso con pérdidas de agua, tal y como se indica en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Datos de Proceso para el ejemplo 2

Número Proceso u operación	Carga Máscica de Contaminante Δm (Kg/hr)	C_{Ent} (ppm)	C_{Sal} (ppm)	Flujo de Agua (Ton/hr)
1	2	0	100	20
2	5	50	100	100
3	30	50	800	40
4	-	80	-	10 (Pérdida)

La carga máscica de contaminante para las operaciones 1, 2 y 3 son fijas y sus flujos variables. El flujo para la operación 4 es fijo y se pierde por completo. Existen dos fuentes de agua fresca: la fuente de agua I no contiene contaminante alguno y la fuente de agua II se tiene contaminada con 25 ppm de contaminante.

La figura 3.50(a) muestra la curva compuesta limitante, junto con la línea de suministro de agua, usando solamente la fuente de agua I y sin considerar pérdidas, encontrando que el flujo objetivo es de 90 ton/hr. La fuente de agua II se introduce en la figura 3.50(b), sin considerar las pérdidas de agua. El flujo objetivo ahora es 20 ton/hr de la fuente de agua I y 93.4 ton/hr para la fuente de agua II.

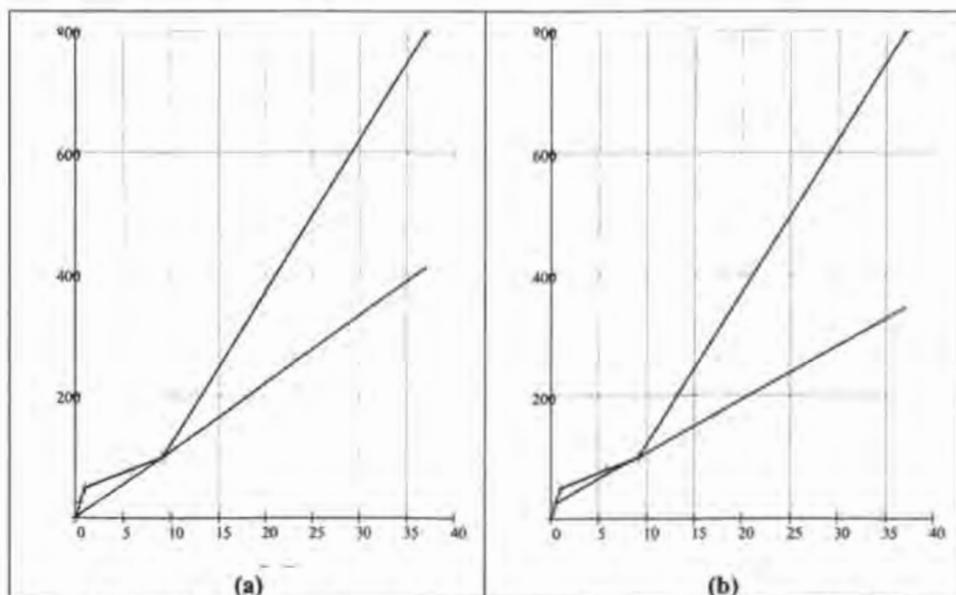


Figura 3.50 Flujo Objetivo para el ejemplo 2 con dos fuentes de agua sin considerar pérdidas. (a) Curva compuesta limitante con la línea de agua usando solo la fuente de agua I (b) Línea de suministro de agua usando una mezcla de la fuente de agua I y II pero minimizando el uso del agua de mejor calidad.

La figura 3.51(a) muestra el efecto que se presenta en el sistema al introducir la pérdida de 10 ton/hr de agua del proceso 4 a 80 ppm. El flujo objetivo ahora no es factible en el sistema. En la figura 3.51(b) el flujo de agua de la fuente de agua II se incrementa para restaurar la factibilidad con lo cual el flujo objetivo para la fuente de agua II ahora es de 96 ton/hr. El flujo resultante del agua residual es de 106 ton/hr.

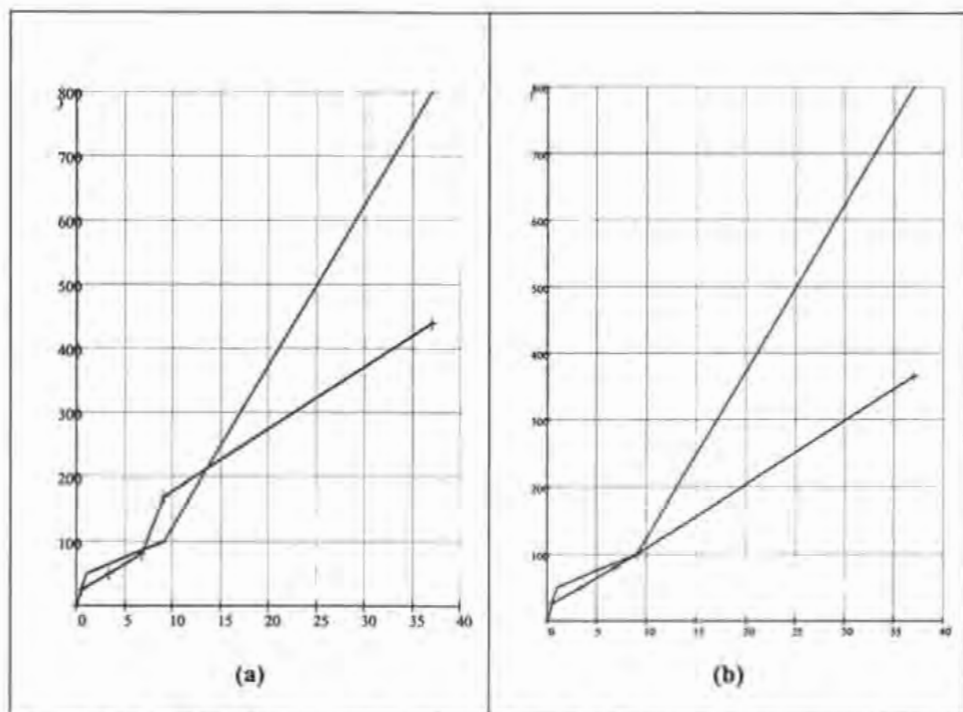


Figura 3.51 Flujo Objetivo para el ejemplo 2 con dos fuentes de agua y considerando pérdidas de agua. (a) Introduciendo la pérdida de 10 ton/hr de agua a 80 ppm provoca que el flujo objetivo no sea factible de usar. (b) Incrementando el flujo de la fuente de agua II hace que el flujo objetivo sea factible.

La figura 3.52 muestra el diseño inicial de la red para satisfacer los requerimientos de flujo del sistema usando el flujo objetivo encontrado. La figura 3.53(a) muestra el diseño inicial indicando los ciclos y la figura 3.53(b) muestra el diseño después de haber cortado los ciclos. El diseño final se muestra en la figura 3.54, representado como un diagrama de flujo convencional, el cual utiliza el flujo objetivo, satisfaciendo e incluyendo las restricciones de flujo y concentración en el sistema usando una fuente de agua para cada proceso.

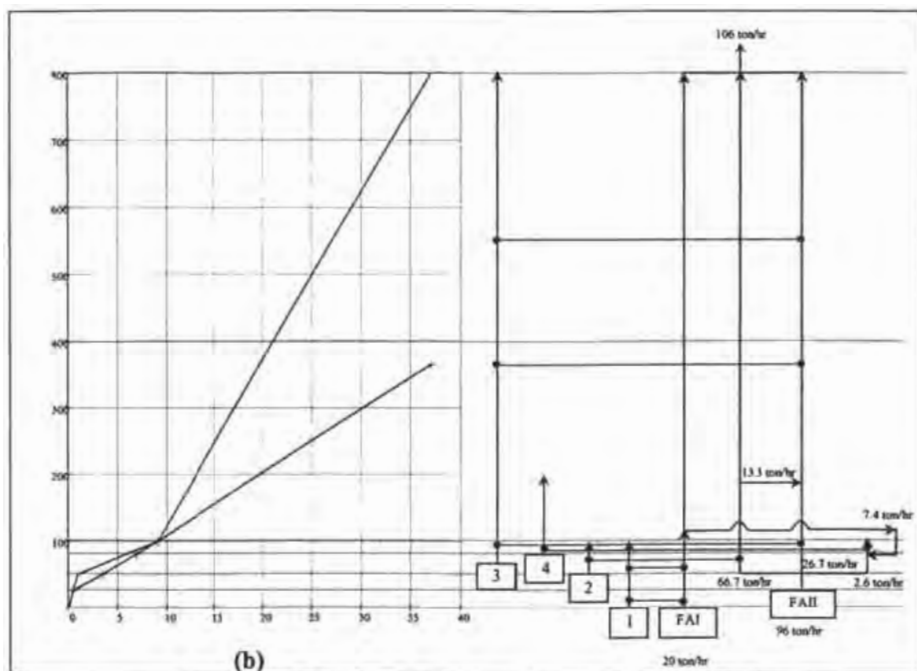


Figura 3.52 Diseño inicial para alcanzar el flujo objetivo

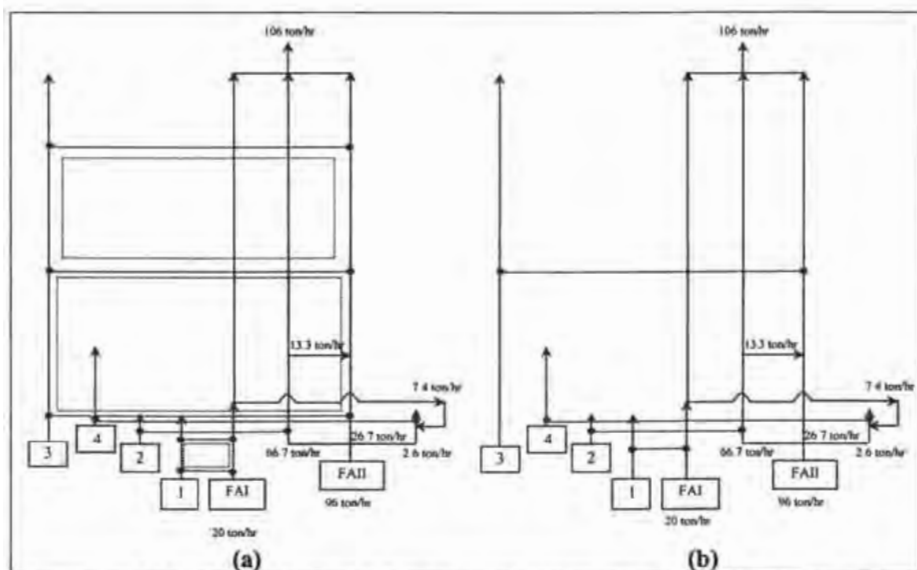


Figura 3.53 Diseño final para el ejemplo 2. (a) Diagrama de mallas inicial mostrando ciclos. (b) Diagrama de mallas final

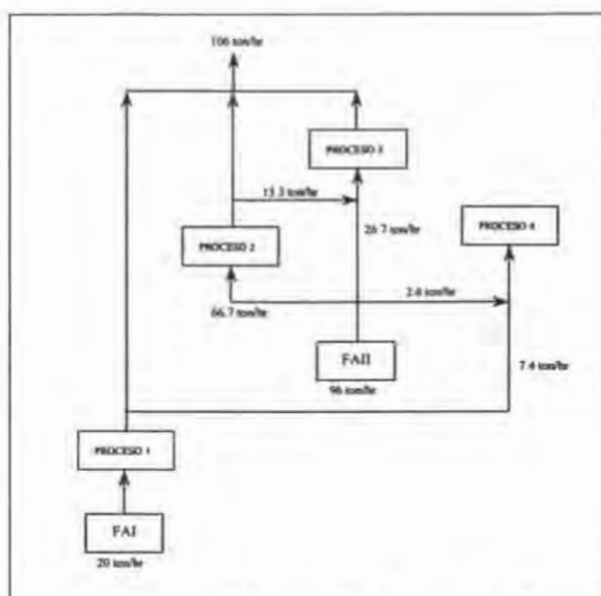


Figura 3.54 Diseño final mostrada como un diagrama de flujo convencional

CAPITULO IV. MINIMIZACION DE AGUA EN SISTEMAS DE CONTAMINANTES MULTIPLES

Hasta ahora se ha establecido una aproximación básica para la minimización de agua con un solo contaminante. La aproximación usada para un solo contaminante puede aplicarse para múltiples contaminantes si se establece que solamente uno sea el contaminante clave, siempre que los otros contaminantes no interfieran con la transferencia de masa de éste contaminante clave. En la aproximación para múltiples contaminantes se puede obtener el flujo objetivo y el diseño de la red tomando como referencia el contaminante clave y simulando el comportamiento para los contaminantes no claves. Sin embargo, es improbable que tal aproximación pueda ser ampliamente aplicable ya que a menudo es necesario tomar en cuenta a varios (si no todos) los contaminantes en el flujo objetivo y el diseño.

Ahora se presentará una aproximación para la minimización de agua residual con múltiples contaminantes y múltiples restricciones ampliando la aproximación para un solo contaminante; se presentará la metodología mediante dos ejemplos hipotéticos. Estos han sido diseñados para ilustrar dos alternativas con características de un problema general.

4.1 Re-uso con Variación de Flujo

Considérese los datos de proceso para el ejemplo 1 indicados en la tabla 4.1. Se hace notar que los datos indicados en dicha tabla son datos limitantes.

Tabla 4.1 Datos Limitantes para el ejemplo 1

Proceso	Contaminante	Carga Másica de Contaminante (Kg/hr)	C_{ENT} (ppm)	C_{SAL} (ppm)	Flujo de Agua (ton/hr)
1	A	4	0	100	40
	B	2	25	75	
2	A	5.6	80	240	35
	B	2.1	30	90	

Se podría pensar que se puede obtener el flujo objetivo del sistema considerando primero al contaminante A como el contaminante clave y después al contaminante B y para ambos casos se obtiene el flujo objetivo usando la aproximación para contaminantes simples. Conociendo estos flujos se eligen el peor caso y se considera como el flujo mínimo de agua, tal y como se muestra en el DIC para cada caso (tabla 4.2 y 4.3).

En estas tablas el valor obtenido de los flujos objetivos son de 47 y 47.7 ton/hr, para la aproximación de los contaminantes A y B respectivamente. Sin embargo, como se verá más adelante, ninguno de estos dos flujos representa el flujo objetivo que se usará en el sistema y con el cual se diseñará la red de agua.

Tabla 4.2 Diagrama de Intervalo de Concentraciones Considerando como clave al contaminante A

Concentración (ppm)	Proceso 1 40 ton/hr	Proceso 2 35 ton/hr	Carga Másica (Kg/hr)	Carga Másica Acumulada (Kg/hr)	Flujo Ton/hr
0	↓			0.0	0
80				3.2	40
100	↓	↓	1.5	4.7	47
240				4.9	9.6

Tabla 4.3 Diagrama de Intervalo de Concentraciones Considerando como clave al contaminante B

Concentración (ppm)	Proceso 1 40 ton/hr	Proceso 2 35 ton/hr	Carga Másica (Kg/hr)	Carga Másica Acumulada (Kg/hr)	Flujo Ton/hr
25	↓			0.0	0
30				0.2	6.67
75	↓	↓	3.375	3.375	47.67
90				0.525	4.1

Para conocer el flujo objetivo para sistemas con múltiples contaminantes y antes de construir la curva compuesta limitante se verificara el mecanismo de transferencia que le esta sucediendo al contaminante B respecto al A. Para ello, primero se necesita relacionar la trasferencia que presenta el contaminante B con la trasferencia del contaminante A. En este caso se supondra que cualquier cantidad de contaminante A trasferido en el sistema es de la misma proporción que la carga másica trasferida del contaminante B, esto es, que se transfiere la misma cantidad de contaminante A y B. Esta suposición no representa una restricción para la aproximación básica del modelo. Siempre que se pueda definir o tener una relación entre la trasferencia de contaminante A y B entonces puede usarse dicha relación en lugar de la suposición. Por ejemplo, se puede usar la ecuación de Kemser para relacionar la trasferencia de dos contaminantes ó se pueden usar diferentes relaciones para diferentes procesos, si esto resulta apropiado. La figura 4.1 ilustra la trasferencia de masa proporcional entre los contaminantes, cuando se considera la suposición de trasferencia proporcional de contaminantes en el modelo.

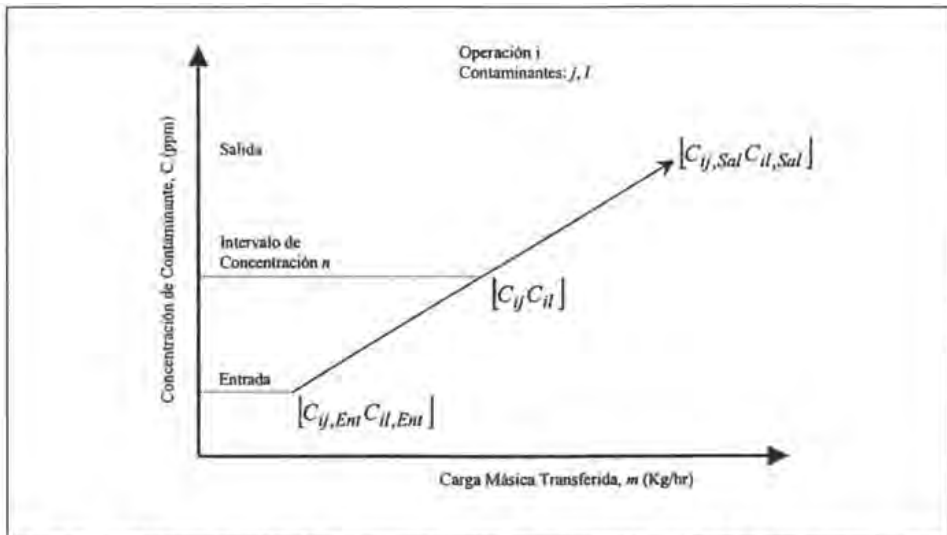


Figura 4.1 Determinación de la concentración de contaminante en un intervalo n para la transferencia de masa del proceso i de un contaminante j proporcional a la transferencia de otro contaminante l en el mismo proceso

En la figura 4.1 se representa el proceso i con las concentraciones de los contaminantes j y l a la entrada, la concentración de los contaminantes en el intervalo de concentración n y las concentraciones de salida de los contaminantes. Basado en la figura 4.1 se puede observar que la relación que existe para la transferencia de carga másica entre los contaminantes j y l esta dada por la siguiente relación:

$$\frac{C_{j} - C_{j,ENT}}{C_{l} - C_{l,ENT}} = \frac{C_{j,SAL} - C_{j,ENT}}{C_{l,SAL} - C_{l,ENT}} \quad (4.5)$$

Considerando que para el proceso I el suministro es de agua fresca y que los contaminantes j y l son A y B respectivamente, esto implica que $C_{IA,Ent}$ y $C_{IB,Ent}$ sean de 0 ppm, por lo tanto para conocer la concentración de salida del proceso I del contaminante B se usara la ecuación 3.8, la cual resulta ser de 50 ppm

Si se considera que la masa de contaminante B trasferido es proporcional al del contaminante A, entonces se pueden calcular las concentraciones del contaminante B correspondientes a la trasferencia del contaminante A, considerando las siguientes concentraciones de contaminantes:

$$\begin{aligned} C_{IA,Ent} &= 0 \text{ ppm} \\ C_{IB,Ent} &= 0 \text{ ppm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{IA} &= 80 \text{ ppm} \\ C_{IB} &=? \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{IA,Sal} &= 100 \text{ ppm} \\ C_{IB,Sal} &= 50 \text{ ppm} \end{aligned}$$

Sustituyendo en la ecuación 4.1,

$$\frac{80-0}{C_{1B}-0} = \frac{100-0}{50-0}$$

Entonces $C_{1B} = 40$ ppm

Para el proceso 2 se hace la misma suposición considerando las siguientes concentraciones:

$$C_{2A,Ent} = 80 \text{ ppm}$$

$$C_{2A} = 100 \text{ ppm}$$

$$C_{2A,Sal} = 240 \text{ ppm}$$

$$C_{2B,Ent} = 30 \text{ ppm}$$

$$C_{2B} = ?$$

$$C_{2B,Sal} = 90 \text{ ppm}$$

Sustituyendo en la ecuación 4.1,

$$\frac{100-80}{C_{2B}-30} = \frac{240-80}{90-30}$$

Entonces $C_{2B} = 37.5$ ppm

La figura 4.2 muestra a los dos procesos graficados *con respecto al contaminante A* con las concentraciones del contaminante B antes calculadas para las dos operaciones considerando que la transferencia de masa entre los dos contaminantes es proporcional.

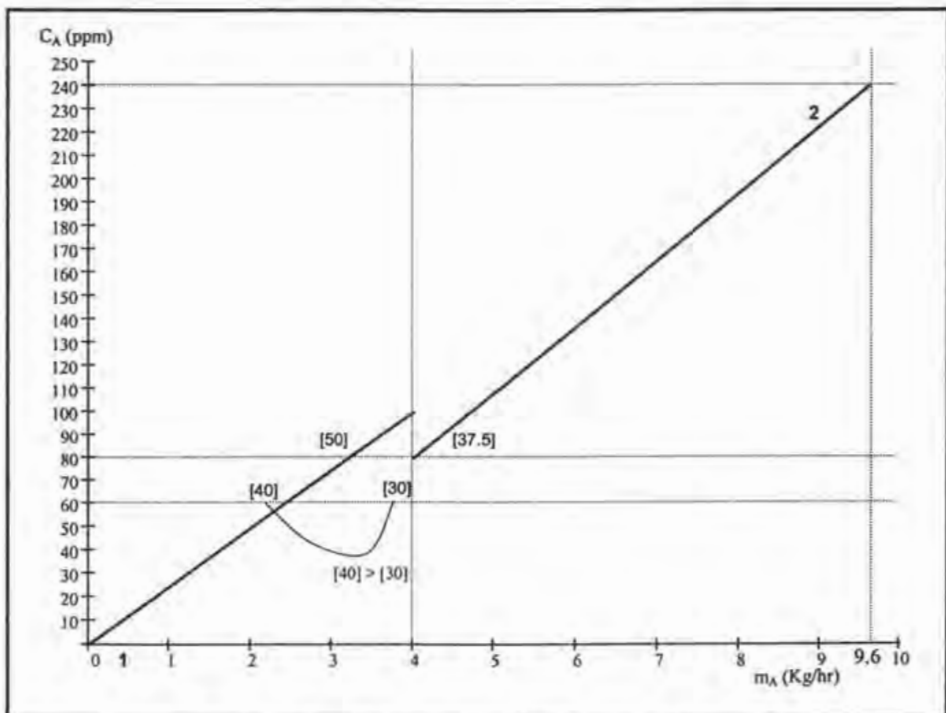


Figura 4.2 Perfiles de Agua Limitante para el ejemplo 1

Las concentraciones del contaminante B se muestran en corchetes donde se observa que alimentando agua fresca al proceso 1 y cuando el contaminante A alcanza una concentración $C_{1A} = 80$ ppm, con un flujo de 40 ton/hr entonces el contaminante B alcanza una concentración de $C_{1B} = 40$ ppm. Esta concentración de $C_{1B} = 40$ ppm es mayor a la requerida por el proceso 2 (de $C_{2B} = 30$ ppm) e impide el re-uso del proceso 1 en el proceso 2.

Cuando se obtuvo el flujo mínimo de agua fresca requerido por el sistema para el caso de un solo contaminante, se asumió que el agua que salía de una operación con un cierto nivel o carga de contaminante (en algún intervalo de concentración) podía ser reusable en otra operación siempre que el nivel de contaminante lo permitiera (en el siguiente intervalo). Al reusar la máxima cantidad de agua que sale de una operación, se minimiza el requerimiento total de agua fresca. Para extender este concepto a problemas que involucran mas de un contaminante se debe asegurar que el agua que sale de una operación es adecuada con respecto al otro contaminante para re-uso; para lograr lo anterior se debe realizar un cambio de concentración de contaminante en cada operación al graficar el perfil de agua limitante respecto a una operación de referencia, y a un contaminante de referencia, para asegurar que todos los contaminantes no limiten el re-uso de agua desde un intervalo de concentración a otro. A esta técnica se le llama cambio de concentración y fue desarrollada por Wang y Smith (1994).

Para poder re-usar agua del proceso 1 en el proceso 2, no se debe permitir que la concentración del contaminante B en el proceso 1 alcance un nivel alto. De la misma forma, cuando se presente simultáneamente la transferencia de los contaminantes A y B, no se debe permitir que la concentración del contaminante A alcance un valor alto antes de permitir el re-uso. De este modo se necesita encontrar un punto en el proceso 1 donde el contaminante B alcance una concentración tal que permita su re-uso en el proceso 2.

Basado en la explicación anterior, para el caso de estudio se requiere cambiar la concentración de entrada del contaminante A en el proceso 2 hasta un punto que corresponda a una concentración del contaminante B de 30 ppm en la operación 1. Esta modificación representa un *cambio de concentración de entrada* del proceso 2 relativo al proceso 1. El cambio de concentración del proceso 2 es hacia abajo de modo que inicie en un punto correspondiente a una concentración de $C_{1B} = 30$ ppm del proceso 1. Este cambio se calcula de la siguiente forma:

Proceso 1:

El cambio de concentración en el proceso 1 se calcula mediante la ecuación 4.1, considerando los siguientes datos:

$$\begin{array}{lll} C_{1A,Ent} = 0 \text{ ppm} & C_{1A} = ? & C_{1A,Sal} = 100 \text{ ppm} \\ C_{1B,Ent} = 0 \text{ ppm} & C_{1B} = 30 \text{ ppm} & C_{1B,Sal} = 50 \text{ ppm} \end{array}$$

Sustituyendo en la ecuación 4.1,

$$\frac{C_{1A} - 0}{30 - 0} = \frac{100 - 0}{50 - 0}$$

Por lo que la concentración C_{1A} es de 60 ppm para el proceso 1.

Proceso 2:

De la misma forma se ajustan las concentraciones en el proceso 2. Primero se ajusta la concentración de salida del contaminante A en el proceso 2, nuevamente usando la ecuación 3.8, considerando que $\Delta m_A = 5.6$, $f = 35$ y $C_{2A,Ent} = 60$ ppm, lo cual da por resultado que $C_{2A,Sal} = 220$ ppm.

Para ajustar los intervalos intermedios en el proceso 2 del contaminante B, nuevamente se emplea la ecuación 4.1. Para una concentración de entrada del contaminante A correspondiente 60 ppm, resulta lo siguiente:

$$\begin{array}{lll} C_{2A,Ent} = 60 \text{ ppm} & C_{2A} = 100 \text{ ppm} & C_{2A,Sal} = 220 \text{ ppm} \\ C_{2B,Ent} = 30 \text{ ppm} & C_{2B} = ? & C_{2B,Sal} = 90 \text{ ppm} \end{array}$$

Sustituyendo

$$\frac{100 - 60}{C_{2B} - 30} = \frac{220 - 60}{90 - 30}$$

Lo cual resulta una concentración de 45 ppm.

El cambio de concentración de entrada del proceso 2 relativo al proceso 1 se muestra en la figura 4.3, con las concentraciones del contaminante B mostradas en corchetes.

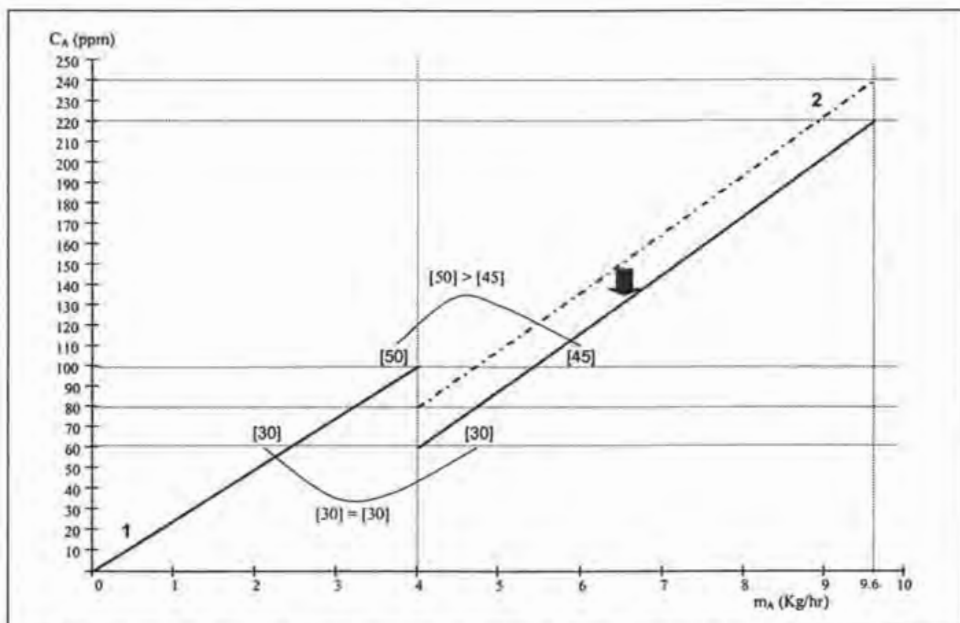


Figura 4.3 Perfiles de Agua Limitante después del cambio de concentración de entrada

Para que el agua del proceso 1 pueda ser re-usada al inicio del proceso 2 no se debe permitir que la concentración del contaminante A del proceso 1 exceda de $C_{1A} = 60$ ppm, debido a que a una concentración mayor aumentaría la concentración del contaminante B, excediendo la mínima de entrada del proceso 2. De este modo con el cambio de concentración en el proceso 2, ahora el agua del proceso 1 se puede re-usar al inicio del proceso 2.

Desafortunadamente en la medida que se avanza en la escala de concentraciones se encuentra otro problema, ya que el agua de salida del proceso 1, indicada en la figura 4.3, una vez que ha alcanzado $C_{1B} = 50$ ppm cuando $C_{1A,Sal} = 100$ ppm ahora no puede re-usarse en el proceso 2 a $C_A = 100$ ppm ya en este punto el proceso 2 requiere que $C_{2B} = 45$ ppm cuya concentración es menor a la de salida del proceso 1.

A primera vista parece que el proceso 2 requiere un cambio de concentración de entrada adicional a una concentración menor. Para que encontrar la concentración del proceso 2 correspondiente a $C_{2B} = 50$ ppm, se realiza el cambio de concentración hacia abajo (del proceso 2) y en este punto ahora se grafica $C_A = 100$ ppm. El cambio de concentración se calcula de la siguiente forma:

Proceso 2 (segundo cambio de concentración):

Ahora se inicia por el proceso 2, y se deben ajustar las concentraciones de entrada y de salida del contaminante A, considerando que la concentración de contaminante B correspondiente a $C_{2A} = 100$ ppm es de $C_{2B} = 50$ ppm. Los datos son los siguientes:

$$\begin{array}{lll} C_{2A,Ent} = ? & C_{2A} = 100 \text{ ppm} & C_{2A,Sal} = ? \\ C_{2B,Ent} = 30 \text{ ppm} & C_{2B} = 50 \text{ ppm} & C_{2B,Sal} = 90 \text{ ppm} \end{array}$$

Sustituyendo en la ecuación 4.1:

$$\frac{100 - C_{2A,Ent}}{50 - 30} = \frac{C_{2A,Sal} - C_{2A,Ent}}{90 - 30}$$

Resulta una ecuación con dos incógnitas y para poder resolverla se usa la ecuación 3.8. Resolviendo el sistema de dos ecuaciones se obtienen las concentraciones de entrada y salida del contaminante A, las cuales son: $C_{2A,Ent} = 46.7$ ppm y $C_{2A,Sal} = 206.7$ ppm.

Proceso 1 (segundo cambio de concentración):

Para el proceso 1 se requiere calcular la concentración del contaminante B correspondiente a $C_{1A} = 46.7$ ppm., considerando los siguientes datos:

$$\begin{array}{lll} C_{1A,Ent} = 0 \text{ ppm} & C_{1A} = 46.7 \text{ ppm} & C_{1A,Sal} = 100 \text{ ppm} \\ C_{1B,Ent} = 0 \text{ ppm} & C_{1B} = ? & C_{1B,Sal} = 50 \text{ ppm} \end{array}$$

Sustituyendo en la ecuación 4.1,

$$\frac{46.7 - 0}{C_{1B} - 0} = \frac{100 - 0}{50 - 0}$$

Por lo que la concentración C_{1B} es de 23.4 ppm,.

El segundo cambio de concentración se muestra en la figura 4.4, con las concentraciones del contaminante B mostradas en corchetes. Si se efectúa el segundo cambio de concentración, el inicio del proceso 2 (que requiere $C_{2B}=30$ ppm), será ahora diferente de la concentración de $C_{1B}=23$ ppm del proceso 1. Esto significa que la fuerza impulsora extra o diferencia de concentración estará disponible al inicio del proceso 2 y como se muestra en la figura 4.4.

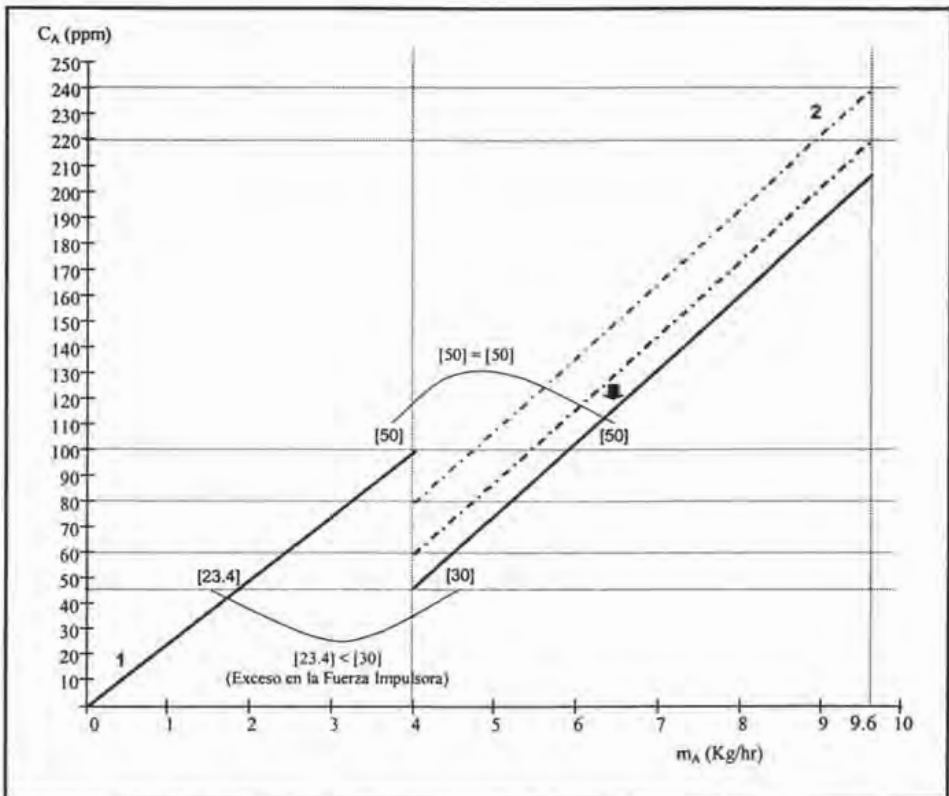


Figura 4.4 Perfiles de Agua Limitante después del segundo cambio de concentración de entrada

La disponibilidad de la fuerza impulsora excedente significaría que el potencial de re-uso máximo de agua aún no ha sido alcanzado, es decir, que el flujo de agua podría no estar minimizado.

Para tener re-uso máximo, uno de los contaminantes debe encontrarse, a lo largo de toda la curva, en su límite, por lo tanto, regresaremos al primer cambio de concentración de entrada mostrado en la figura 4.3 y entonces se efectuara en el proceso 2 un *cambio de concentración de salida* como se muestra en la figura 4.5. La concentración de salida del proceso 2 se cambia, de modo que el contaminante B sea limitante al final del proceso 1 así como al inicio del proceso 2, para mantener la factibilidad y poder reusar el agua de salida de la operación 1 en la operación 2. El agua que sale de la operación 1, a 100 ppm, es reusable en la operación 2 únicamente para el caso del contaminante A el cual tiene también una concentración de 100 ppm, pero para el caso del contaminante B no es posible reusarla debido a que a que su concentración de salida del proceso 1 (50 ppm) es mayor a la concentración del proceso 2 en este intervalo (45 ppm). Ahora se tiene que buscar un punto donde el agua que sale de la operación 1 se pueda re-usar en la operación 2 y que además la concentración de cualquiera de los contaminante A o B sean limitantes.

El contaminante A es limitante ya que su concentración real, en el intervalo de concentración en cuestión, se encuentra a su máxima concentración de salida (100 ppm). El contaminante B no es limitante ya que su concentración de la operación 2, en el intervalo en cuestión, no se encuentra en su valor máximo de la concentración de salida de la operación 1 (50 ppm).

Ahora se cambiara la concentración de salida de la operación 2 hasta que el contaminante B llegue a ser limitante, esto es, se determinara la concentración de contaminante a la cual el cambio de concentración de salida de la operación 2 haga al contaminante B limitante en la salida de la operación 1.

La figura 4.5 muestra el perfil de agua limitante de la operación 1 y 2 y una concentración de referencia de contaminante a la salida de la operación 2, $C_{2,Sal}^*$, que ayudara en la determinación de la concentración de salida en el cuarto intervalo de concentración suponiendo que el contaminante B es limitante, esto es, $C_{1B,Sal} = C_{2B} = 50$ ppm.

Aplicando la ecuación 4.1, al contaminante B en la operación 2, en el cuarto intervalo de concentración, apoyándose en la figura 4.5, resulta:

$$\frac{C_{2n}^* - C_{2,Ent}^*}{C_{2B} - C_{2B,Ent}} = \frac{C_{2,Sal}^* - C_{2,Ent}^*}{C_{2B,Sal} - C_{2B,Ent}} \quad (4.2)$$

Donde $C_{2,Ent}^*$ y $C_{2,Sal}^*$ representan las concentraciones del proceso 2 indicadas en la figura 4.5 (60 ppm para la entrada), $C_{2B,Ent}$, $C_{2B,Sal}$ representan las concentraciones reales de entrada y salida indicadas en los datos de la tabla 4.1 (30 y 90 ppm respectivamente), C_{2B} representa la concentración del contaminante B en el cuarto intervalo de concentración (50

ppm) y C_{2n}^* representa el concentración del cuarto intervalo de concentración (100 ppm). Sustituyendo los siguientes valores conocidos:

$$\frac{100 - 60}{50 - 30} = \frac{C_{2,Sal}^* - 60}{90 - 30}$$

Resulta $C_{2,Sal}^* = 180$ ppm

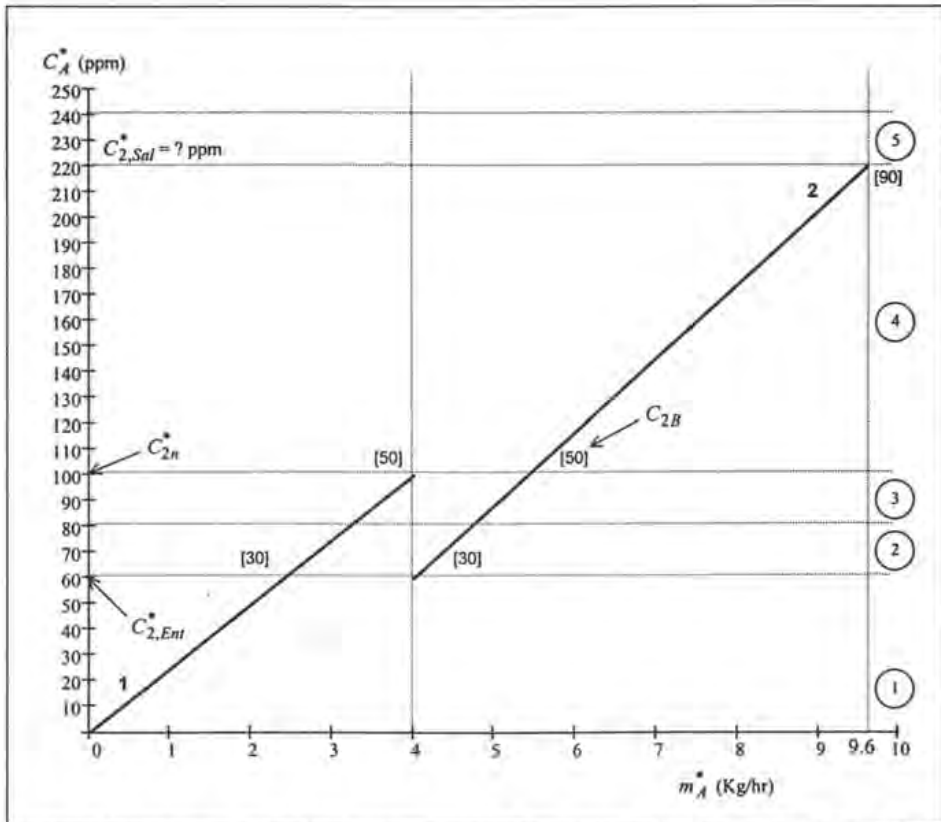


Figura 4.5 Determinación de la concentración de referencia de contaminante a la salida de la operación 2

Por lo tanto, se debe cambiar la salida de la operación 2 a una concentración de referencia de 180 ppm del contaminante A en el eje y cuando el contaminante B llega a ser limitante. Como la concentración real del contaminante B a la salida de la operación 2 es de 90 ppm, el cambio de concentración de salida de 180 ppm representa una concentración relativa. Por esta razón, se identifica la escala de concentración de salida en el eje y de la figura 4.5 con un asterisco, indicando que la concentración de contaminante B* (ppm) esta en una

escala relativa. Este implica que cuando el contaminante B llega a ser limitante, debe cambiarse la salida de la operación 2 a una concentración de 180 ppm en el eje y. Específicamente, la concentración de contaminante B en la operación 2 va desde 90 ppm hasta 30 ppm y la concentración relativa del contaminante A* va de 180 ppm a 60 ppm. Por lo tanto, se debe ajustar la carga másica considerando las concentraciones resultantes del cambio de concentración. El ajuste correspondiente debido al cambio de concentración a 180 ppm es de 4.2 Kg/hr.

De esta forma, *el cambio de concentración de salida* significa que la carga másica del proceso 2 se presenta a una menor concentración. Debido al cambio de concentración, también se presenta un cambio en la carga másica relativa, la cual se indica en la figura 4.6.

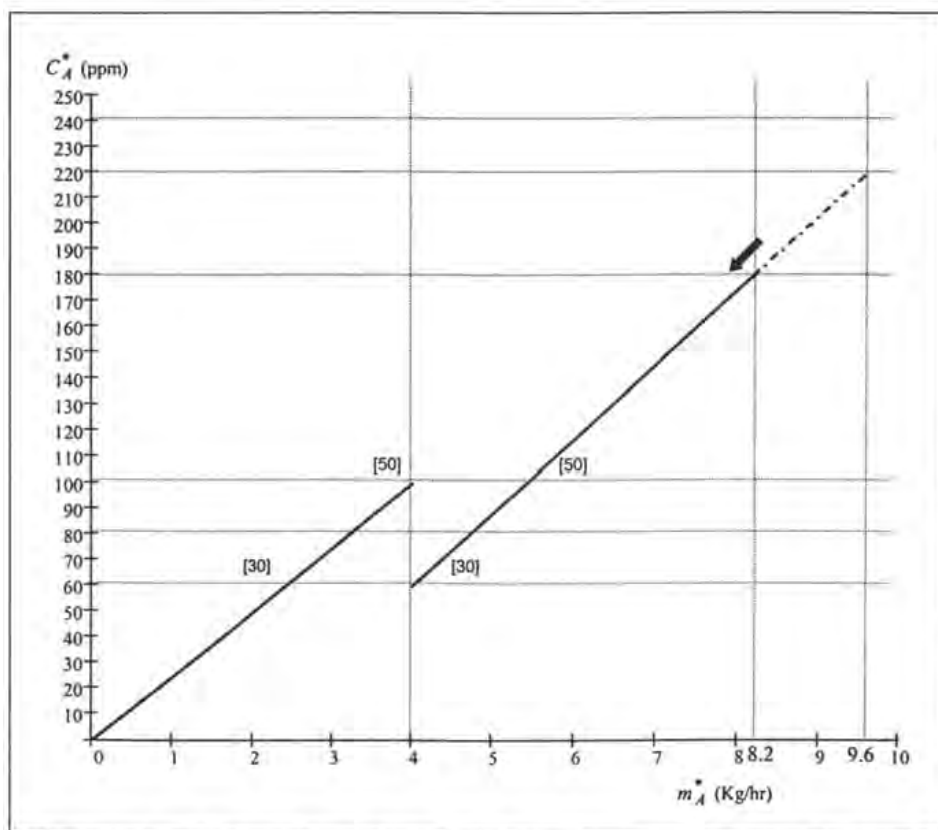


Figura 4.6 Perfil de Agua Limitante después del cambio de concentración de entrada y el cambio de concentración de salida

La figura 4.6 muestra que para el proceso 2 tanto el eje de concentración como de carga másica ahora están en una escala relativa, sin embargo para el proceso 1 los ejes aun están

en una escala absoluta. Tanto los ejes de concentración como el de carga másica ahora resultan ser ejes de referencia C_A^* y m_A^* .

En caso que se quieran obtener las concentraciones y la carga másica reales debido al cambio de masa de proceso (del proceso 2) a partir de los datos de la figura 4.5 se debe realizar una transformación matemática correspondiente al sentido inverso del cambio de concentración de salida, esto es usando la ecuación 4.2. Se debe aclarar que a pesar del cambio que sufrió el perfil del proceso 2, mostrado en la figura 4.6, aparentemente esta siendo transferida una menor masa en el proceso 2, aunque este no es el caso. La misma carga másica ha sido ajustada para que se presente en un rango de concentración menor en el eje de referencia. Conceptualmente, en la figura 4.6 se esta representando la transferencia de masa del contaminante A pero con un cambio de concentraciones de forma que se refleje correctamente la transferencia del contaminante B. La transferencia del contaminante B se representa, a través del contaminante A, vía simples transformaciones matemáticas.

Antes del cambio de concentración de salida la carga másica de B abajo de $C_A^*=100$ ppm fue de 2.525 kg/hr; después del cambio de concentración de salida la carga de B fue 2.7 kg/hr. El cambio provocó que se presentara una carga másica mayor de contaminante B abajo de $C_A^*=100$ ppm la cual resulta en un flujo de agua mayor para satisfacer los requerimientos del sistema.

A partir de la figura 4.6 se puede construir la curva compuesta del sistema para encontrar el punto pinch o también se puede usar el diagrama de intervalo de concentraciones, como se muestra en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Diagrama de Intervalo de Concentraciones basado en las escalas de concentración obtenidas de los cambios de concentración referenciado al contaminante A

Concentración A* (ppm)	Proceso 1 40 ton/hr	Proceso 2 35 ton/hr	Carga Másica (Kg/hr)	Carga Másica Acumulada (Kg/hr)	Flujo Ton/hr
0	↓		2.4	0.0	0
60			3.0	2.4	40
100	↓	↓	2.8	5.4	54
180			8.2	45.56	

La figura 4.7 muestra la curva compuesta limitante (multi-componente) del sistema usando la figura 4.6, u obtenida de la tabla 4.4, junto con la línea de suministro de agua correspondiente al flujo mínimo, el cual resulta ser de 54 ton/hr, diferente al obtenido individualmente para los contaminantes A y B (47 y 47.7 ton/hr).

Cuando se quiere obtener el flujo objetivo en problemas con múltiples contaminantes, el flujo mínimo de agua del sistema se calcula fácilmente si se referencia el problema respecto al contaminante limitante en el pinch, que para el caso de estudio es el contaminante B. Para problemas mas complejos que el aqui presentado se requiere una aproximación mas sofisticada, pero que sigue los principios básicos establecidos aqui ya que siguen siendo validos.

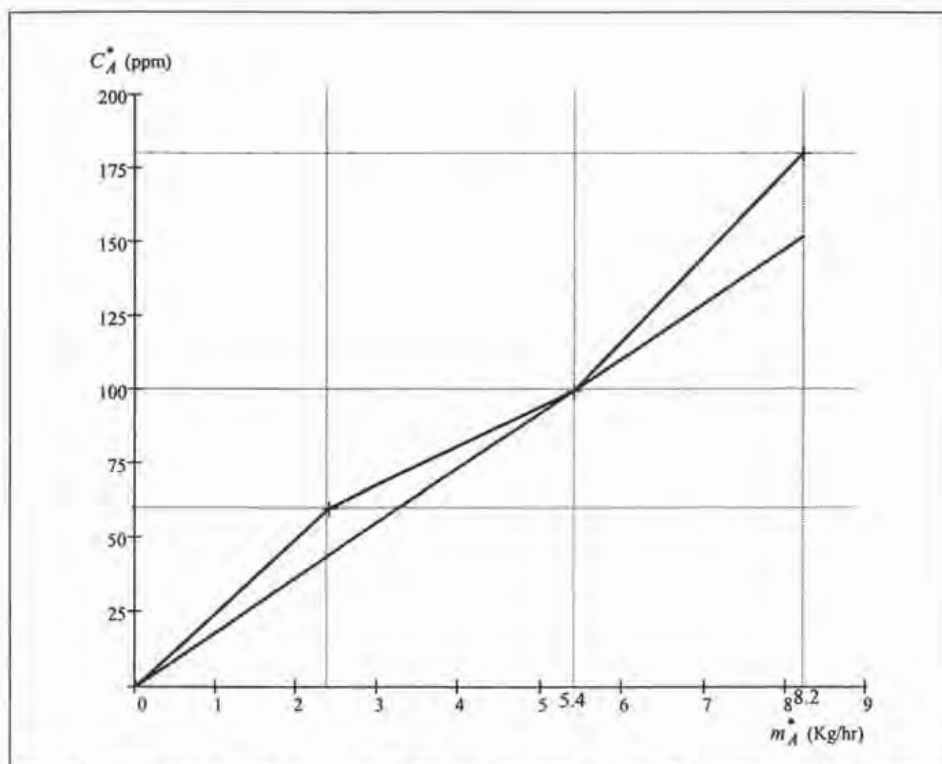


Figura 4.7 Curva Compuesta Limitante para el ejemplo 1 considerando al contaminante A de referencia

Habiendo establecido el flujo mínimo objetivo para este problema con multi-contaminantes la siguiente pregunta es ¿se puede lograr este flujo en el diseño?, de hecho si se puede diseñar para problemas multicomponentes usando los dos métodos de diseño presentados en el capítulo 3. El diseño para manejar el flujo mínimo objetivo empleando el método del numero mínimo de fuentes de agua se muestra como diagrama de mallas en la figura 4.8 y el diseño final en forma de diagrama de mallas se muestra en la figura 4.9. Las concentraciones de los componentes A y B se muestran en corchetes en varios puntos de la red. El diseño en forma de diagrama de flujo convencional se muestra en la figura 4.10.

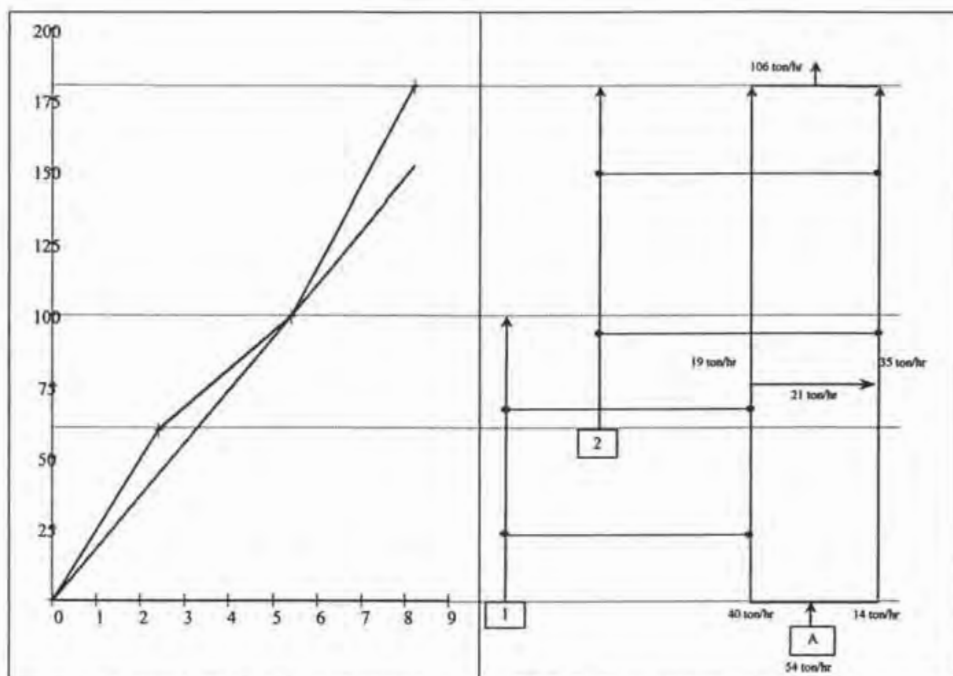


Figura 4.8 Diseño inicial para alcanzar el flujo objetivo para el ejemplo 1

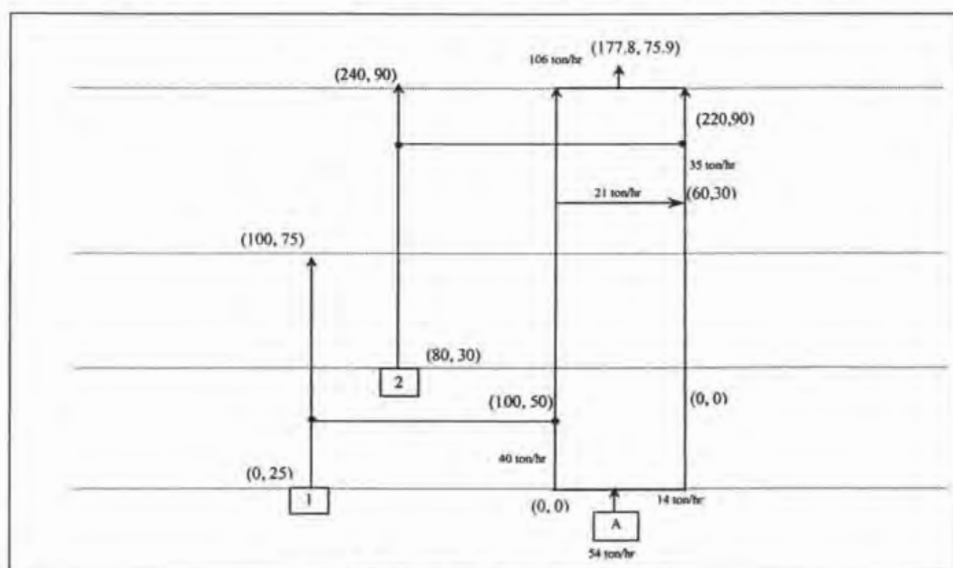


Figura 4.9 Diseño final para el ejemplo 1

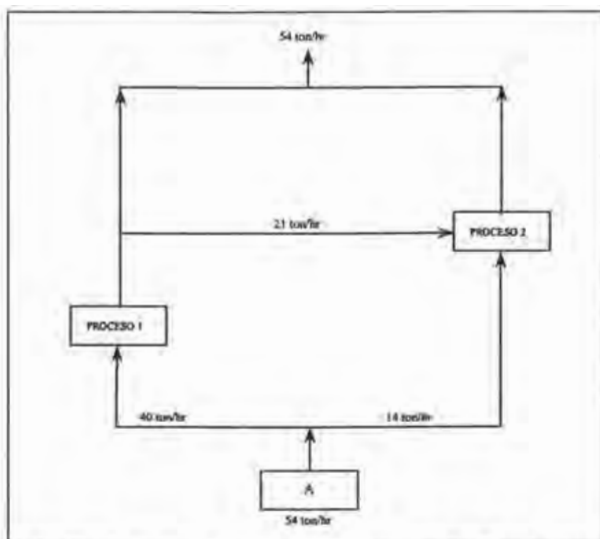


Figura 4.10 Diseño final mostrada como un diagrama de flujo convencional para el ejemplo 1

EJEMPLO 2

Considérese ahora un segundo ejemplo con un sistema multi-contaminante para ilustrar otro caso. Los datos de proceso limitantes para este ejemplo se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2 Datos Limitantes para el ejemplo 2

Proceso	Contaminante	Carga Másica de Contaminante (Kg/hr)	C_{Ent} (ppm)	C_{Sal} (ppm)	Flujo de Agua (ton/hr)
1	A	8	0	100	80
	B	4	20	70	
2	A	7.2	80	200	60
	B	5.4	30	120	

Estos datos limitantes se presentan en forma grafica en la figura 4.11 en términos del contaminante A. También se muestran en corchetes las concentraciones del contaminante B que corresponden con los de la transferencia de A.

Al igual que en el ejemplo 1, si se considera que el suministro al proceso 1 es de agua fresca, esto es que $C_{IA,Ent}$ y $C_{IB,Ent}$ es de 0 ppm, entonces se ajusta la concentración de salida del proceso 1 para el contaminante B usando la ecuación 3.8 lo cual resulta en una concentración de salida de la operación 1, para el contaminante B, de 50 ppm.

Si también se considera la suposición que la masa de contaminante B transferido es proporcional a la del contaminante A, entonces se calculan las concentraciones del contaminante B que corresponden a la transferencia del contaminante A, mediante la ecuación 4.1. Para el proceso 1 resulta que para una concentración $C_{IA} = 80$ ppm le

corresponde una concentración $C_{1B} = 40$ ppm, mientras que para el proceso 2 a una concentración de $C_{2A} = 100$ ppm le corresponde una concentración $C_{2B} = 45$ ppm.

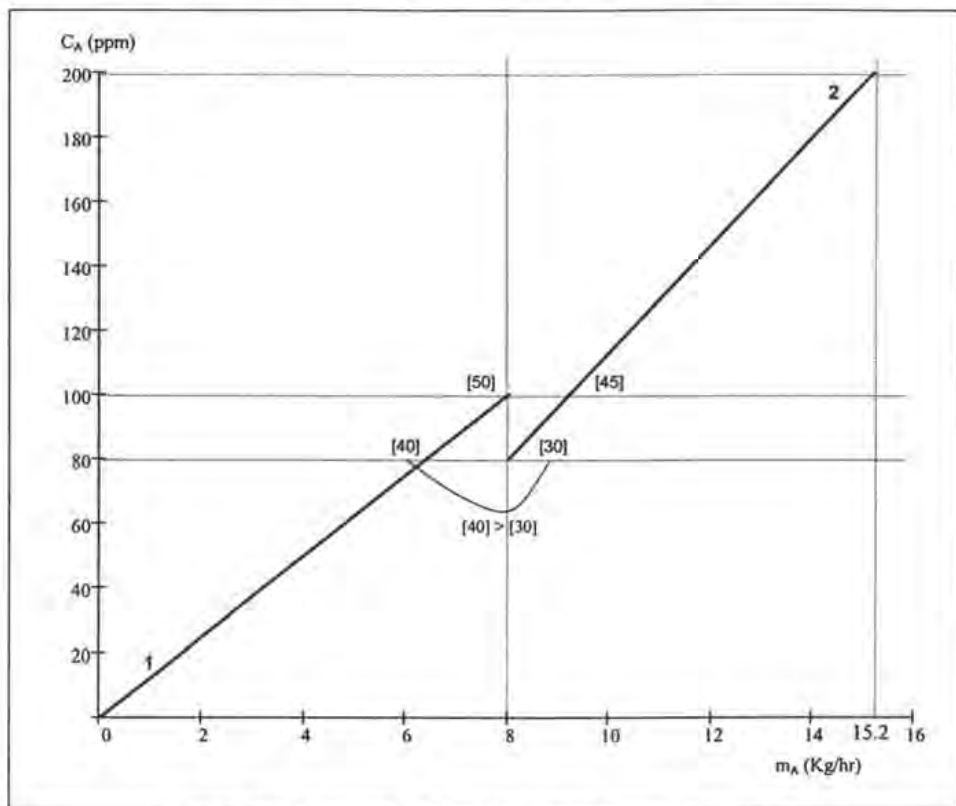


Figura 4.11 Perfiles de Agua Limitante para el ejemplo 2

Siguiendo la curva del proceso 1, cuando el agua ha alcanzado $C_{1A}=80$ ppm entonces $C_{1B}=40$ ppm lo cual impide su re-uso en el proceso 2 ya que el proceso 2, en este punto requiere $C_{2B}=30$ ppm. Al igual que en el ejemplo 1 se puede superar este problema mediante un cambio de concentración de entrada como se muestra en la figura 4.12. El cambio de concentración en el proceso 1 se calcula nuevamente mediante la ecuación 4.1, considerando $C_{1B} = 30$ ppm con lo cual se obtiene una concentración del contaminante A de $C_{1A} = 60$ ppm. De la misma forma se ajustan las concentraciones en el proceso 2. Primero se ajusta la concentración de salida del contaminante A en el proceso 2, usando nuevamente la ecuación 3.8, considerando que $\Delta m_A = 7.2$, $f = 60$ y $C_{2A,Ent} = 60$ ppm, resultando que $C_{2A,Sol} = 180$ ppm. Para ajustar los intervalos intermedios del contaminante B en el proceso 2, nuevamente se emplea la ecuación 4.1. Para una concentración de contaminante A correspondiente a $C_{2A} = 100$ ppm, resulta una concentración $C_{2B} = 60$ ppm y ahora el agua del proceso 1 puede re-usarse en el inicio del proceso 2.

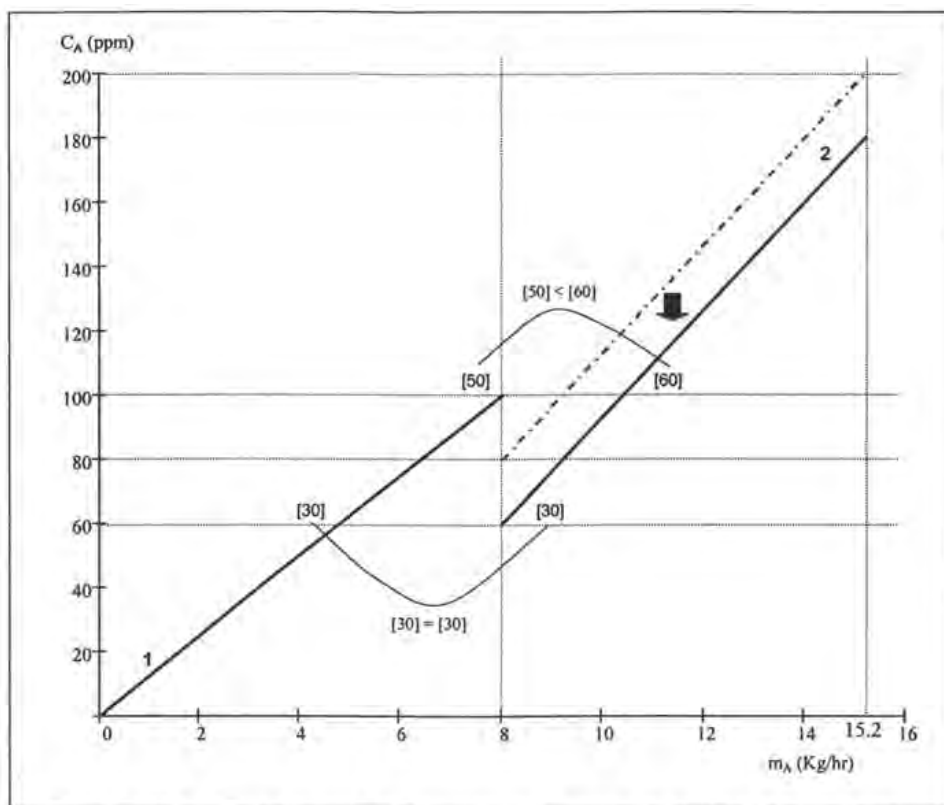


Figura 4.12 Perfiles de Agua Limitante para el ejemplo 2 después del cambio de concentración de entrada

Siguiendo la escala de concentración se observa que el agua del proceso 1 se puede re-usar en el proceso 2 a $C_A = 100$ ppm. En este punto $C_{1A} = 100$ ppm, $C_{2A} = 100$ ppm, $C_{1B} = 50$ ppm y $C_{2B} = 60$ ppm. Aunque no hay problema en re-usar el agua en este punto, ninguno de los contaminantes A y B son limitantes. Uno de los dos componentes siempre debe ser limitante si se desea alcanzar el flujo mínimo de agua, por lo tanto se debe realizar un cambio de concentración de salida similar al del ejemplo 1 pero ahora *la carga másica se cambiara a una concentración mayor* en vez de una concentración menor.

Si se aplica la ecuación 4.1 al contaminante B, en la operación 2, en el cuarto intervalo de concentración para determinar la concentración de referencia de contaminante a la salida de la operación 2, $C_{2,Sal}^*$, suponiendo que el contaminante B es limitante, esto es, $C_{1B,Sal} = C_{2B} = 50$ ppm (en el cuarto intervalo de concentración) y considerando además que $C_{2,Ent}^* = 60$ ppm, $C_{2B,Ent} = 30$ ppm, $C_{2B,Sal} = 120$ ppm y $C_{2n}^* = 100$ ppm, resulta que $C_{2,Sal}^* = 240$ ppm. El ajuste correspondiente a la carga másica debido al cambio de concentración a 240 ppm (considerando que $f = 60$ y $C_{2A,Ent} = 60$ ppm), es de 10.8 Kg/hr. Este cambio se muestra en la figura 4.13.

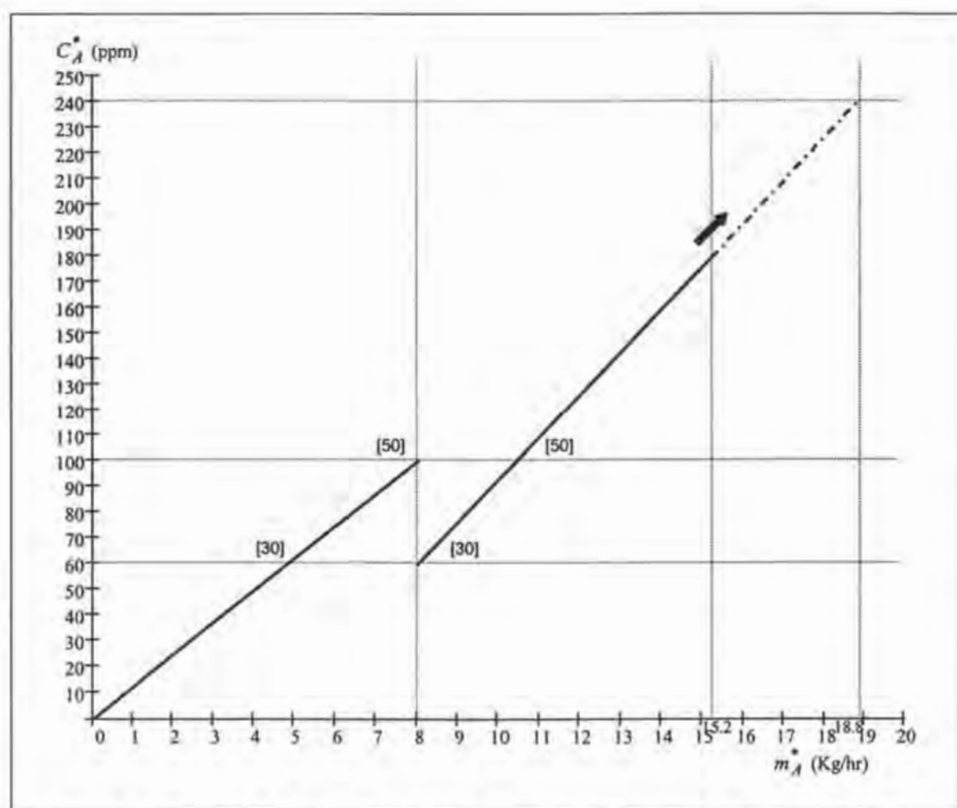


Figura 4.13 Perfiles de Agua Limitantes después del cambio de concentración de entrada y el de salida

En la figura 4.13 se observa que la concentración ha sido cambiada hasta que el contaminante B resultó limitante y el agua del proceso 1 puede re-usarse en el proceso 2. Nuevamente, esto significa que el eje de masa llega a ser un eje de referencia. Aunque parezca que la carga másica de la curva del proceso 2 es mayor, este no es el caso ya que la misma carga másica ha sido extendida para abarcar un rango mayor de concentración en el eje de referencia. Como en el ejemplo 1, el eje de referencia es una medida absoluta para la corriente que no ha cambiado (proceso 1) y un eje relativo para las corrientes que si han cambiado (proceso 2).

Antes del cambio de concentración de salida, la carga másica de B abajo de $C_A^*=100$ ppm fue de 5.8 kg/hr. Después del cambio de concentración de salida el contaminante B transferido fue de 5.2 kg/hr. Este cambio provocó que una carga másica menor se presente abajo de $C_A^*=100$ ppm. Finalmente esto resulta en un requerimiento de agua menor para satisfacer el problema.

También, a partir de la figura 4.13 se puede construir la curva compuesta del sistema o se puede usar el diagrama de intervalo de concentraciones, como se muestra en la tabla 4.5.

Tabla 4.5 Diagrama de Intervalo de Concentraciones considerando las escalas obtenidas de los cambios de concentración referenciado al contaminante A para el ejemplo 2

Concentración A* (ppm)	Proceso 1 80 ton/hr	Proceso 2 60 ton/hr	Carga Másica (Kg/hr)	Carga Másica Acumulada (Kg/hr)	Flujo Ton/hr
0	↓			0.0	0
			4.8		
60		↓		4.8	80
			5.6		
100				10.4	104
			8.4		
240				18.8	78.33

La figura 4.14 muestra la curva compuesta limitante (multicomponente). El flujo mínimo objetivo de agua es de 104 ton/hr. La figura 4.15 muestra un diseño inicial para manejar este flujo objetivo. La figura 4.16 muestra el diseño final como diagrama de mallas y la figura 4.17 como diagrama de flujo convencional.

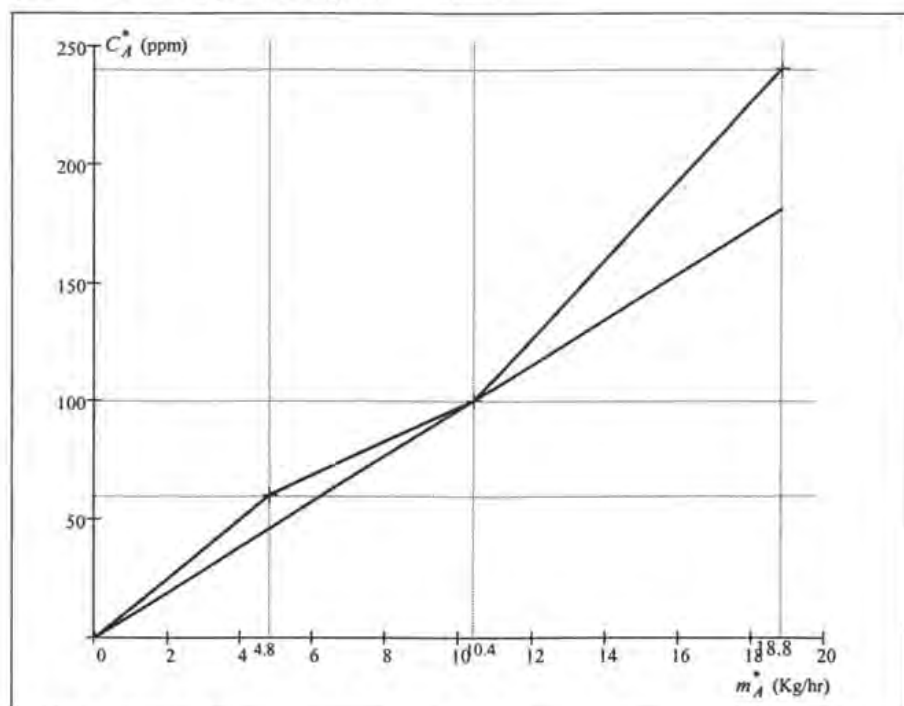


Figura 4.14 Curva Compuesta Limitante para el ejemplo 2 usando el contaminante A de referencia

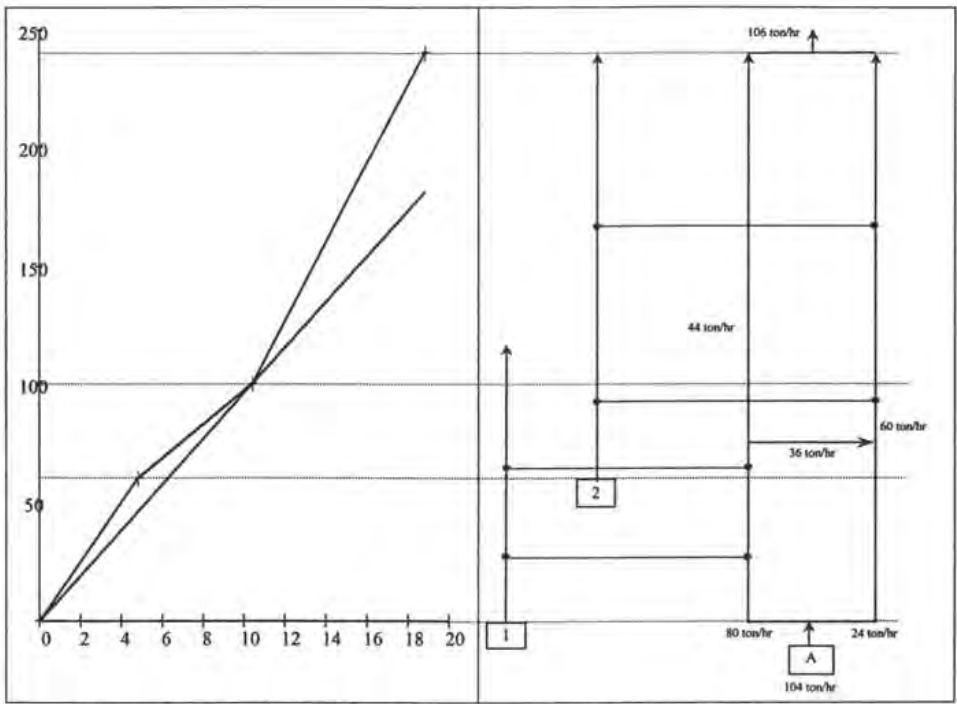


Figura 4.15 Diseño inicial para alcanzar el flujo objetivo para el ejemplo 2

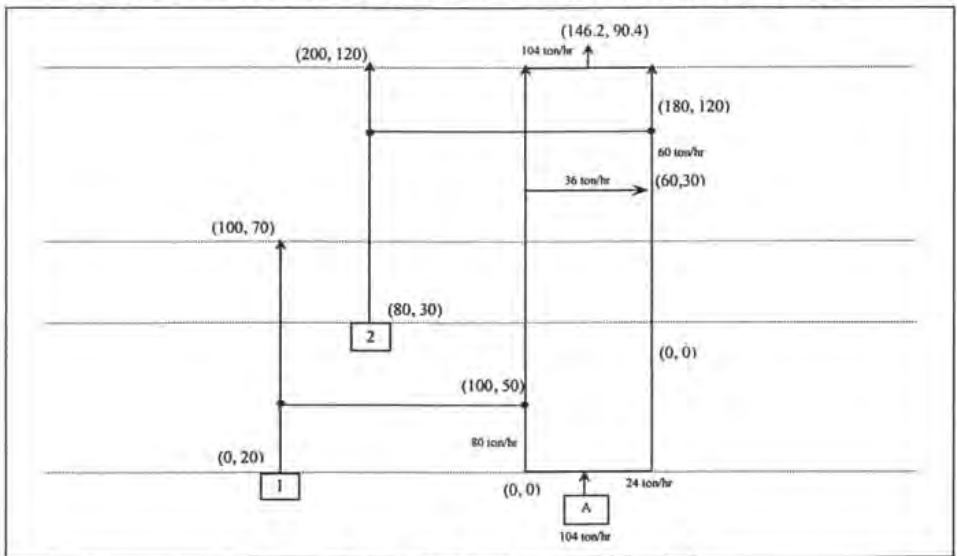


Figura 4.16 Diseño final para el ejemplo 2

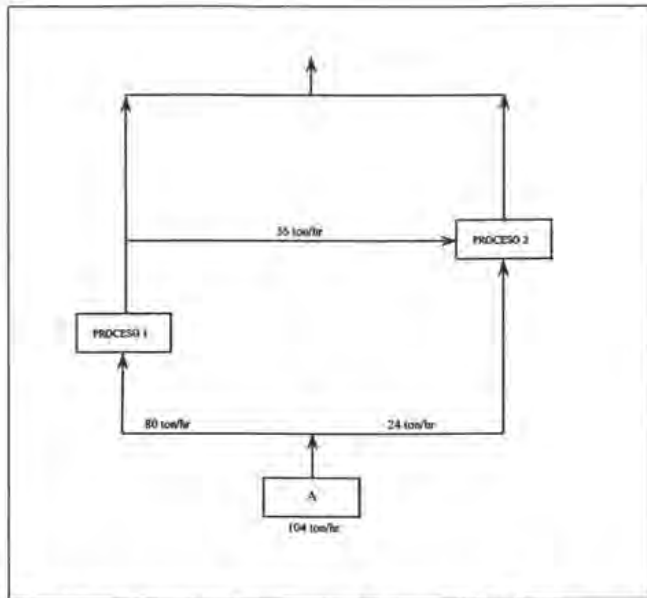


Figura 4.17 Diseño final mostrada como un diagrama de flujo convencional para el ejemplo 2

4.1.1 Elección del Contaminante de Referencia

En los ejemplos anteriores de múltiples contaminantes se ha establecido que el contaminante A sea el de referencia. Sin embargo, si la aproximación general presentada es válida, entonces se debe obtener el mismo resultado eligiendo a cualquier contaminante presente en el sistema como el de referencia. Para comprobar que la elección del contaminante de referencia no afecta el resultado final, se demostrara regresando al ejemplo 2 donde se usara el contaminante B como el de referencia y se calculara el flujo objetivo.

En la figura 4.18 se muestra los datos limitantes del sistema de la tabla 4.1 pero ahora graficados en términos del contaminante B.

Si el agua fresca se suministra libre de contaminante A, con $C_A=0$ ppm, y contaminada por el B a $C_B=20$ ppm entonces podría pensarse que el cambio de concentración de entrada podría ser innecesario, sin embargo este no es el caso y se requiere un cambio de concentración de entrada.

Al inicio del proceso 1 la concentración del contaminante B es de $C_{1B}=20$ ppm pero se requiere que $C_{1A}=0$ ppm. El cambio de concentración de entrada se muestra en al figura 4.19.

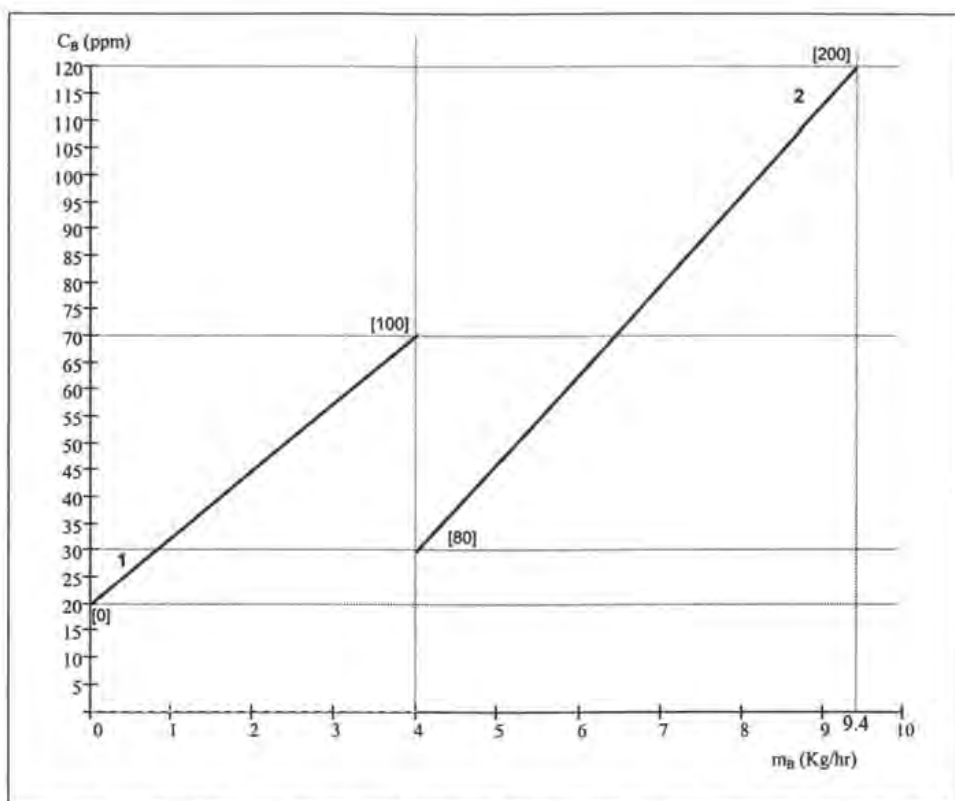


Figura 4.18 Perfiles de Agua Limitante para el ejemplo 2 considerando al contaminante B de referencia

El cambio de concentración en el proceso 1 se calcula mediante la ecuación ecuación 3.8, considerando que $\Delta m_B = 4$, $f = 80$ y $C_{1B,Ent} = 0$ ppm, lo cual da por resultado que $C_{1B,Sal} = 50$ ppm. Para ajustar los intervalos intermedios del contaminante A en los procesos 1 y 2, nuevamente se emplea la ecuación 4.1. En el proceso 1 para una concentración de contaminante B correspondiente a $C_{1B} = 30$ ppm (la de entrada del proceso 2), resulta una concentración $C_{1A} = 60$ ppm. En el proceso 2 para una concentración de contaminante B correspondiente a $C_{2B} = 50$ ppm (la de salida del proceso 1), resulta una concentración $C_{2A} = 106.7$ ppm

Considerando los perfiles de la figura 4.19 se observa que no es necesario efectuar cambios de concentración adicionales ya que las concentraciones del contaminante A del proceso 1 correspondientes a los intervalos de 30 ppm y 50 ppm son menores a las del proceso 2, por lo cual es posible construir la curva compuesta limitante a partir de la figura 4.19 ó mediante el diagrama de intervalo de concentraciones como el que se muestra en la tabla 4.6.

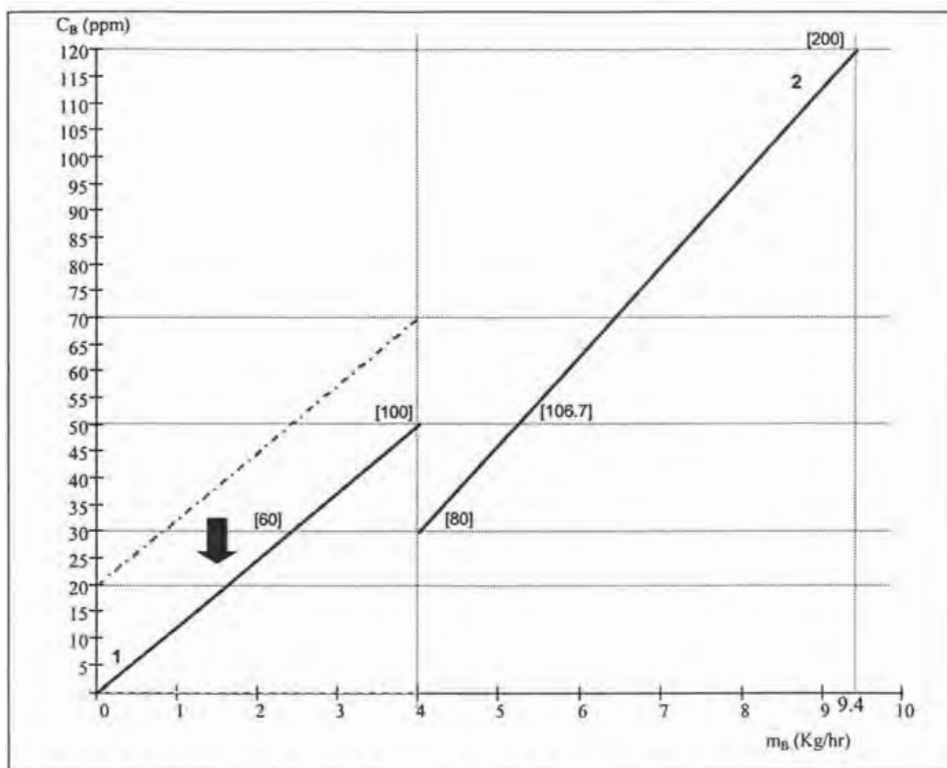


Figura 4.19 Perfiles de Agua Limitante para el ejemplo 2 después del cambio de concentración de entrada considerando al contaminante B de referencia

Tabla 4.6 Diagrama de Intervalo de Concentraciones basado en las escalas obtenidas de los cambios de concentración referenciado al contaminante B para el ejemplo 2

Concentración A* (ppm)	Proceso 1 80 ton/hr	Proceso 2 60 ton/hr	Carga Másica (Kg/hr)	Carga Másica Acumulada (Kg/hr)	Flujo Ton/hr
0	↓			0.0	0
30			2.4	2.4	80
50			2.8	5.2	104
120		↓	4.2	9.4	78.33

La curva compuesta limitante se muestra en la figura 4.20 con su correspondiente línea de suministro de agua. Aquí se obtiene un flujo de agua objetivo de 104 ton/hr, la misma que se obtuvo usando de referencia el contaminante A de la figura 4.14 y la tabla 4.5.

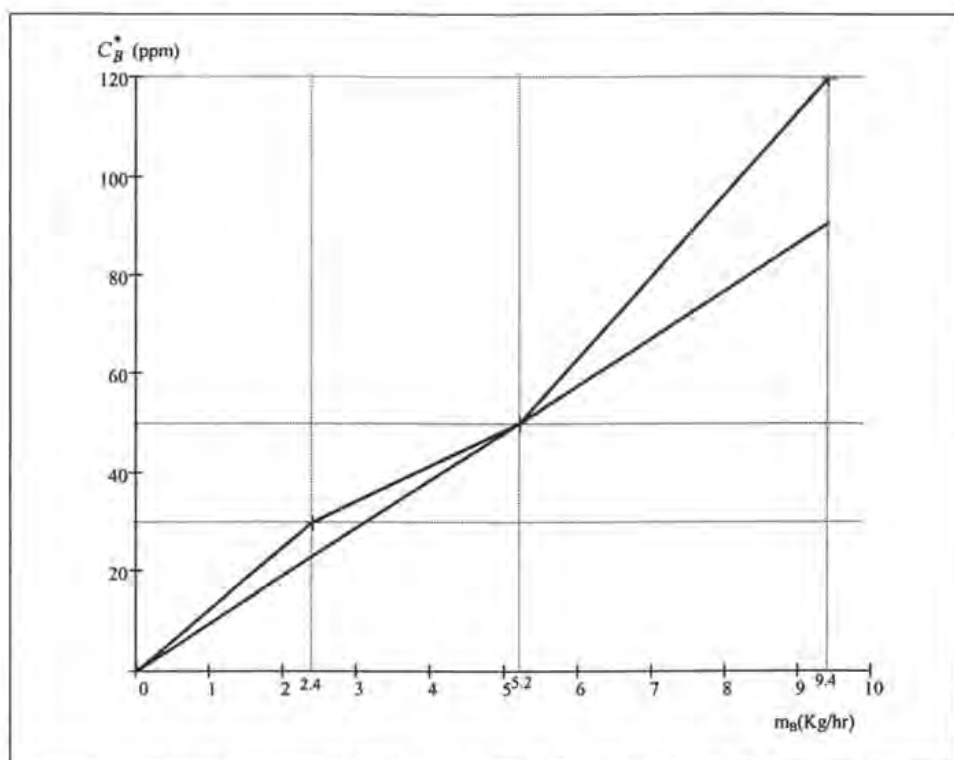


Figura 4.18 Curva Compuesta Limitante para el ejemplo 2 usando el contaminante B de referencia

Para problemas con múltiples contaminantes, si se cambia el contaminante de referencia se obtendrá el mismo flujo mínimo de agua objetivo siempre y cuando se efectúen los cambios de concentración de entrada y salida apropiados. En general si se conoce con anticipación al contaminante limitante, se puede escoger a éste como el de referencia ya que de este modo se simplifican los cálculos, aunque no siempre resulta sencillo decidir al contaminante de referencia antes de comenzar el diseño. Además en problemas con sistemas complejos el componente limitante puede estar cambiando un cierto número de veces.

Los dos ejemplos de múltiples contaminantes anteriores (ejemplo 1 y 2) ilustran diferentes características del problema general. En problemas reales más complejos estas características se presentan simultáneamente y puede presentarse además una interrelación compleja en las restricciones.

Es posible desarrollar una solución para los problemas con múltiples contaminantes usando programación matemática, sin embargo en el presente trabajo de tesis se extendió el método de un solo contaminante para manejar múltiples contaminantes y en vez de usar programación matemática se mantuvo el diseño conceptual en la medida de lo posible para obtener la solución. Los métodos aquí presentados le permiten al diseñador, donde sea posible, identificar diferentes estructuras para el mismo problema. Se identificaron aquellas características de diseño que son esenciales para alcanzar el flujo objetivo y aquellas que son opcionales. También el método permite identificar puntos donde se pueden hacer cambios al proceso para mejorar el flujo objetivo y también la parte del problema donde se necesita tener un cuidado particular para usar datos exactos.

4.2 Re-uso con Restricciones de Flujo

Aunque los casos reales con un solo contaminante y con restricciones de flujo raramente ocurren en la práctica, la aproximación basada en un solo contaminante puede ser aplicada frecuentemente a contaminantes múltiples, ya que en este caso se pueden tratar con propiedades combinadas de componentes pseudo-simples, tales como carga de sólidos suspendidos, carga de sólidos disueltos totales, demanda química de oxígeno, etc. y entonces pueden analizarse como un solo contaminante. Si embargo, varios casos exigen una aproximación para contaminantes múltiples.

Se puede considerar que para problemas de contaminantes múltiples a cada contaminante se le puede buscar el flujo objetivo usando el método descrito en el punto 3.5 para la minimización de agua con restricción de flujo, y escoger el peor caso y este puede ser el flujo mínimo de agua. El flujo objetivo de agua, entonces, puede ser el peor caso. La aproximación para obtener el flujo de agua objetivo para múltiples contaminantes, en principio es la misma que la descrita en el punto 3.5 para un solo contaminante, pero se deben considerar los cambios de concentración descritos en este capítulo.

Aunque la aproximación del flujo objetivo de contaminantes múltiples manejado como un problema de un solo contaminante, no dará necesariamente el valor objetivo correcto, mucho se puede aprender de los problemas prácticos siguiendo tal aproximación. El valor objetivo final real entonces puede obtenerse usando un análisis de múltiples contaminantes establecido en este capítulo.

CAPITULO V MINIMIZACIÓN DE AGUA CON REGENERACIÓN

Hasta ahora se ha asumido que el agua es re-usada en las operaciones sin tratamiento, sin embargo el consumo de agua en el sistema puede ser reducido aún mas si se permite un tratamiento intermedio (regeneración). Se puede usar la regeneración para remover contaminantes del proceso o procesos mediante tratamientos como sedimentación por gravedad, filtración y ósmosis. La elección y colocación de los regeneradores son de crucial importancia para reducir el consumo de agua.

Existen dos conceptos que se le dan al agua residual tratada para permitir su re-uso, reciclaje o tratamiento. Si se le da tratamiento al agua para permitir su re-uso o reciclaje, al proceso se le denomina "regeneración". En cambio si se le da tratamiento al agua para poder descargarla al medio ambiente se le denomina "tratamiento". La diferencia entre regeneración y tratamiento es el destino del agua, esto es, si el agua se trata para ser re-usada o reciclada entonces el proceso se denomina *regeneración*; pero si el agua se trata para ser descargada al ambiente entonces el proceso se denomina *tratamiento*. Los procesos para el tratamiento o regeneración en realidad son los mismos, la diferencia es el destino del agua. El proceso de regeneración permite el uso del agua en otras operaciones ó puede ser recirculada o reciclada para volver a usarse en todas las operaciones (ver capítulo 2, figuras 2.5 y 2.6). La regeneración reduce el consumo de agua fresca y la generación de agua residual.

Tanto Takama (1980) como El-Halwagi & Manousiouthakis (1990) consideraron el problema de regeneración. El-Halwagi & Manousiouthakis (1990) consideraron redes de intercambio de masa con corrientes pobres reciclables, mezcladas con un agente de regeneración. Usando estos conceptos Wang y Smith (1994) introdujeron una construcción para encontrar el flujo mínimo usando la regeneración de agua residual mediante un método conceptual para diseñar redes de agua introduciendo la regeneración. Este método fue el primero en distinguir entre el re-uso con regeneración y la regeneración con reciclaje y en el presente trabajo de tesis se usará el método conceptual de Wang y Smith (1994) para el diseño de redes de agua.

El principal incentivo al momento de decidir la reducción en el consumo de agua es reducir el costo de inversión para el tratamiento de efluentes. Sin embargo, es inevitable que los costos de tratamiento de agua fresca y de agua residual aumenten y lleguen a ser mas significativos en el futuro, en la medida que el problema de sobre-extracción llegue a ser mas grave y por consiguiente las regulaciones ambientales lleguen a ser mas estrictas.

El agua residual puede regenerarse mediante un tratamiento parcial o total para remover los contaminantes que de otra forma podrían impedir su re-uso. Se pueden emplear varios tipos de procesos para regenerar agua residual, por ejemplo, sedimentación por gravedad, filtración, membranas, carbón activado, tratamiento biológico, etc. usándolos de manera individual o en combinación. La tabla 5.1 muestra un listado de los procesos de regeneración mas comunes y sus aplicaciones a diversos tipos de contaminantes. En

algunos casos los procesos de regeneración deben emplearse en combinación, por ejemplo la filtración es esencial antes de una membrana para prevenir su ensuciamiento.

Tabla 5.1 Procesos de Regeneración de Agua (Tecnologías de Tratamiento)

Tecnología	Contaminante Inorgánico	Contaminante Orgánico	Contaminante Disuelto	Contaminante Suspendido	Contaminante Biológico
Bio-Oxidación y Bio-tratamiento (anaeróbico, aeróbico, nitrificación, etc)	✓	✓	✓	✓	✓
Tratamiento con Carbón (Sorción y Adsorción)	✓	✓	✓		
Separación Centrifuga				✓	
Oxidación Química (Ozono, Aire Húmedo, Peróxido, Supercrítica, etc.)	✓	✓	✓		✓
Cristalización	✓	✓	✓		
Electrodialisis	✓		✓		
Evaporación (mecánica, estanques, destilación)	✓	✓	✓		
Filtración (Cama Granular, Tambor al Vacío, Tambor a Presión, etc.)	✓	✓		✓	✓
Separación por Gravedad ó Sedimentación (Coagulación, Floculación, Clarificación)	✓	✓		✓	✓
Intercambio Iónico	✓	✓	✓		
Membranas de Separación (Osmosis Inversa, Ultrafiltración)	✓	✓	✓	✓	✓
Extracción de Solvente	✓	✓	✓		
Agotación (Vapor, Aire, etc)	✓	✓	✓		

Se emplean dos criterios generales para especificar el rendimiento de los procesos de regeneración:

- 1) Una concentración de salida mínima, C_0 , es decir

$$C_{SAL} \leq C_0 \quad (5.1)$$

- 2) Una relación de remoción R , es decir:

$$R = \frac{f_{ENT} C_{ENT} - f_{SAL} C_{SAL}}{f_{ENT} C_{ENT}} \quad (5.2)$$

Estos criterios también pueden aplicarse en problemas de contaminantes múltiples pero relacionado a contaminantes individuales. Si se usan dos o mas procesos de regeneración juntos entonces se puede asumir que las ecuaciones (5.1) y (5.2) describen el rendimiento total.

5.1 Re-uso con Regeneración para Contaminantes Simples

Considérese primero la situación de regeneración para un solo contaminante donde se permite el re-uso sin reciclaje. La figura 5.1 muestra una curva compuesta limitante con una línea de suministro de agua trazada para obtener el pinch. La línea de suministro de agua muestra además al proceso con regeneración donde se toma la concentración de agua, a partir del inicio de la regeneración, como C_{REGEN} arriba de la curva compuesta. Al entrar al proceso de regeneración se reduce el nivel de contaminante hasta una concentración C_0 , especificada por la ecuación (5.1) y se complementa la transferencia de masa con agua regenerada. En este sistema se asume que el flujo de agua antes y después de la regeneración es el mismo, por lo tanto la línea de suministro de agua antes y después de la regeneración tiene la misma pendiente.

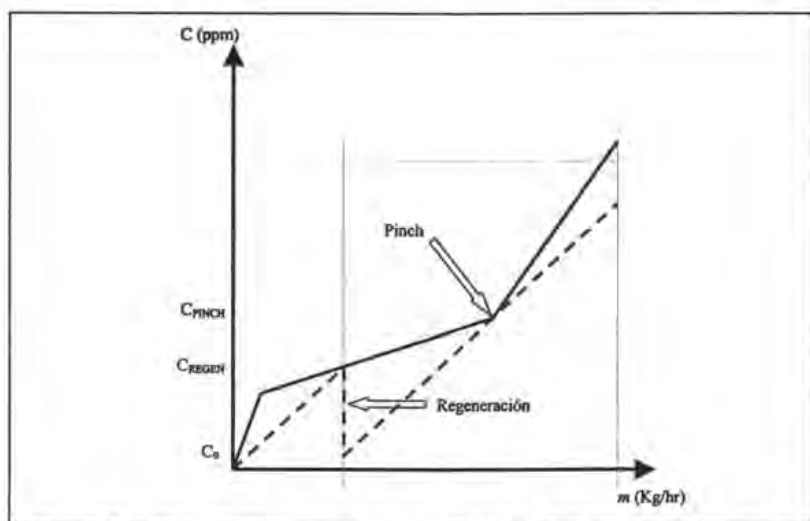


Figura 5.1 La regeneración de agua reduce el flujo de agua fresca y de agua residual

El caso mostrado en la figura 5.1 para un sistema que presenta un proceso de regeneración lleva a una reducción de flujo. Para determinar si el flujo es minimizado se debe trazar una línea de suministro de agua compuesta antes y después de la regeneración y verificar si se une con la curva compuesta limitante de proceso en el punto pinch, como se muestra en la figura 5.2. La línea compuesta de suministro de agua de la figura 5.2 toca a la curva compuesta en el pinch, lo cual parece indicar que el flujo de agua con regeneración es minimizado. El cambio de pendientes a lo largo de la línea de agua indica que el flujo de agua suministrada al inicio, aumenta en el intervalo de C_0 y C_{REGEN} , y después vuelve a disminuir. Sin embargo la línea punteada trazada en la figura 5.2 muestra lo que podría suceder si se permitiera que el agua alcance una concentración mayor antes de entrar al proceso de regeneración. Se observa un espacio entre la línea punteada y la curva compuesta, lo cual indica que el flujo de agua, de hecho no ha sido minimizado.

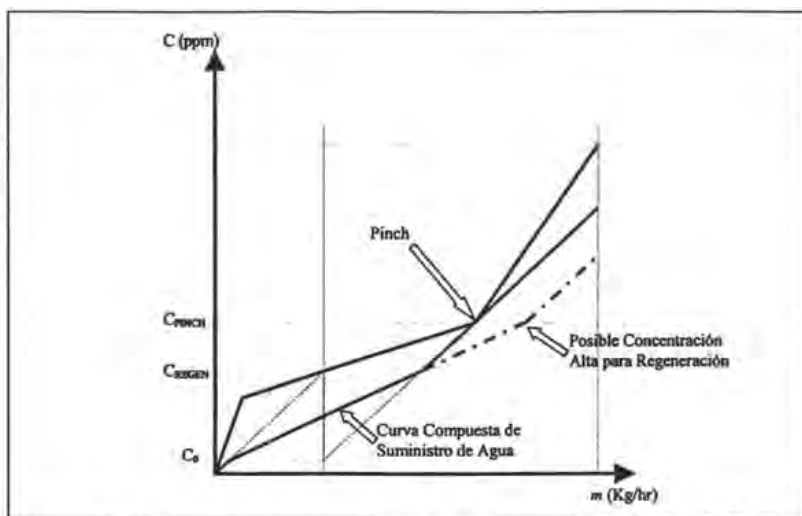


Figura 5.2 La curva compuesta de agua de suministro indica que el flujo no ha sido minimizado

La figura 5.3 muestra la misma curva compuesta de las figuras 5.1 y 5.2, pero permitiendo que el agua alcance la concentración pinch, C_{PINCH} , antes de entrar al proceso de regeneración. Nuevamente la salida del proceso de regeneración esta especificada por la ecuación (5.1) y el flujo antes y después de la regeneración no cambia.

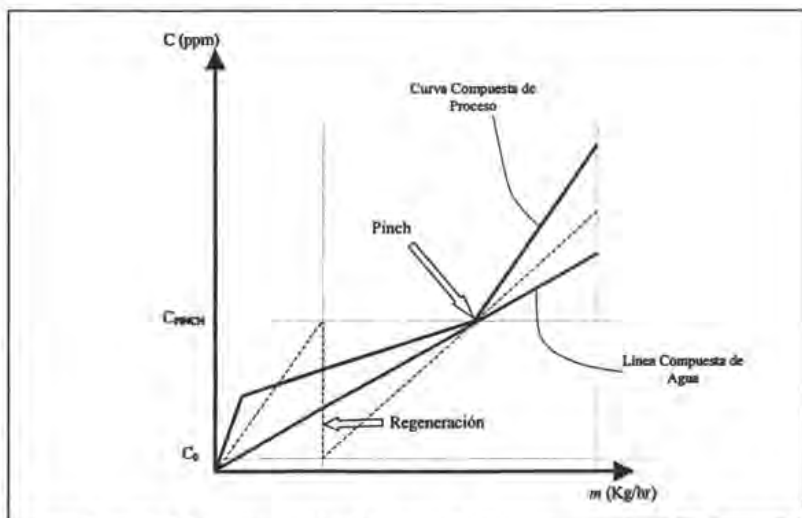


Figura 5.3 Regeneración de Agua a la Concentración Pinch

A primera vista el análisis hecho en la figura 5.3 no parece posible ya que la línea de suministro de agua cruza la curva compuesta limitante al alcanzar la concentración pinch

durante la regeneración, sin embargo se puede determinar la factibilidad del sistema construyendo una curva compuesta para la línea de suministro de agua antes y después de la regeneración, lo cual se muestra en la figura 5.4. El arreglo con regeneración alcanzando la concentración pinch se muestra en la figura 5.4 con el flujo de agua minimizado.

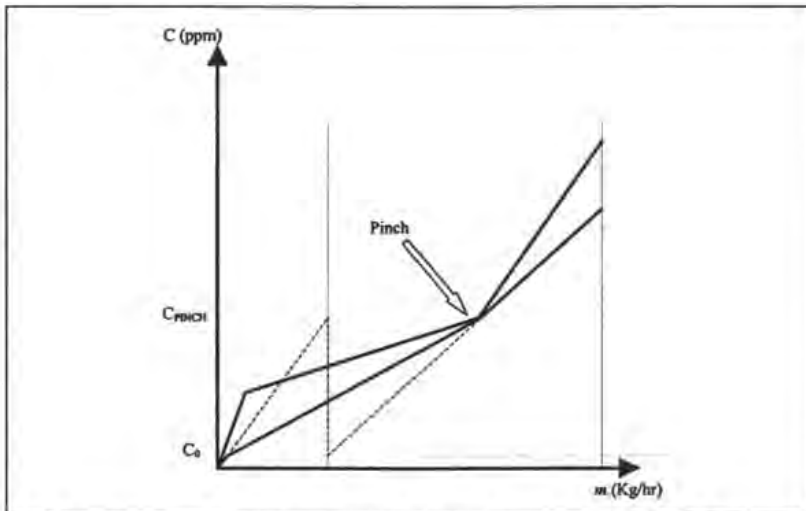


Figura 5.4 Curva compuesta de suministro de agua antes y después de la regeneración indica que el flujo de agua ha sido minimizada

Finalmente la figura 5.5 muestra el agua alcanzando una concentración mayor a la C_{PINCH} antes de entrar al proceso de regeneración.

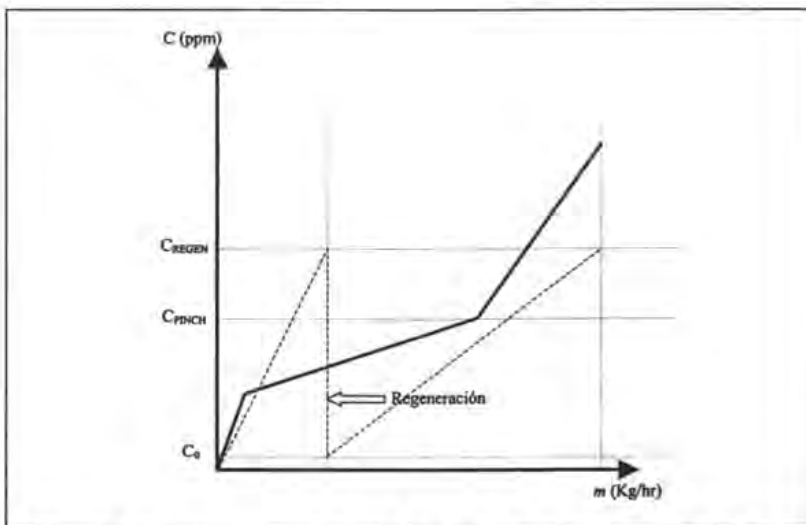


Figura 5.5 Regeneración de agua arriba de la concentración pinch

La figura 5.6 muestra un re-arreglo de la línea de suministro de agua antes y después de la regeneración para poder realizar la construcción de la línea compuesta de suministro de agua mostrada en la figura 5.7.

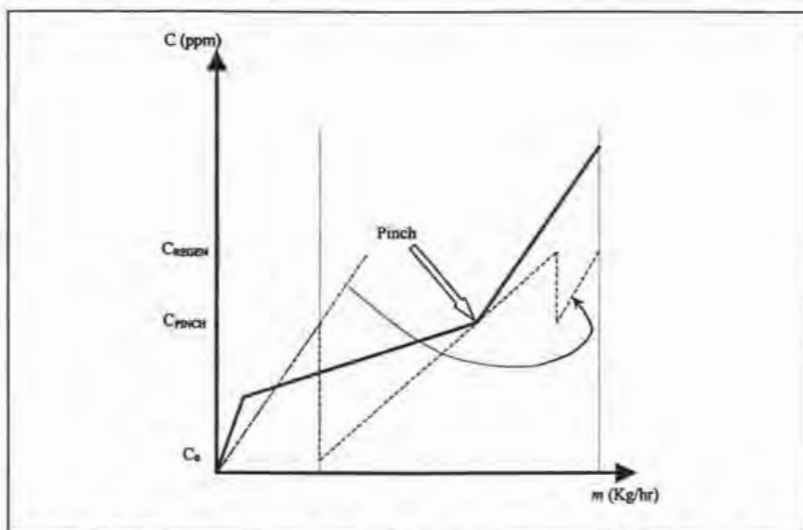


Figura 5.6 Construcción de la Curva Compuesta de Suministro de Agua

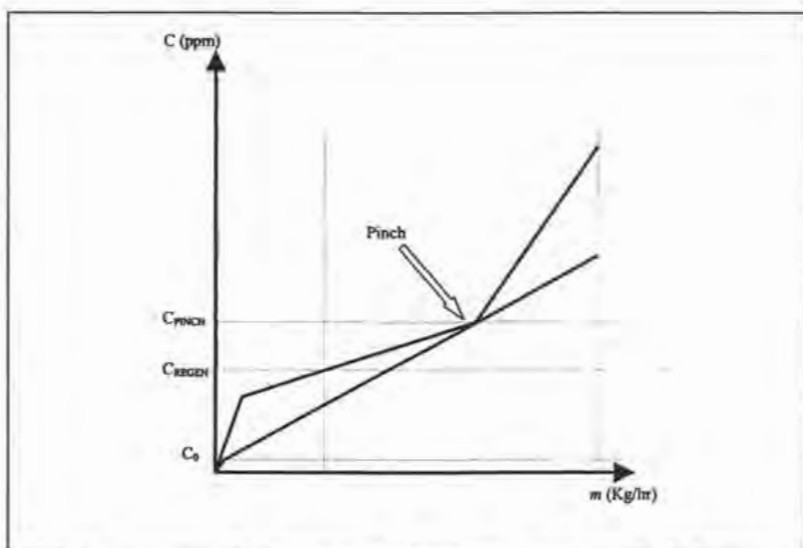


Figura 5.7 Línea compuesta de suministro de agua antes y después de la regeneración de la figura 5.6 que indica que el flujo de agua aun esta minimizado

Al comparar las figuras 5.3 y 5.6 se observa que el flujo de agua es el mismo, lo cual demuestra que el flujo no puede ser reducido más. Si la regeneración se hiciera con una concentración mayor a la del pinch tal y como se hizo en la figura 5.6. Para una carga másica conocida menor a la del pinch, C_{PINCH} y C_0 , existe un flujo mínimo que no puede reducirse más por lo que las figuras 5.5 y 5.6 muestran una regeneración innecesaria donde se requiere una reducción de la concentración mayor que en la figura 5.8 sin ningún beneficio para la reducción de flujo. La única diferencia entre las figuras 5.4 y 5.7 es la pendiente de la línea compuesta de suministro de agua arriba del pinch.

Si se permite que la línea de suministro de agua alcance la concentración pinch antes de la regeneración se obtienen dos criterios aplicables simultáneamente para la regeneración con re-uso (sin reciclaje):

- a) Un flujo mínimo de agua
- b) Una reducción de la concentración mínima en el proceso de regeneración compatible con el flujo mínimo de agua.

Se debe notar que en las figuras 5.1 a 5.7 la pendiente de la línea de suministro de agua es la misma antes y después del proceso de regeneración, lo cual implica que el flujo de agua no cambia durante el proceso de regeneración. En algunos procesos donde se presente la regeneración esta podría ser una buena aproximación, aunque para otros no lo sería. Sin embargo si se presentara un cambio significativo en el flujo de agua de regeneración, la construcción se puede modificar fácilmente para tomar en cuenta el cambio relacionando las pendientes antes y después del proceso de regeneración de acuerdo a las características del flujo.

Una vez que se ha determinado que el agua debe regenerarse hasta la concentración pinch todavía hay una pregunta que debe hacerse: ¿se puede alcanzar el flujo objetivo usando la construcción de la figura 5.4 considerando únicamente el re-uso sin reciclaje?. La figura 5.8 muestra la carga másica total del sistema dividido en dos partes. Una parte puede satisfacerse solamente con agua antes de la regeneración, el resto puede satisfacerse con el agua después de la regeneración. Esta descomposición en el balance de masa significa que no es necesario el reciclaje en el diseño.

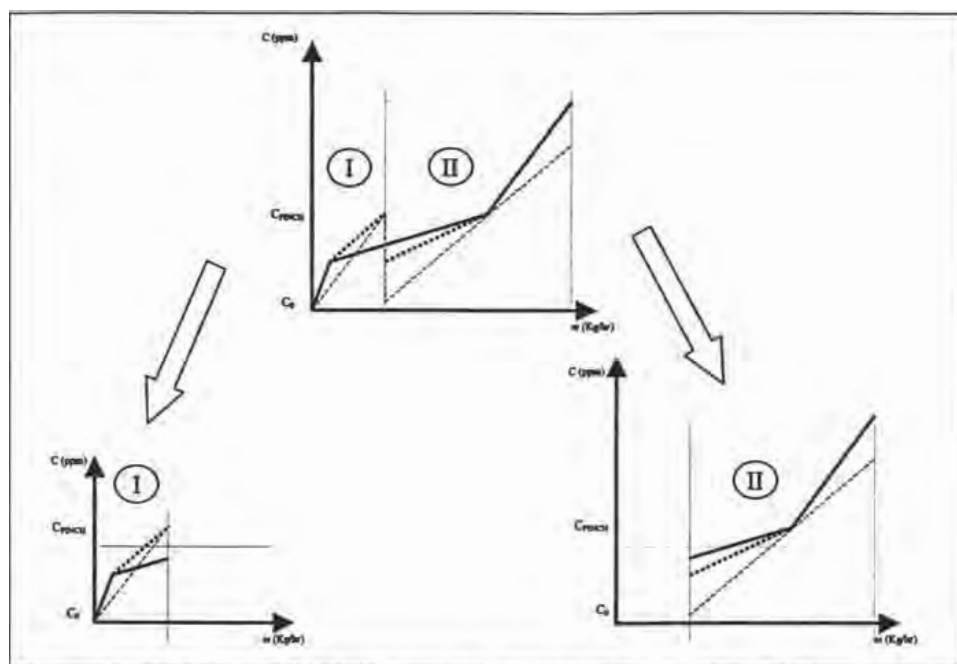


Figura 5.8 La ubicación de la regeneración abajo del pinch permite descomponer el problema en dos partes para regeneración reuso. Una parte del proceso puede satisfacerse solo con agua antes de la regeneración; el resto del proceso puede satisfacerse con agua después de la regeneración

Para aplicar esta técnica, se considerara el ejemplo 5.1 cuyos datos se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Datos de Proceso para el ejemplo 5.1

Número Proceso u operación	Carga Másica de Contaminante Δm (Kg/hr)	C_{Ent} (ppm)	C_{Sal} (ppm)	Flujo de Agua (Ton/hr)
1	2	0	100	20
2	5	50	100	100
3	30	50	800	40
4	4	400	800	10

Se considera que se tiene una regeneración con re-uso con un proceso de tratamiento capaz de alcanzar una concentración a la salida de 5 ppm. Asimismo se asume que no existe un cambio en el flujo debido a la regeneración. Si se regenera a la concentración pinch como se muestra en las figuras 5.9 y 5.10 el flujo de agua suministrado se calcula mediante un simple balance:

$$f_{SA} = \frac{m_{PINCH} - f_{SA} C_{PINCH}}{C_{PINCH} - C_0} \quad (5.3)$$

donde $m_{pinch} = 9 \text{ Kg/hr}$, $C_{pinch} = 100 \text{ ppm}$ y $C_0 = 5 \text{ ppm}$.

Entonces el flujo mínimo de agua con regeneración es de 46.2 ton/hr. Para el flujo de 46.2 se obtiene una carga másica de 4.62 Kg/hr y una concentración de salida de 792.6 ppm.

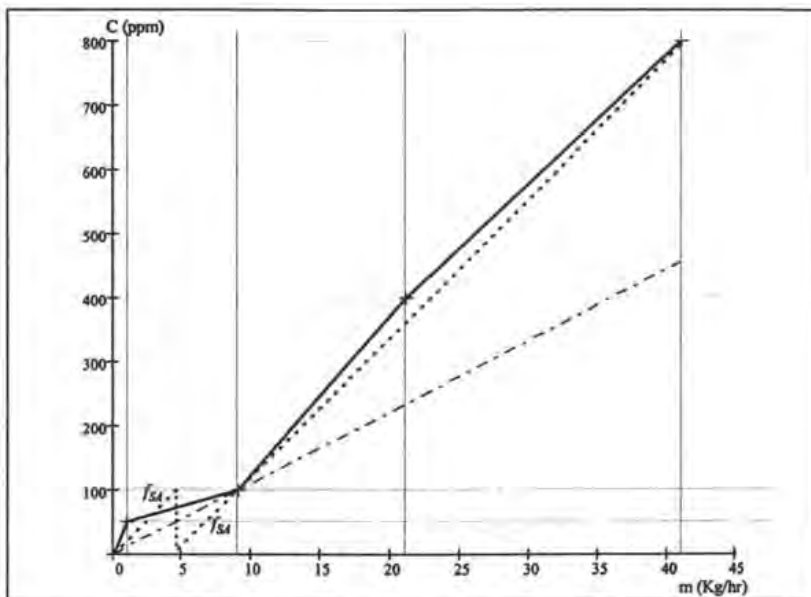


Figura 5.9 Regeneración hasta el pinch para el ejemplo 5.1

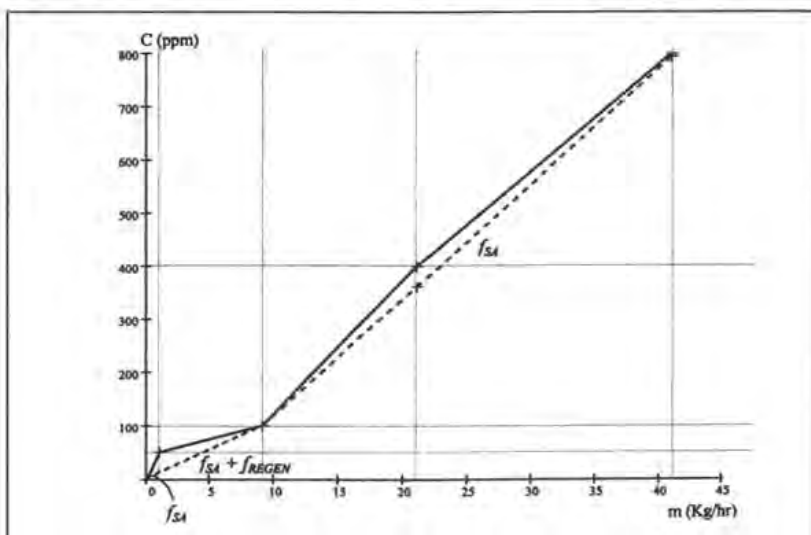


Figura 5.10 La Curva de Agua Compuesta muestra el flujo mínimo

Para el diseño de la red con regeneración se aplica el mismo procedimiento usado para el re-uso sin regeneración estudiado en el capítulo 3. Se pueden aplicar el método de intervalos de carga másica (método 1) ó el intervalo de concentración (método 2). Abajo del punto pinch se debe usar agua sin regenerar y arriba del punto pinch se usara solo agua regenerada. La figura 5.11 muestra el diseño preliminar aplicando las técnicas del método de diseño 2 para alcanzar el flujo mínimo de agua objetivo, de 46.2 ton/hr con regeneración.

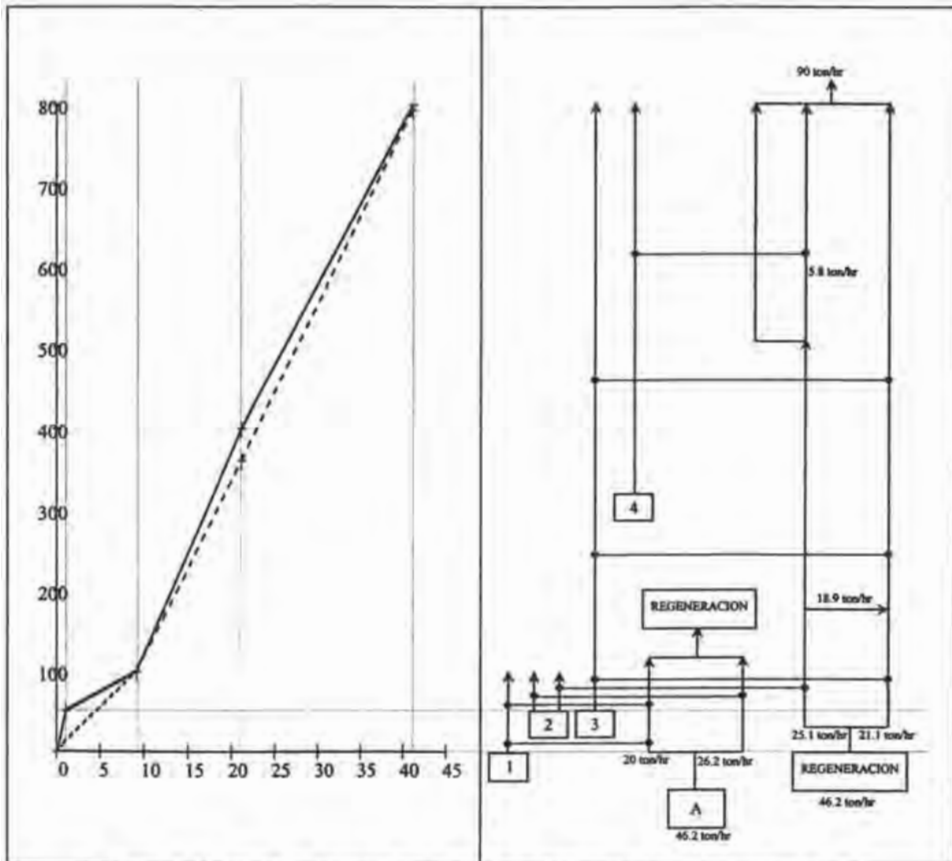


Figura 5.11 Diseño Inicial para alcanzar el flujo objetivo del ejemplo 5.1

La figura 5.12 muestra el diseño con regeneración, después que en el diseño se ha simplificado la red por el corte de los ciclos.

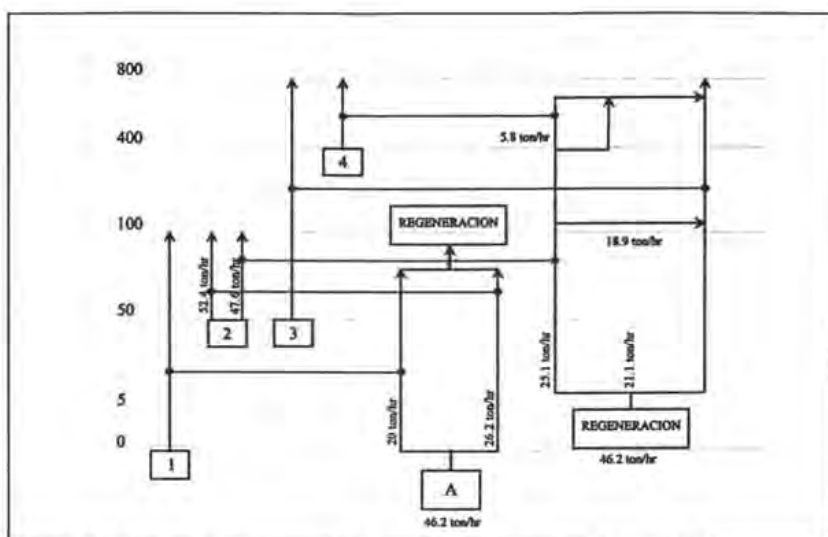


Figura 5.12 Diseño en forma de diagrama de mallas después de romper los ciclos

La figura 5.13 muestra el esquema convencional del uso de agua del diseño simplificado.

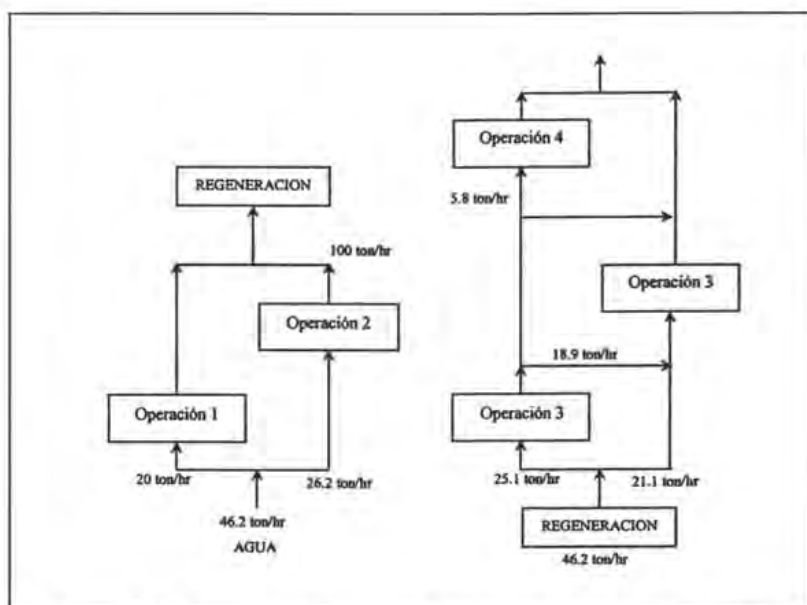


Figura 5.13 Representación como diagrama de flujo convencional

Para este ejemplo se hace notar que, aunque el proceso 2 se encuentra en contacto con agua antes y después de la regeneración, esto no significa que se presente un reciclaje sino que las diferentes partes del proceso 2 pueden emplear diferentes fuentes de agua fresca y regenerada.

Pueden presentarse situaciones donde se requiera una *regeneración parcial* de agua y en éstas la forma de la curva compuesta limitante puede restringir el flujo mínimo antes de la regeneración, ya que el flujo resulta mayor al requerido por el sistema después de la regeneración. La figura 5.14 muestra un ejemplo donde puede observar que la pendiente antes de la regeneración (f_{SA}) es la misma que después de la regeneración (f_{REGEN}) lo cual indica una regeneración total de agua.

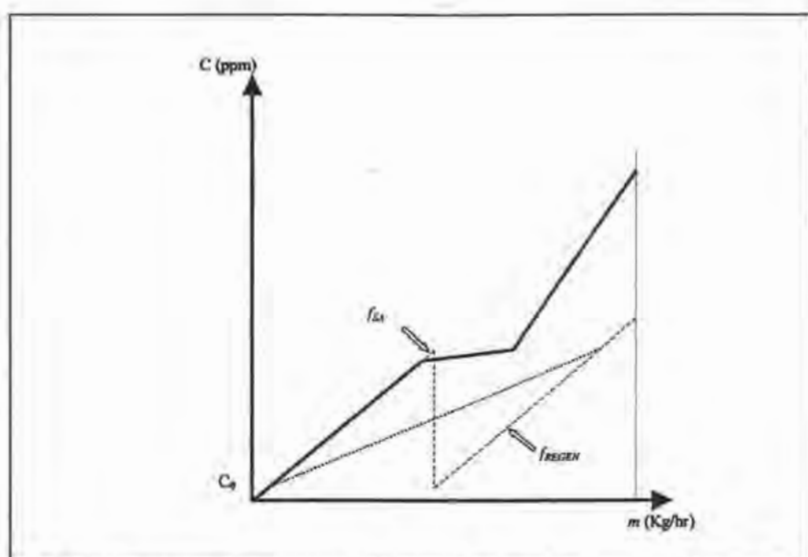


Figura 5.14 Un proceso de regeneración con el mismo flujo antes y después de la regeneración esta restringido por el proceso

El sistema no puede tener un flujo menor antes de la regeneración ya que se presentaría una violación y el sistema sería no-factible como se puede observar en la figura 5.15.

Aunque el sistema no puede tener un flujo menor antes de la regeneración si lo puede tener después de la regeneración. Al reducir el flujo después de la regeneración se pueden reducir de costos de regeneración, como se muestra en la figura 5.16, donde se puede observar que el flujo después de la regeneración (f_{REGEN}) es mas pequeño que antes de la regeneración (f_{SA}) por lo que al reducir el flujo a tratar se reducen los costos de la regeneración. El agua no-regenerada con flujo ($f_{SA} - f_{REGEN}$) esta disponible arriba de la concentración pinch.

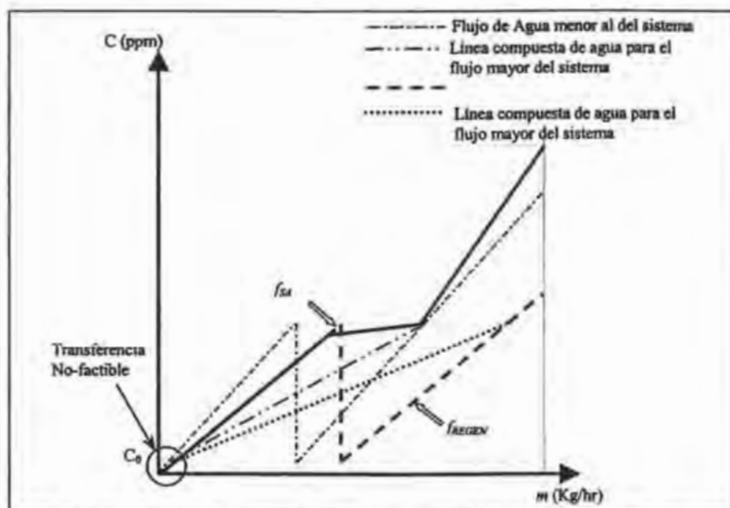


Figura 5.15 Reduciendo el flujo antes de la regeneración hace que el sistema sea no-factible

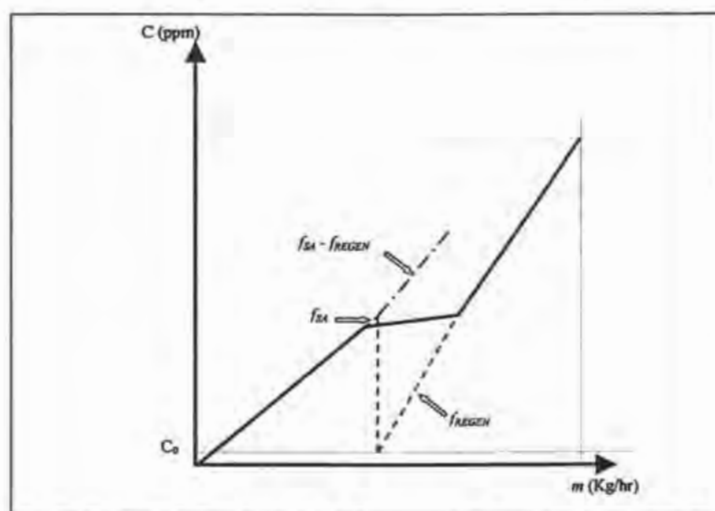


Figura 5.16 Reduciendo el flujo después de la regeneración reduce los costos de regeneración

La figura 5.17 muestra las líneas de agua de la figura 5.16 antes y después de la regeneración como una línea compuesta de suministro de agua. Usando la construcción de las figuras 5.16 y 5.17 se puede alcanzar el flujo de agua fresca objetivo. El flujo de regeneración esta dado por un simple balance de masa:

$$f_{REGEN} = \frac{m_{PINCH} - f_{SA} C_{PINCH}}{C_{PINCH} - C_0} \quad (5.4)$$

donde la línea de suministro de agua (f_{SA}) esta establecida por la condición limitante mostrada en las figuras 5.14 a 5.17.

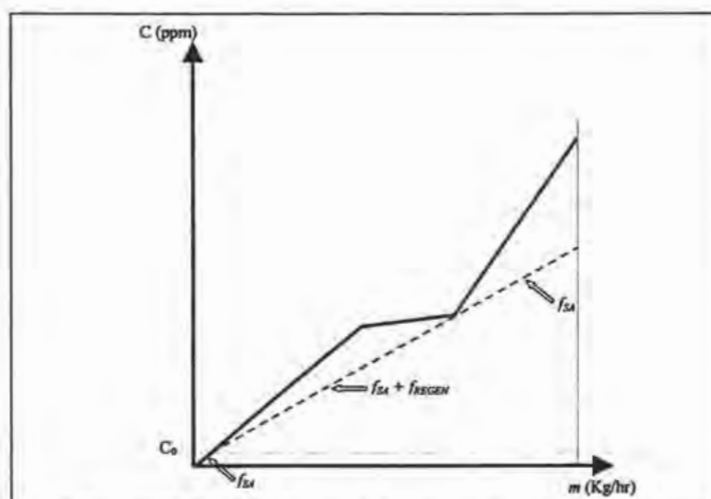


Figura 5.17 Combinando la línea de suministro antes y después de la regeneración genera la línea compuesta de suministro

Finalmente, las figuras 5.18 y 5.19 muestran una curva compuesta limitante para un proceso de regeneración mediante sobre la base de la relación de remoción de la ecuación (5.2). En vez de tener el limite inferior fijo en el proceso de regeneración mostrado en las figuras 5.1 a 5.13 y 5.14 a 5.17, ahora el limite inferior sigue el perfil de la curva compuesta limitante definido por la ecuación (5.2).

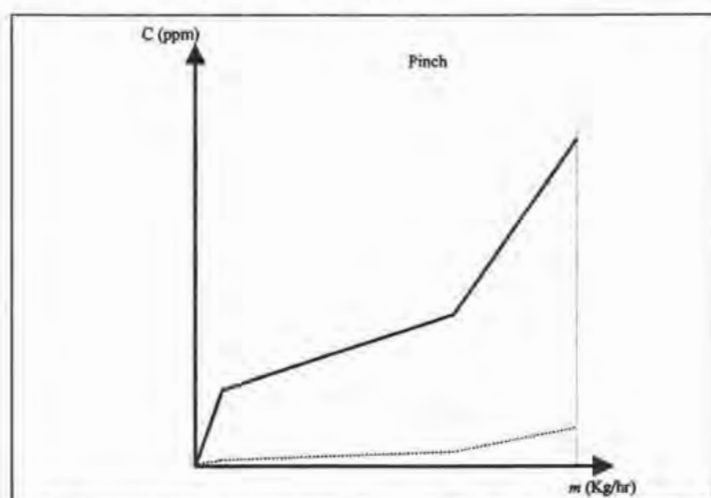


Figura 5.18 Desempeño de la regeneración basada en la relación de remoción

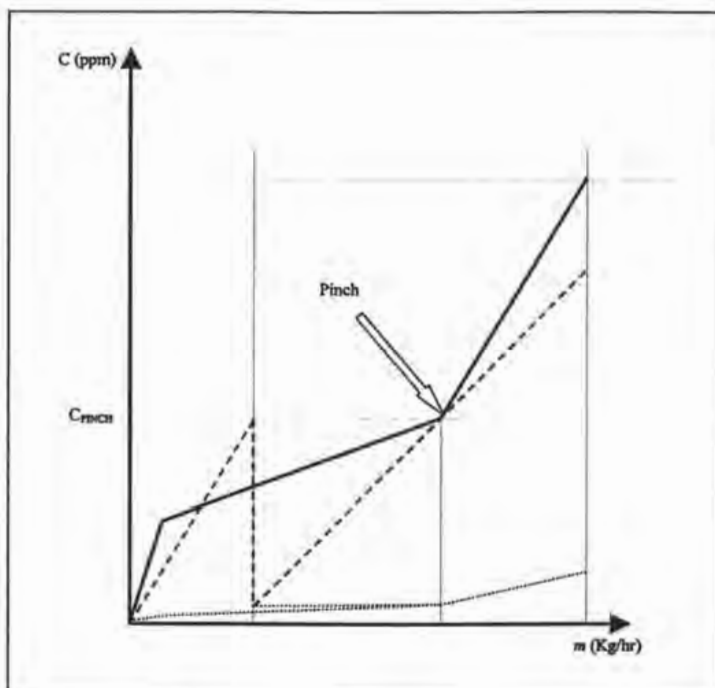


Figura 5.19 Regeneración hasta la concentración pinch basada en la relación de remoción

Todos los principios desarrollados para la regeneración especificando una concentración de salida C_0 , aplican también para los procesos de regeneración definidos por la relación de remoción, r . Se deberá regenerar cuando el agua suministrada alcance la concentración pinch. La concentración de salida de la regeneración mostrada en la figura 5.19 está definida por la ecuación (5.2) en el punto pinch.

5.2 Re-uso con Regeneración para Múltiples Contaminantes

Para adaptar la aproximación de un solo contaminante a situaciones de regeneración con múltiples contaminantes, en principio se necesita simplemente elegir un contaminante de referencia, construir la curva compuesta limitante basada en dicho contaminante (usando el cambio de concentración donde sea necesario) e incluir el proceso de regeneración como se muestra en las figuras 5.3a a 5.4, 5.14 a 5.17 y 5.18 a 5.19.

Para ejemplificar este caso considérese el ejemplo 5.2, con los datos mostrados en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Datos Limitantes para el ejemplo 5.2

Proceso	Contaminante	Carga Másica de Contaminante (Kg/hr)	C_{ENT} (ppm)	C_{SAL} (ppm)	Flujo de Agua (ton/hr)
1	A	4	0	100	40
	B	2	25	75	
2	A	5.6	80	240	35
	B	2.1	30	90	

Primeramente se asumirá que la regeneración trabaja mejor para el contaminante B que para el contaminante A, con una concentración de contaminantes después de la regeneración de $C_A = 50$ ppm y $C_B = 5$ ppm. La curva compuesta limitante se muestra en la figura 5.20 pero con regeneración.

Las concentraciones para la regeneración se calculan considerando que los contaminantes presentan una transferencia de masa proporcional en el sistema, mediante la ecuación 4.1. Si se establece como eje de referencia al contaminante B, entonces se debe calcular la concentración de A correspondiente a 5 ppm del contaminante B, considerando los datos la concentración pinch, esto es cuando $C_A = 100$ ppm entonces la concentración del contaminante B correspondiente a esta concentración es $C_B = 50$ ppm, considerando los siguientes datos:

$$C_{1A,Ent} = 0 \text{ ppm}$$

$$C_{1B,Ent} = 0 \text{ ppm}$$

$$C_{1A} = ?$$

$$C_{1B} = 5 \text{ ppm}$$

$$C_{1A,Sal} = 100 \text{ ppm}$$

$$C_{1B,Sal} = 50 \text{ ppm}$$

Sustituyendo en la ecuación 4.1,

$$\frac{C_{1A} - 0}{5 - 0} = \frac{100 - 0}{50 - 0}$$

Entonces $C_{1A} = 10$ ppm

En caso que se presente una regeneración total, se calcula el flujo de suministro de agua mediante la ecuación 5.3, donde $m_{Apinch} = 5.4$ Kg/hr, $C_{Apinch} = 100$ ppm y $C_{A0} = 10$ ppm, con lo cual el flujo mínimo de agua con regeneración resulta de 28.4 ton/hr. Para el flujo de 28.4 ton/hr se obtiene una carga másica de 2.8 Kg/hr y una concentración de salida de 200 ppm, como se observa en la figura 5.20.

Si se calcula el flujo de suministro de agua antes de la regeneración mediante la ecuación 5.3 y se traza en la figura 5.20 se observa que el sistema no es factible, por lo tanto se debe considerar como flujo mínimo al mayor de los flujos de los procesos, que para el ejemplo 2 el flujo del proceso 1 el cual es de 40 ton/hr. En caso que a este flujo de suministro se le efectuara una regeneración total, entonces se calcula la carga másica correspondiente a este flujo, considerando $C_{Apinch} = 100$ ppm y $C_{A,ENT} = 0$ ppm, con lo cual se obtiene una carga másica de 4 Kg/hr y una concentración de salida de 115 ppm. La regeneración total considerando un flujo de 40 ton/hr se muestra en la figura 5.21.

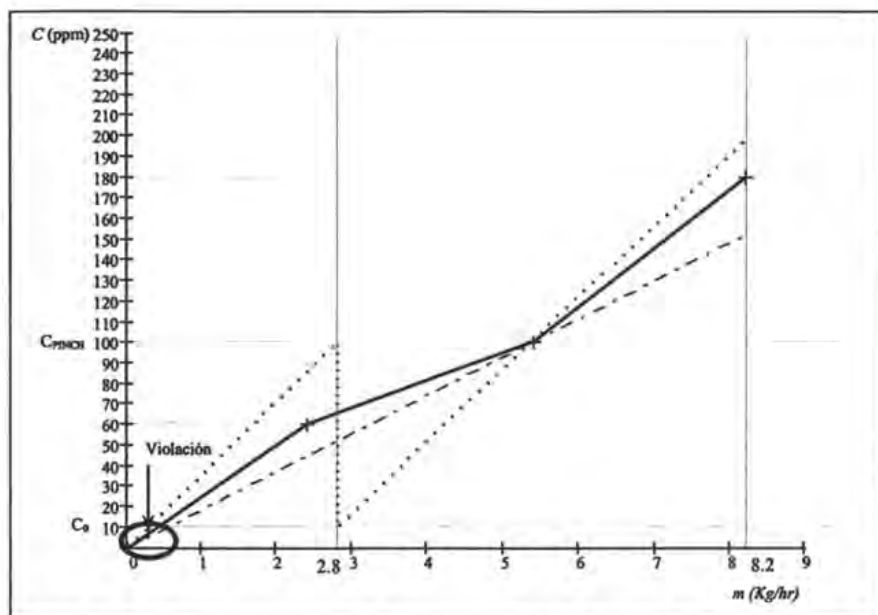


Figura 5.20 El flujo mínimo antes de la regeneración obtenido mediante la ec. 5.3 ocasiona una violación en el sistema

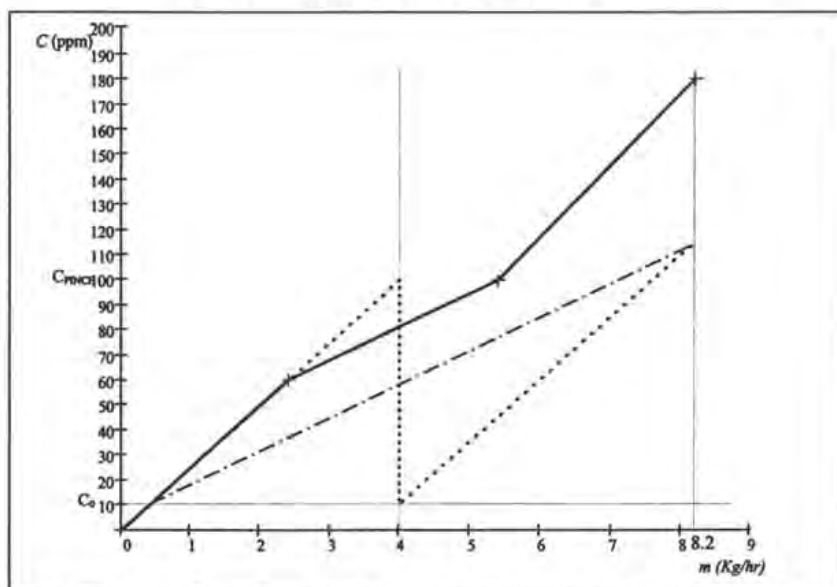


Figura 5.21 Regeneración total restringida considerando un flujo de suministro de 40 ton/hr

La curva compuesta limitante restringe el flujo mínimo antes de efectuar la regeneración, así que el problema de tratarse como uno de regeneración parcial cuyo análisis gráfico se muestra en las figuras 5.22 y 5.23. El flujo objetivo de regeneración se calcula aplicando la ecuación 5.4 para los contaminantes A y B separadamente, entonces:

$$f_{REGEN} = \max \left[\left(\frac{m_{PINCH} - f_{SA} C_{PINCH}}{C_{PINCH} - C_0} \right)_A, \left(\frac{m_{PINCH} - f_{SA} C_{PINCH}}{C_{PINCH} - C_0} \right)_B \right] \quad (5.5)$$

Sustituyendo:

$$f_{REGEN} = \max \left[\left(\frac{5.4 - (40)(100)}{100 - 10} \right)_A, \left(\frac{5.4 - (40)(100)}{100 - 5} \right)_B \right]$$

$$f_{REGEN} = \max [(15.6)_A, (14.7)_B]$$

De este modo para el ejemplo 5.2 esto resulta un flujo de $f_{REGEN} = 15.6$ ton/hr y el flujo de suministro de agua f_{SA} de 40 ton/hr, como se muestra en la figura 5.22. La curva compuesta de regeneración se observa en la figura 5.23

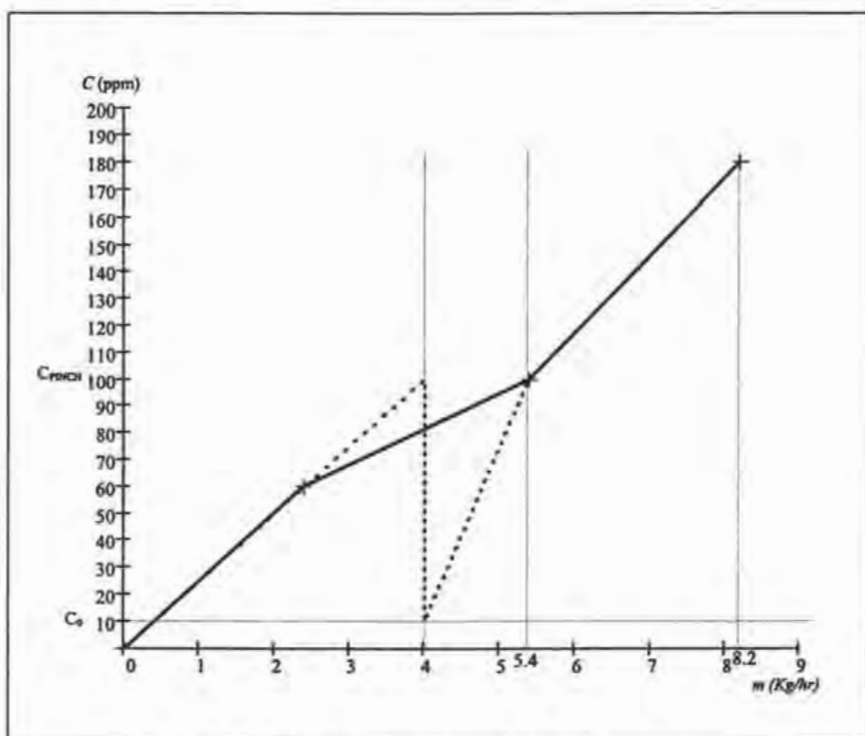


Figura 5.22 Regeneración Parcial para el ejemplo 2

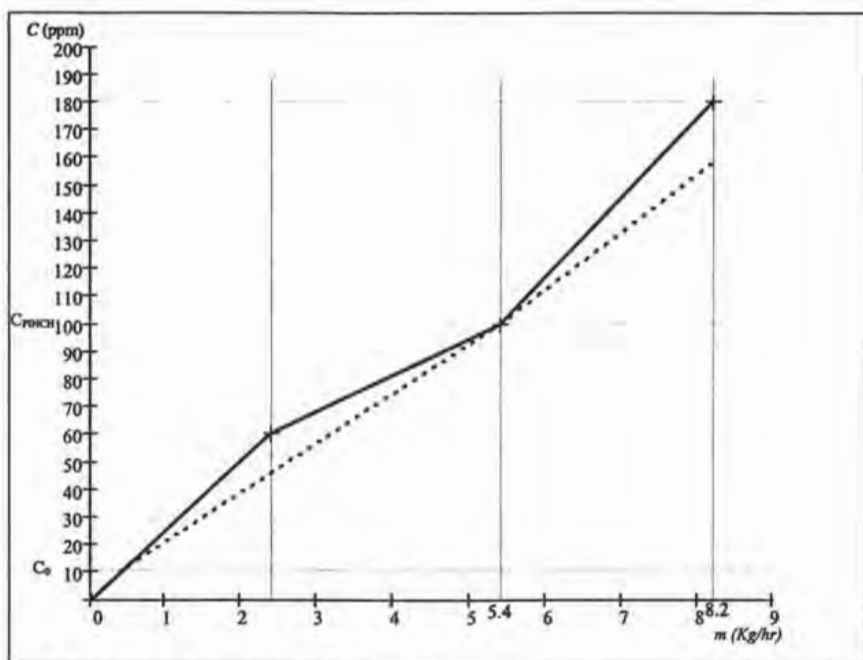


Figura 5.23 Curva Compuesta de Agua con Regeneración Parcial para el ejemplo 2

La figura 5.24 muestra el diseño para alcanzar el flujo objetivo usando el método de diseño del número mínimo de fuentes de agua (método 2).

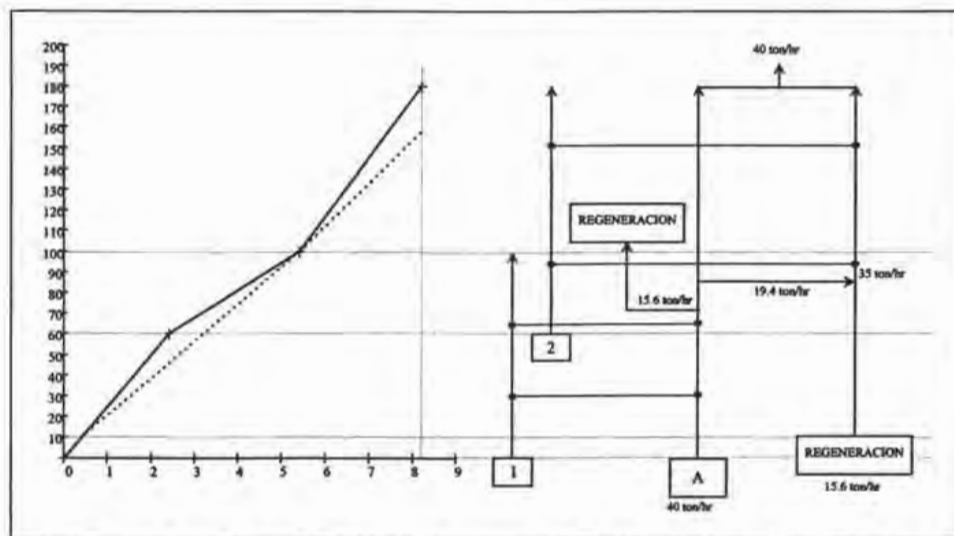


Figura 5.24 Diseño Inicial para alcanzar el flujo objetivo para el ejemplo 2

La figura 5.25(a) muestra el diseño con regeneración simplificado, después que se ha simplificado por el corte de los ciclos. La figura 5.25(b) muestra el diseño final como diagrama convencional.

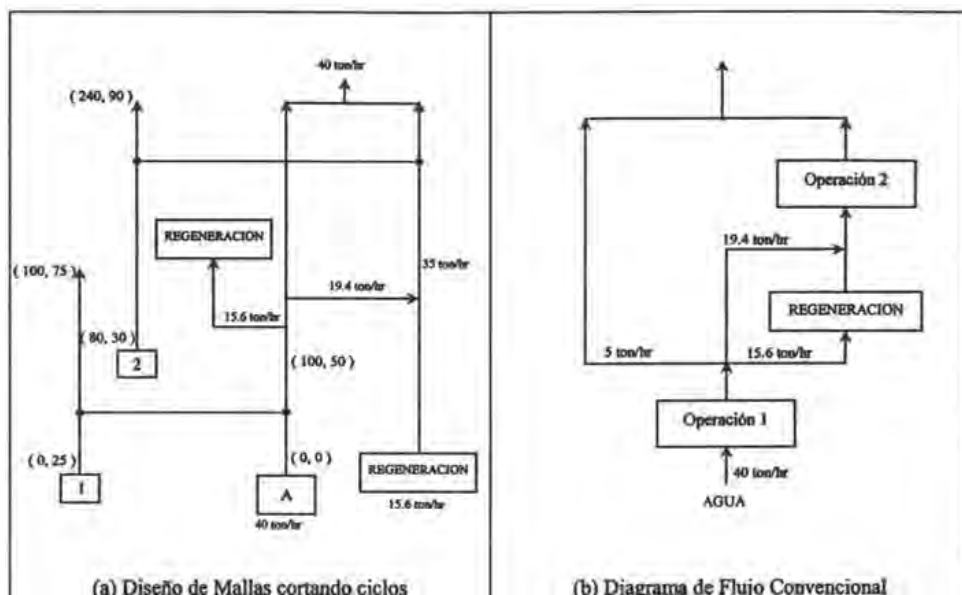


Figura 5.25 Diseño para el ejemplo 5.2 con proceso de regeneración y una concentración de $C_A = 50$ ppm y $C_B = 5$ ppm a la salida

Ahora se resolverá el mismo problema (ejemplo 5.3), pero asumiendo que la regeneración trabaja mejor con el contaminante A que con el contaminante B con una concentración después de la regeneración de $C_A = 5$ ppm y $C_B = 10$ ppm.

Nuevamente los valores para la regeneración se calculan considerando la transferencia de masa proporcional mediante la ecuación 4.1. Si se establece como eje de referencia al contaminante A, se debe calcular la concentración de A correspondiente a 10 ppm del contaminante B, considerando los datos a la concentración pinch, esto es cuando $C_A = 100$ ppm, entonces la concentración del contaminante B correspondiente es $C_B = 50$ ppm, considerando los siguientes datos::

$$C_{IA,Ent} = 0 \text{ ppm}$$

$$C_{IB,Ent} = 0 \text{ ppm}$$

$$C_{IA} = 10 \text{ ppm}$$

$$C_{IB} = ?$$

$$C_{IA,Sal} = 100 \text{ ppm}$$

$$C_{IB,Sal} = 50 \text{ ppm}$$

Sustituyendo en la ecuación 4.1,

$$\frac{C_{1A}-0}{10-0} = \frac{100-0}{50-0}$$

Entonces $C_{1A} = 20$ ppm

En caso que se efectúe una regeneración, el flujo de suministro de agua resulta de 40 ton/hr como se muestra en la figura 5.26.

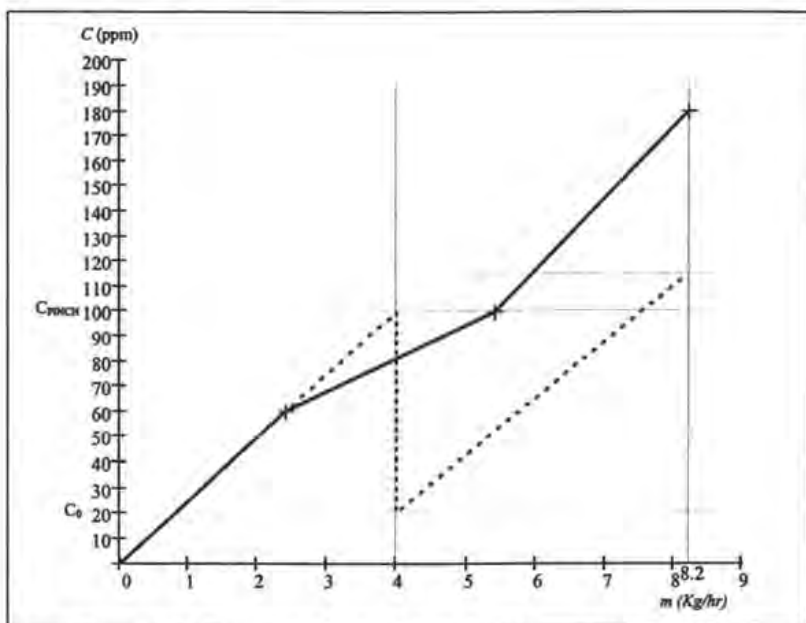


Figura 5.26 Regeneración total restringida para el ejemplo 3

Nuevamente, la curva compuesta limitante restringe el flujo mínimo antes de la regeneración, así que el problema requiere regeneración parcial como se muestra en la figura 5.27. El flujo objetivo de regeneración se calcula mediante la ecuación 5.4 para los contaminantes A y B separadamente; sustituyendo resulta:

$$f_{REGEN} = \max \left[\left(\frac{5.4 - (40)(100)}{100 - 20} \right)_A, \left(\frac{5.4 - (40)(100)}{100 - 10} \right)_B \right]$$

$$f_{REGEN} = \max [(17.5)_A, (15.6)_B]$$

Esto da un flujo de $f_{REGEN} = 17.5$ ton/hr y el flujo de suministro de agua f_{SA} permanece en 40 ton/hr, como se observa en la figura 5.27. La curva compuesta de regeneración se observa en la figura 5.28.

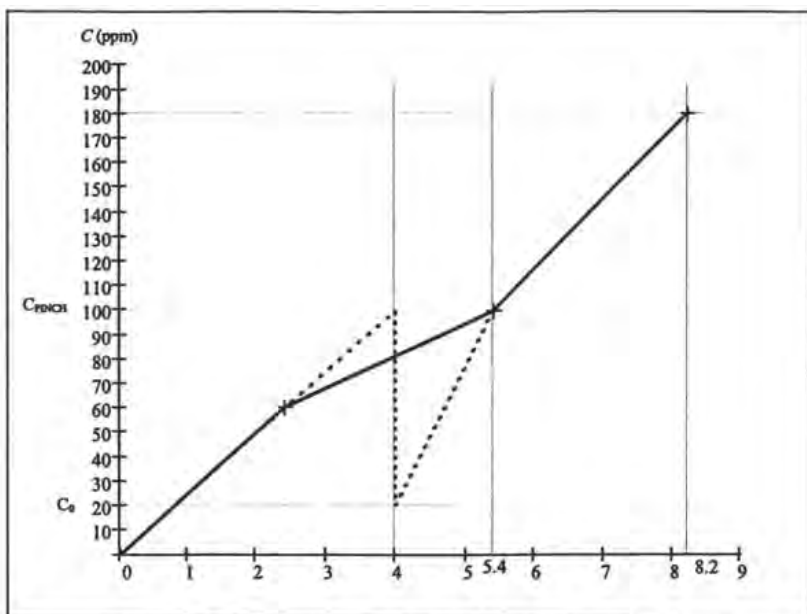


Figura 5.27 Regeneración Parcial para el ejemplo 3

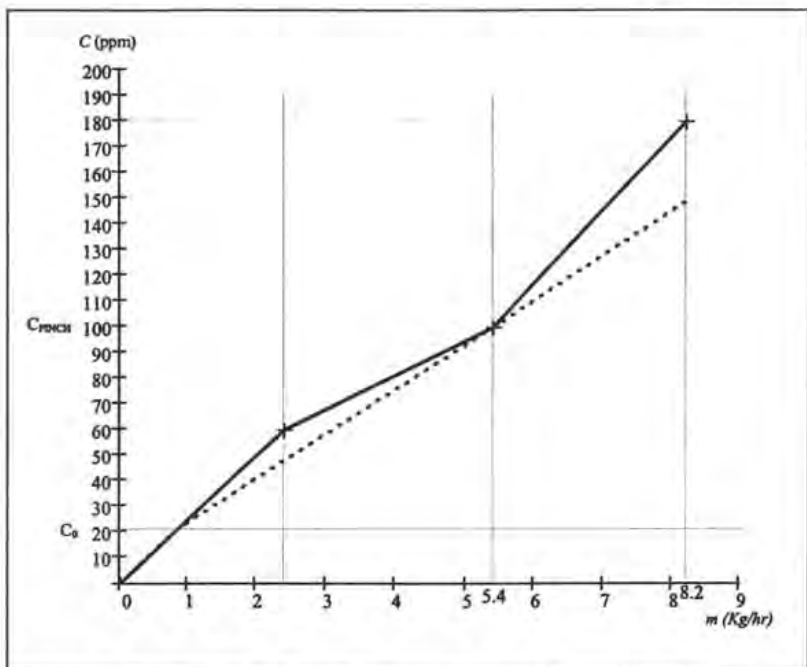


Figura 5.28 Curva compuesta de suministro de agua con Regeneración Parcial para el ejemplo 3

Un diseño para alcanzar el flujo objetivo mediante el método del número mínimo de fuentes de agua (método 2) se muestra en las figura 5.29 y 5.30.

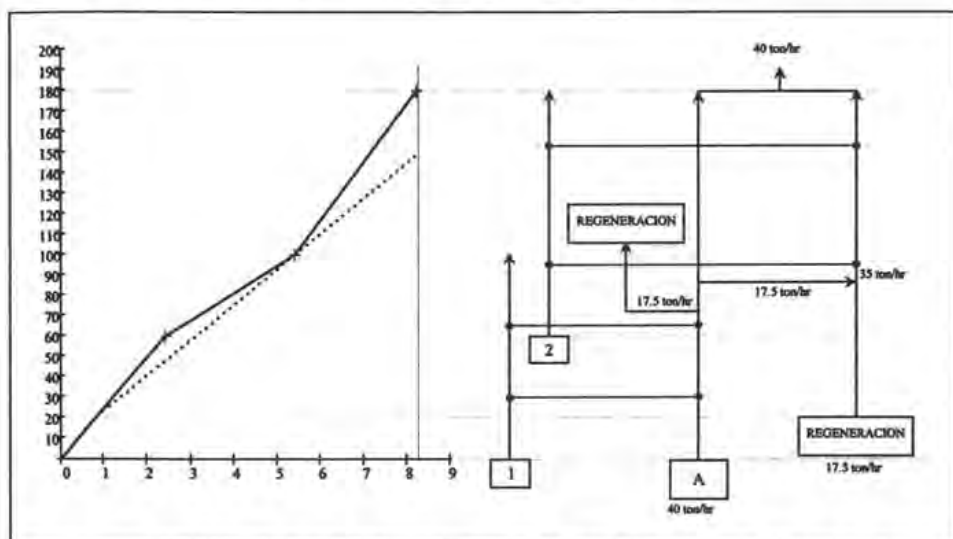
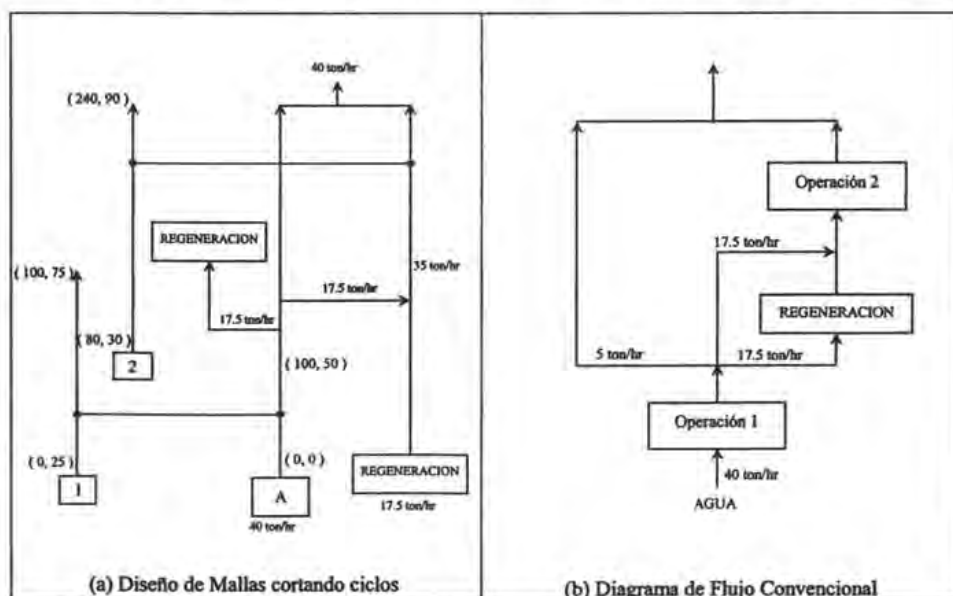


Figura 5.29 Diseño Inicial para alcanzar el flujo objetivo para el ejemplo 3



(a) Diseño de Mallas cortando ciclos

(b) Diagrama de Flujo Convencional

Figura 5.30 Diseño para el ejemplo 5.3 con proceso de regeneración y una concentración de $C_A = 5$ ppm y $C_B = 10$ ppm a la salida para el ejemplo 3

5.3 Reciclaje con Regeneración

La diferencia entre el re-uso y el reciclaje es que en el re-uso el agua no se puede entrar nuevamente a las operaciones donde ha sido previamente usada, mientras que en el reciclaje si se permite. Se debe subrayar que el reciclaje con regeneración involucra reciclaje del sistema, esto es, reciclaje total de agua del sistema en vez de reciclaje local alrededor de las operaciones individuales.

Si el sistema permite el reciclaje entonces el flujo se puede reducir aun mas que el mostrado en las figuras 5.3 - 5.4 donde solo se maneja el re-uso. Si se permite el reciclaje, entonces la reducción de flujo será hasta donde lo determine la pendiente de la curva compuesta limitante, antes de la concentración de regeneración C_0 , como se muestra en la figura 5.31.

Si a este flujo de agua se le permite alcanzar la concentración pinch y se regenera, como se muestra en la figura 5.31, se observa que hay insuficiente agua para satisfacer los requerimientos del sistema.

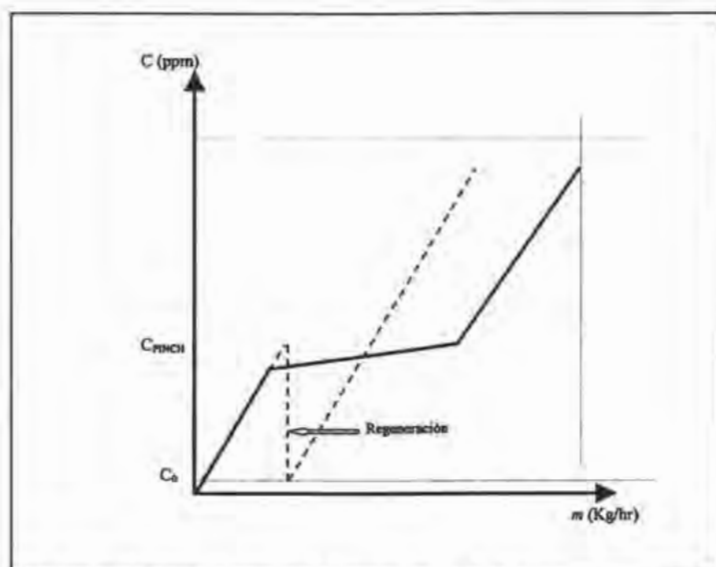


Figura 5.31 Flujo Mínimo ajustado a la pendiente de la curva compuesta limitante antes de C_0

Para mantener el sistema factible se necesita incrementar el flujo después de la regeneración, como se muestra en la figura 5.32, lo cual solo se puede hacer por reciclaje.

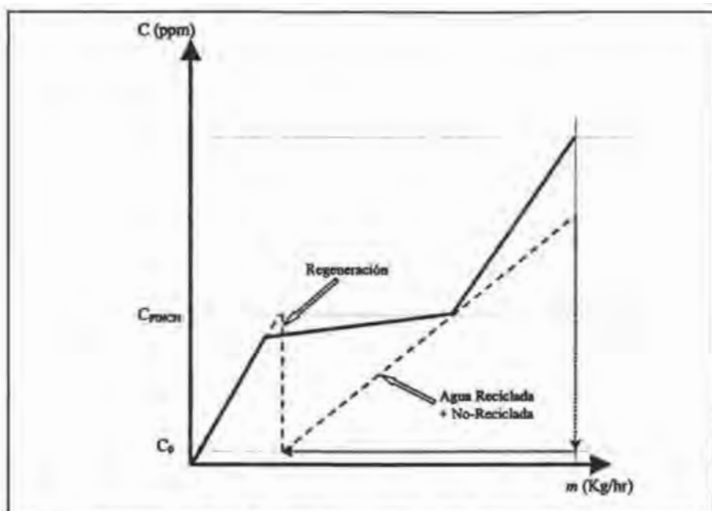


Figura 5.32 Un incremento en el flujo después de la regeneración requiere reciclaje

En la figura 5.32, la pendiente de la línea de suministro de agua después de la regeneración indica que el flujo total de agua está siendo regenerado. La figura 5.33 muestra la curva compuesta de la línea de suministro de agua antes y después de la regeneración.

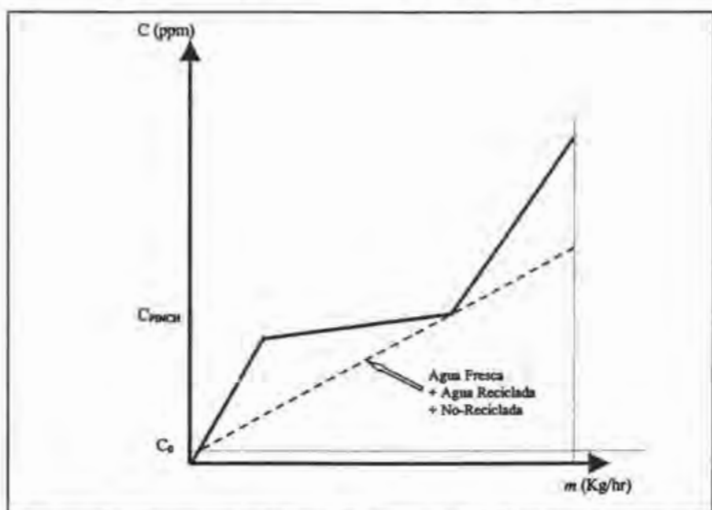


Figura 5.33 Curva compuesta de la línea de Suministro de Agua antes y después de la Regeneración

Para ejemplificar el reciclaje con regeneración se retomara el ejemplo 1 de la tabla 5.1 (ejemplo 5.4) y se permitirá el reciclaje con regeneración. El flujo objetivo de agua fresca y agua residual de la figura 5.34 y 5.35 es de 20 ton/hr para el reciclaje con regeneración (compárese contra las 46.2 ton/hr para el re-uso con regeneración).

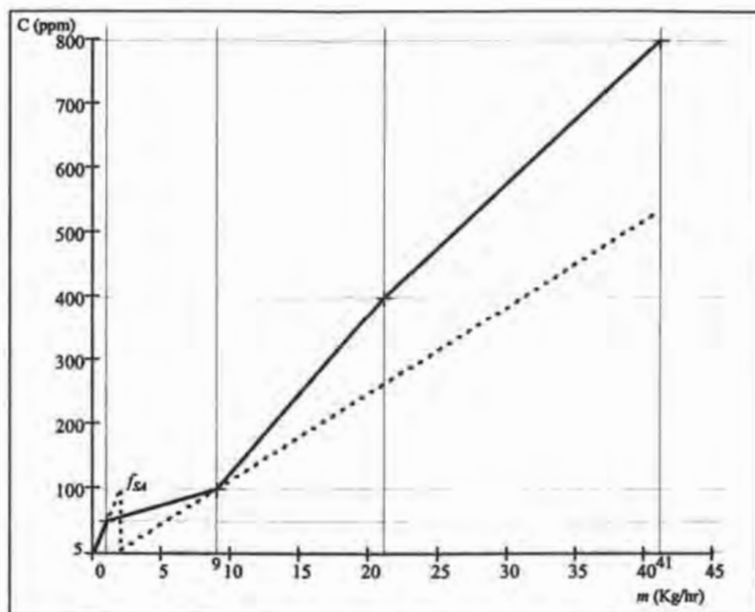


Figura 5.34 Regeneración con Reciclaje para el ejemplo 4

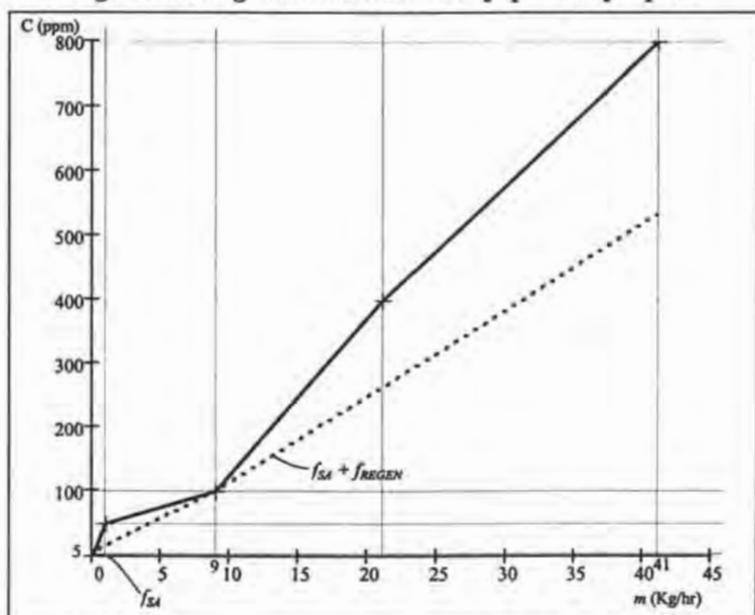


Figura 5.35 Curva Compuesta de Suministro de Agua para el ejemplo 4

El flujo objetivo de regeneración es de 73.7 ton/hr. La figura 5.36 muestra un diseño inicial usando el método del número mínimo de fuentes de agua (método 2).

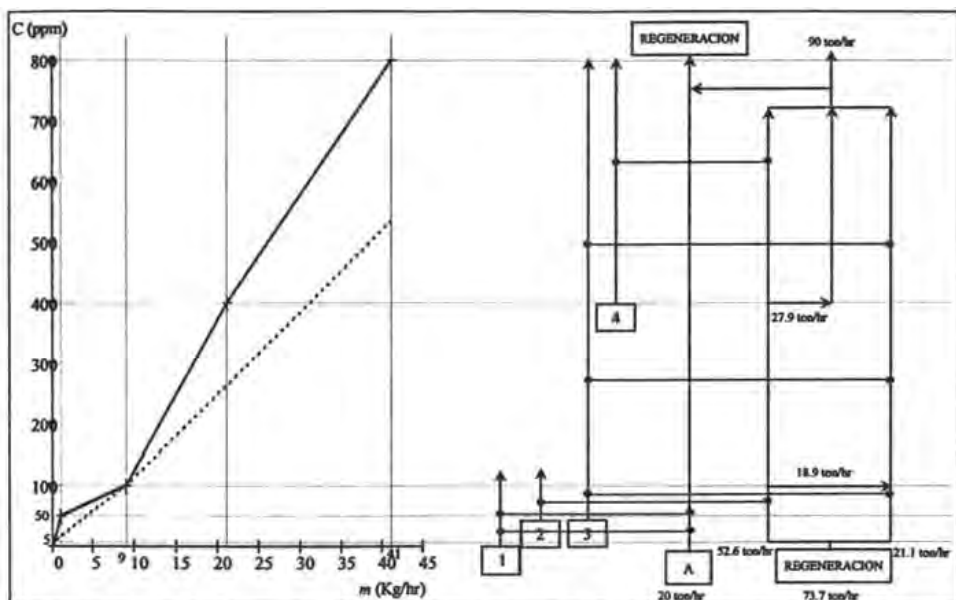


Figura 5.36 Diseño inicial para alcanzar el flujo objetivo para el ejemplo 4

La figura 5.37(a) muestra el diseño después de evolucionar en la forma de malla. La figura 5.37(b) muestra el diagrama de flujo convencional final de este diseño.

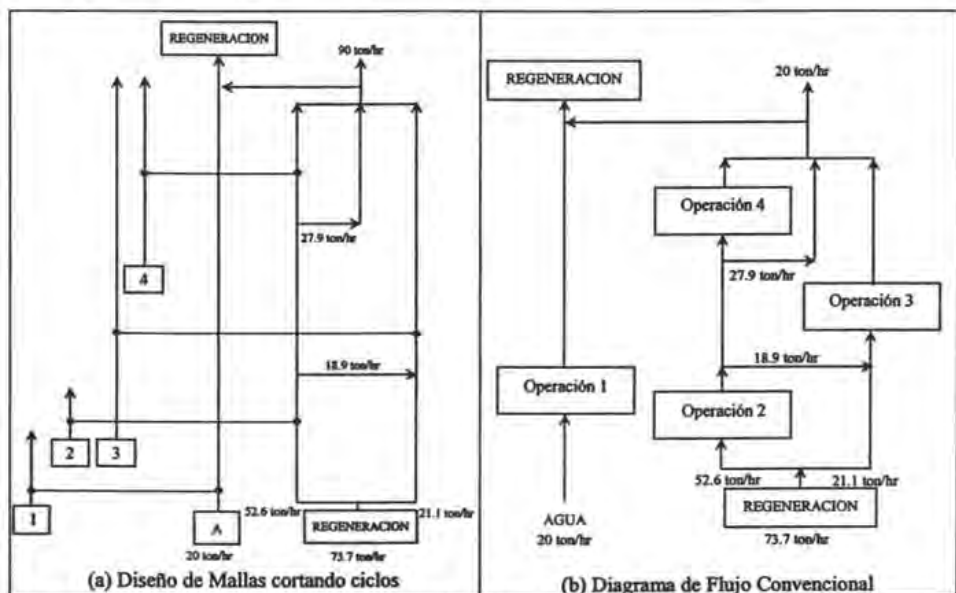


Figura 5.37 Diseño para el ejemplo 4 de la figura 5.36 (a) Cortando ciclos. (b) Como diagrama de flujo convencional

En resumen, usando la construcción simple mostrada en las figuras 5.3 a 5.4, 5.14 a 5.17 y 5.18 a 5.19 el diseñador puede fácilmente escoger la especificación para el proceso de regeneración mas apropiada cuando se considera el re-uso sin reciclaje, o la construcción en las figuras 5.31-5.33 cuando se considera el reciclaje. Los flujos objetivo permiten examinar diferentes escenarios sin emplear diseños repetidos. Mas aún, se pueden usar los métodos de aproximación conceptual para ayudar a especificar el tipo de regenerador mas apropiado y la especificación del mismo.

5.4 Regeneración con Restricciones de Flujo

Los métodos presentados previamente para la obtención del flujo objetivo con regeneración son fácilmente extensibles a situaciones donde se presentan restricciones de flujo. Esto debido a que el problema que involucra regeneración puede romperse en dos partes: una parte del sistema puede usar agua fresca y la otra parte agua regenerada. Con ello, efectivamente, se crean dos problemas, donde cada uno deber ser tratado usando los métodos presentados en el capítulo 3 (apartado 3.5) cuando hay restricciones de flujo.

El uso de la regeneración en problemas con restricciones de flujo son poco frecuentes. La regeneración parece reducir el flujo comparado con el empleo del re-uso. La reducción del flujo introduciendo la regeneración presenta conflictos con las restricciones de flujo. La introducción de la regeneración incrementará la complejidad de la red, así que la introducción de la regeneración en situaciones que son dominadas por las restricciones de flujo son posibles pero raras.

CAPITULO VI. ESTUDIO DE APLICACION

En este capítulo se presentara un caso práctico para la aplicación del pinch de agua estudiado en los capítulos anteriores así como los pasos a seguir para el estudio. El caso de estudio es para un complejo procesador de gas existente en el cual se desea conocer el porcentaje de ahorro de agua posible de obtener.

6.1 Pasos del Estudio de Integración de Procesos para Re-uso de Agua

Los pasos en el estudio pueden diferir ligeramente de una planta a otra de acuerdo a los objetivos establecidos, datos disponibles y los requerimientos del personal de la planta. Sin embargo, en la mayoría de los casos, el estudio comprende los siguientes pasos:

- 1) Determinación de los objetivos del estudio
- 2) Desarrollo del Balance de Materia
- 3) Extracción de datos de proceso
- 4) Aplicación de las técnicas de integración de procesos
- 5) Presentación de resultados al personal de la planta
- 6) Recomendación de un plan de acción
- 7) Implementación del proyecto
- 8) Evaluación y seguimiento del ahorro

En la figura 6.1 se observa un diagrama de flujo para el estudio de integración de agua (pinch de agua).

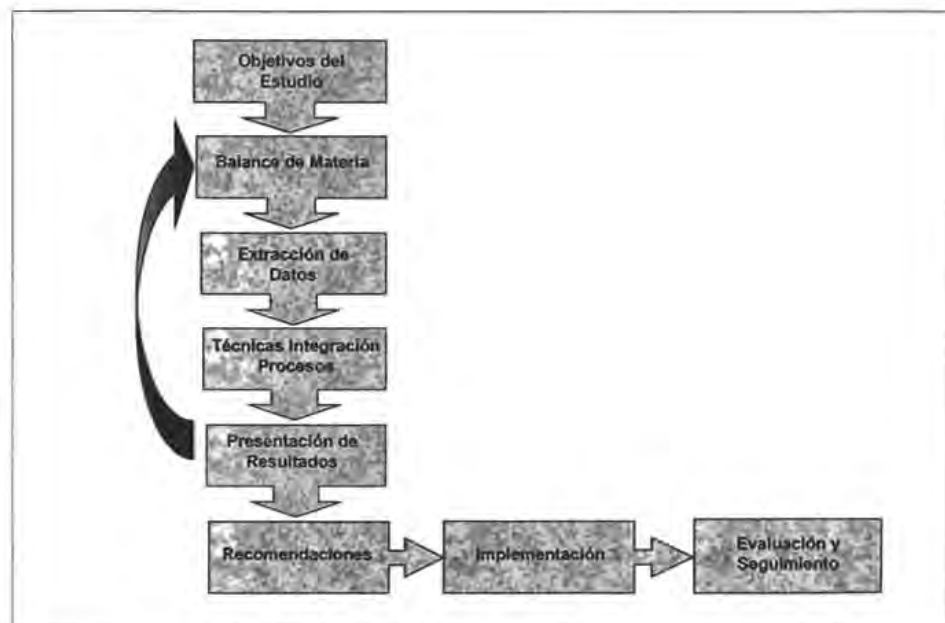


Figura 6.1 Pasos a seguir en un estudio de Integración de Procesos

6.1.1 Determinación de los objetivos del estudio

El primer paso en un estudio de integración de procesos es la determinación de los objetivos de la planta. En general, el objetivo principal es la reducción en los costos de operación o inversión mediante proyectos que aumenten la rentabilidad. Algunas de las principales restricciones económicas a considerar incluyen:

- El máximo periodo de retomo de la inversión
- Los fondos disponibles
- El tiempo para la implementación del proyecto (por ejemplo, un plan a 3 años)
- Proyectos futuros (expansión de la planta, incremento de la capacidad, reemplazo de equipo, nuevos niveles de producción etc.)

También se deben incluir en los objetivos del ahorro de agua fresca la reducción de agua residual o cumplimiento con la normatividad y aquellos relacionados típicamente a la producción o al ambiente. Por ejemplo una planta desearía resolver un problema de efluentes con alta carga de contaminante, reducir el volumen de descarga, mejorar condiciones de operación desfavorables o eliminar el elemento problemático de una unidad de proceso.

A fin de obtener tanto beneficio como sea posible se debe proceder a una enumeración rigurosa y detallada de los objetivos que permitan incrementar el valor estratégico y económico de los resultados del estudio.

6.1.2 Desarrollo del Balance de Materia

El balance de materia para una operación, un proceso o para toda la planta es la mejor fuente de información para la aplicación del método del pinch de agua. En la mayoría de los casos se debe preparar el balance y plasmarse en diagramas del flujo de proceso. La información detallada de cada corriente, valores tales como flujo, temperatura, composición y presión deben estar incluidas en el balance. Esto va mas allá de la simple caracterización de cada usuario de agua, ya que la mayoría de los procesos involucran algún fenómeno de transformación y degradación de masa que puede ser muy difícil de identificar, pero pueden tener un impacto significativo en los requerimientos de agua de un proceso. Un ejemplo puede ser un a reacción ocurrida en un reactor donde se obtiene como subproducto agua. En algunos casos es posible realizar un estudio de integración de agua usando los datos de operación disponibles en la planta sin contar con un balance de materia detallado. Sin embargo la calidad de estos datos generalmente es baja y frecuentemente presentan inconsistencias. Mas aun, el nivel de detalle puede ser bajo y esto generalmente impactara en la calidad de los resultados del estudio.

Los numerosos cálculos requeridos para obtener un balance de materia pueden realizarse sin contar con una hoja de calculo o un simulador de procesos. El simulador de procesos es la mejor herramienta que permite simular y predecir el impacto de las diferentes modificaciones encontradas en el estudio. Sin embargo para desarrollar un modelo de "alta fidelidad" es crucial que se cuente con una capacidad de predicción confiable. Esto requiere una recolección extensiva de datos en sitio y una verificación realizada por un ingeniero que cuente con experiencia en la simulación de procesos, de otro modo la simulación no llegara a ser mas que un sustituto de la hoja de calculo.

La calidad del balance de materia se relaciona directamente con la calidad y cantidad de información disponible en la planta (por ejemplo datos históricos). Se pueden requerir mediciones sistemáticas hechas con instrumentación portátil (medidor de flujo ultrasónico, analizadores portátiles, wattmetro) pero puede resultar imposible obtener mediciones para algunas variables importantes. Esto puede ser evaluado al inicio de cada estudio para decidir la precisión y confiabilidad deseada en los balances así como para seleccionar las mejores hipótesis y estrategias a adoptar.

La asistencia del personal de la planta es esencial para facilitar el acceso a todos los datos existentes. Mas aun, el conocimiento del staff de la planta debe validar los datos obtenidos en el balance de materia para asegurar que se reflejen lo mas cercano posible a las condiciones reales de operación.

6.1.3 Extracción de datos de proceso

El análisis pinch comienza con un análisis detallado del balance de materia del cual se hace la extracción de datos para conocer los requerimientos actuales de agua del proceso o procesos que componen a la planta. Para cada corriente considerada en el balance se necesita obtener el flujo, la carga másica de contaminante intercambiado y las concentraciones iniciales y finales de dicho contaminante o contaminantes.

Los resultados del estudio dependen en gran medida de esta fase por lo que se debe examinar a fondo el diagrama de flujo a fin de extraer solamente la información pertinente. Algunas veces existen diferentes posibilidades de extraer una característica de alguna corriente, por ejemplo, si un circuito (lazo) de agua es utilizado para diversos usuarios, se debe considerar la elección de los requerimientos de agua del lazo principal o las necesidades de agua de cada usuario. La primera opción llevara a proyectos menos costosos mientras que la otra generara mejores potenciales de ahorro de agua. Frecuentemente deben analizarse pocas posibilidades de extracción de datos a fin de seleccionar la mas apropiada que se aplicará en la planta.

Un análisis riguroso de las corrientes de proceso proporciona un panorama global de las unidades de operación, procesos y la planta completa. Este paso también se usa para registrar medidas adicionales de ahorro de agua que no surgen directamente del análisis de la integración de agua tales como reparación de fugas en válvulas, en uniones de tuberías, o el ajuste de un lazo de control que provoca fluctuaciones excesivas.

También se deben recopilar otros datos necesarios para complementar el estudio, en particular debe realizarse un estimado de costo para sistemas nuevos de tratamiento o acondicionamiento de agua surgidos del estudio. Asimismo se deben incorporar las restricciones técnicas (es decir límites de solubilidad máxima de soluto en el solvente, restricciones entre algunos pares de corrientes, distancias excesivas entre corrientes, etc.), o las restricciones operativas (es decir temperaturas presiones y tolerancia de pureza de algún equipo, requerimientos relacionados al control de la producción, etc.).

6.1.4 Aplicación de las técnicas de integración de procesos

Mediante las técnicas de integración de procesos se analizan los datos recopilados en las etapas anteriores y se identifican un conjunto de proyectos donde se pueden cumplir los objetivos establecidos al inicio del estudio. En particular una de las principales técnicas de integración de procesos, el análisis pinch, puede usarse para determinar los requerimientos mínimos de agua fresca, con lo cual puede realizarse un estudio para conocer los costos de capital requeridos para

alcanzar estos requerimientos. El análisis pinch también lleva a la identificación de proyectos que minimicen la descarga de agua residual en los procesos o en la planta.

Los diferentes tipos de proyectos considerados por la integración de procesos para minimizar el consumo de agua incluyen las siguientes soluciones: mezcla de corrientes de agua, modificación a las condiciones de operación de los equipos de proceso, reducción de necesidades de suministro de agua, reciclaje de corrientes descargadas a los drenajes reduciendo el flujo de agua fresca, etc.

Esta fase del estudio termina al establecer la naturaleza exacta de los proyectos que pueden alcanzar las metas y cumplir con los criterios económicos de la planta. Los procedimientos para llevar a cabo el diseño óptimo de estos proyectos son propuestos por las técnicas de integración de procesos. Las ecuaciones de costo que pueden surgir del estudio permiten una rápida evaluación del potencial de ahorro de agua del proyecto así como sus costos de capital.

Las técnicas de integración de procesos facilitan la identificación de proyectos potenciales de llevar a cabo a fin de elegir el más adecuado. Todas las soluciones propuestas deben presentarse al personal clave de la planta para su aprobación, modificación o rechazo.

6.1.5 Presentación de resultados al personal de la planta

Una junta con el personal clave de planta es la oportunidad ideal para la evaluación de los proyectos de ahorro de agua identificados durante el estudio de integración de procesos. Frecuentemente, este es el único momento donde los miembros relevantes del staff se encuentran disponibles para discutir juntos los resultados encontrados. Después de la presentación, una sesión de lluvia de ideas genera información importante, tal como restricciones específicas de la planta, medición del ahorro de agua que se visualiza desfavorable, experiencias no exitosas de proyectos anteriores, cambios venideros en los procesos, etc.

La meta de estas juntas no es hacer la selección final de los proyectos recomendados, sino recopilar los comentarios, observaciones y objeciones del staff para la terminación del estudio y a la identificación de la mejor estrategia a adoptar. En general los pasos de los puntos 6.1.3 y 6.1.4 del estudio deben ser actualizados a fin de tomar en cuenta la información adicional proporcionada por el staff.

6.1.6 Recomendación de un plan de acción

El conjunto final de proyectos y soluciones identificados al término del estudio del pinch de agua son reunidos en un plan de acción para que el personal de la planta les de seguimiento. El plan usualmente se presenta mediante una tabla que contiene una descripción de los proyectos y sus parámetros técnicos y económicos. Cada proyecto también puede representarse en un diagrama de procesos simplificado para ilustrar el concepto propuesto. Es esencial que el personal clave entienda claramente las soluciones recomendadas.

El plan de acción puede incluir la recomendación en el orden de importancia en el cual los proyectos deben ser implementados y una descripción de las principales dificultades que puedan surgir así como estrategias para atacarlas.

El desarrollo de estas recomendaciones requieren de un nivel apropiado de precisión en la estimación de costos de capital y ahorros anuales, donde tal vez sea necesario el desarrollo de una ingeniería preliminar de cada proyecto a fin de evaluar los costos de compra e instalación de las

piezas principales de equipo. También se pueden determinar ahorros anuales usando, por ejemplo, un simulador de procesos mencionado en el punto 6.1.2. Los ahorros pueden obtenerse para diferentes temporadas y niveles de producción. Los resultados (costos de ahorro y capital) generalmente se usan para establecer el periodo de recuperación de cierto proyecto. Sin embargo también se pueden usar otros indicadores de rentabilidad.

6.1.7 Implementación del proyecto

En la mayoría de los casos, para conocer el costo de capital requerido para realizar la instalación se requiere de un nivel de ingeniería de detalle mayor al mencionado en el punto 6.1.6 para la fase de implementación del proyecto. Generalmente los ahorros de agua calculados en el punto 6.1.6 son lo suficientemente precisas para la mayoría de los proyectos relativamente sencillos. Sin embargo para soluciones complejas o innovadoras se puede requerir de estudios de factibilidad para afinar la evaluación económica.

En esta fase se puede proceder a desarrollar la ingeniería de detalle y a la construcción de la propuesta surgido del proyecto. En algunos casos es crucial asegurar la completa comprensión del o los proyecto(s) seleccionado(s), por lo que es importante la participación de las personas involucradas desde el inicio del proyecto para evitar confusiones.

6.1.8 Evaluación y seguimiento del desempeño

Esta fase, frecuentemente desatendida, es un factor clave para la aplicación exitosa de proyectos de ahorro de agua. Esto permite una evaluación exacta de los ahorros reales obtenidos y su evolución en el tiempo. Idealmente esta fase debe ser planeada al termino de la ingeniería de detalle para asegurar que se incluya la instrumentación adecuada que facilite el seguimiento del desempeño.

Una evaluación de los ahorros puede contribuir a promover otros proyectos de ahorro de agua y puede animar a una actividad sustentable en esta área.

Con el tiempo se pueden obtener reducciones significativas en el ahorro de agua por la implementación de proyectos de integración de agua como resultado de factores tales como ensuciamiento en intercambiadores de calor, envejecimiento de equipo, defectos no reparados, paros accidentales de equipo, etc. Por lo anterior es muy importante realizar al menos un seguimiento en los siguientes años. Mas aun la información recopilada en el seguimiento puede permitir al personal de la planta determinar el tiempo adecuado para reemplazo o limpieza de equipo.

6.2 Descripción del Complejo

El método del pinch de agua se aplicara a un complejo procesador de gas existente, el cual procesa en promedio 19.5 millones de m³ d gas amargo/día (689.3 MMSCFD) y produce gas natural, etano, propano/butano y otros hidrocarburos de mayor peso molecular. El consumo de agua promedio es de 45,353.5 m³ de agua por día (1889.74 ton/h). Las plantas existentes en el complejo son:

- 1) Plantas Endulzadoras y Estabilizadoras de Hidrocarburos Condensados. Cuya función es eliminar el ácido sulfhídrico y dióxido de carbono de la corriente líquida de

hidrocarburos, así como los componentes gaseosos contenidos en la misma. Los productos finales de esta planta, son el gas ácido y líquidos estabilizados.

- 2) Plantas Endulzadoras de Gas y Recuperación de Azufre. Cuya función es procesar mediante endulzamiento gases amargos. Los productos finales de esta planta son gas dulce a partir de gas amargo (con H_2S y CO_2) y azufre a partir de gas ácido.
- 3) Plantas Recuperadoras de Etano y Licuables. Cuya función es recuperar etano y licuables a partir del gas natural, el cual fue previamente endulzado.
- 4) Planta Tratadoras y Fraccionadoras de Hidrocarburos. Cuya función es fraccionar las corrientes de hidrocarburos licuables provenientes de las Plantas de Etano y Licuables y de las Plantas Endulzadoras del mismo Complejo

6.2.1 Uso de Agua en el Complejo

El complejo es abastecido por una mezcla 40% agua de Pozo y 60% de agua de río. Los pozos se encuentran localizados a un radio no mayor de 5 km y suministran, en promedio 1,685.2 m³/hr (1,685.2 ton/hr) de agua al complejo. El agua alimentada pasa por dos clarifloculadores (pretratamiento) donde se eliminan sólidos suspendidos, turbidez y materia orgánica presentes en el agua cruda. El efluente de los clarifloculadores es enviado a un sistema de deshidratación para la eliminación de los sólidos en suspensión.

Una parte del agua clarificada es tratada en unidades de desmineralización (UDA) para producir agua desmineralizada, utilizada para generar vapor en el área de calderas. Para la generación de vapor se cuenta con calderas de alta, media y baja presión en donde los condensados son retornados nuevamente al sistema de generación de vapor, aunque también se presentan pérdidas de vapor. Asimismo las calderas cuentan con un sistema de purgas para evitar un aumento en la concentración de contaminantes y mantener la calidad de agua requerida por los procesos.

El efluente de la unidad de desmineralización esta constituido por retrolavados, regeneración y enjuagues de la unidades de intercambio iónico.

Para el servicio de enfriamiento se cuentan con torres de enfriamiento donde se maneja la mayor parte del agua alimentada al complejo y también es el equipo donde se presentan las mayores pérdidas de agua irre recuperables. Aquí la evaporación de agua representa el 88% del total de agua de repuesto alimentada a las torres de enfriamiento, mientras que las purgas representan el 12%. En las torres de enfriamiento se adicionan sustancias químicas, tales como agentes desincrustantes, biocidas, dispersantes, secuestrantes y precipitantes, que también salen en las purgas y que son sustancias que pueden limitar el re-uso de agua.

Otra parte del agua se usa para los servicios de agua contra incendio, agua de servicio a plantas, agua a edificios y agua para retrolavado de filtros. El agua contra incendio se incluyo en el estudio debido a que actualmente esta agua es utilizada para servicios de lavado y riego que presenta un consumo continuo de ésta.

La descarga de efluentes, antes de enviarla tanto a río como laguna, pasa por un sistema de tratamiento de efluente existente en el complejo, formado por una planta de oxidación de aguas amargas, planta de tratamiento de aguas aceitosas y finalmente por lagunas de estabilización. El diagrama de distribución, consumo y descarga de agua se muestra en la figura 6.2.

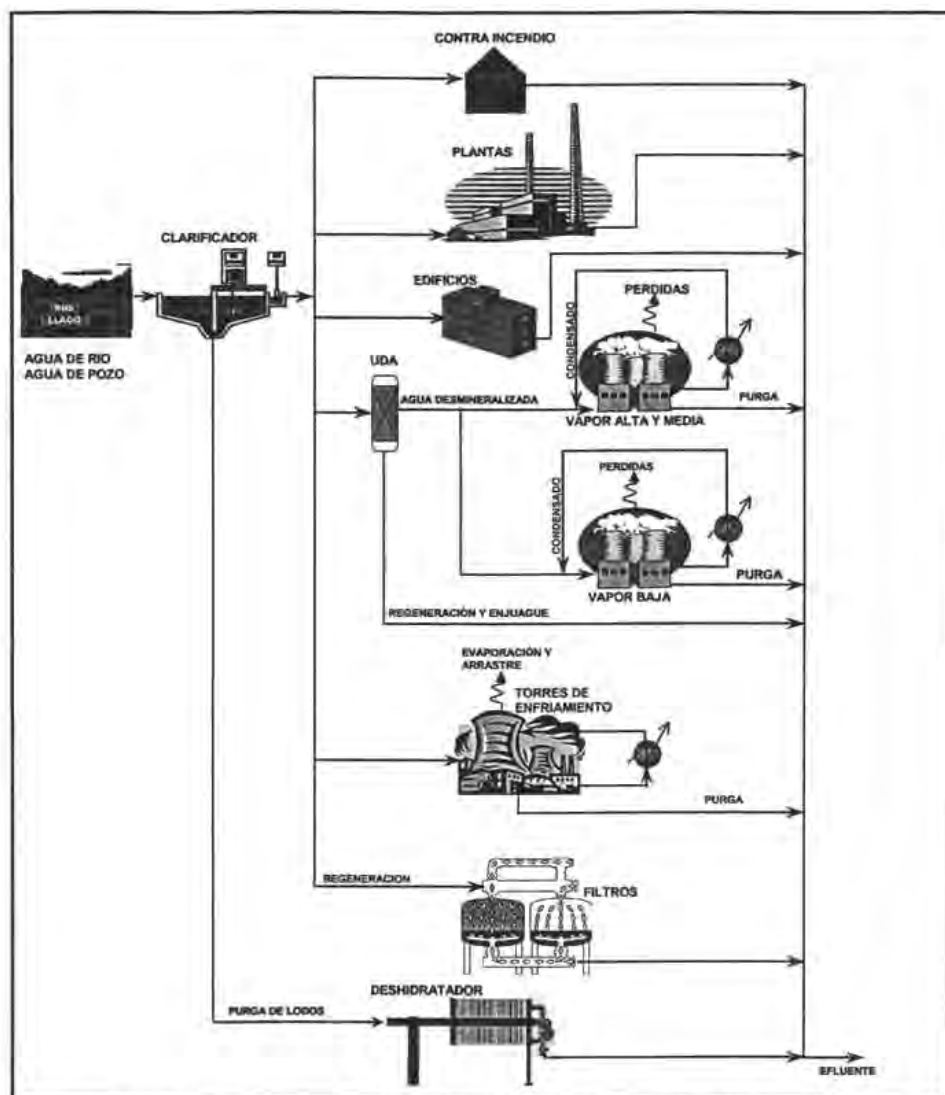


Figura 6.2. Diagrama de Distribución actual del agua en el Complejo

El diagrama de distribución de agua de la figura 6.2 se presenta como diagrama de flujo en la figura 6.3 donde se indican los flujos actuales. En este esquema se pueden identificar aquellos procesos denominados "usuarios" de agua, así como las corrientes que se alimentan y descargan de éstos. Los usuarios son: torres de enfriamiento, unidades desmineralizadoras (UDA), red contraincendio, plantas y servicios administrativos. Los flujos de las corrientes indican el requerimiento total de cada consumidor de agua, sin importar el origen de ella. Para determinar el consumo se considera el flujo total alimentado a cada usuario, sin importar si proviene de una corriente de recirculación.

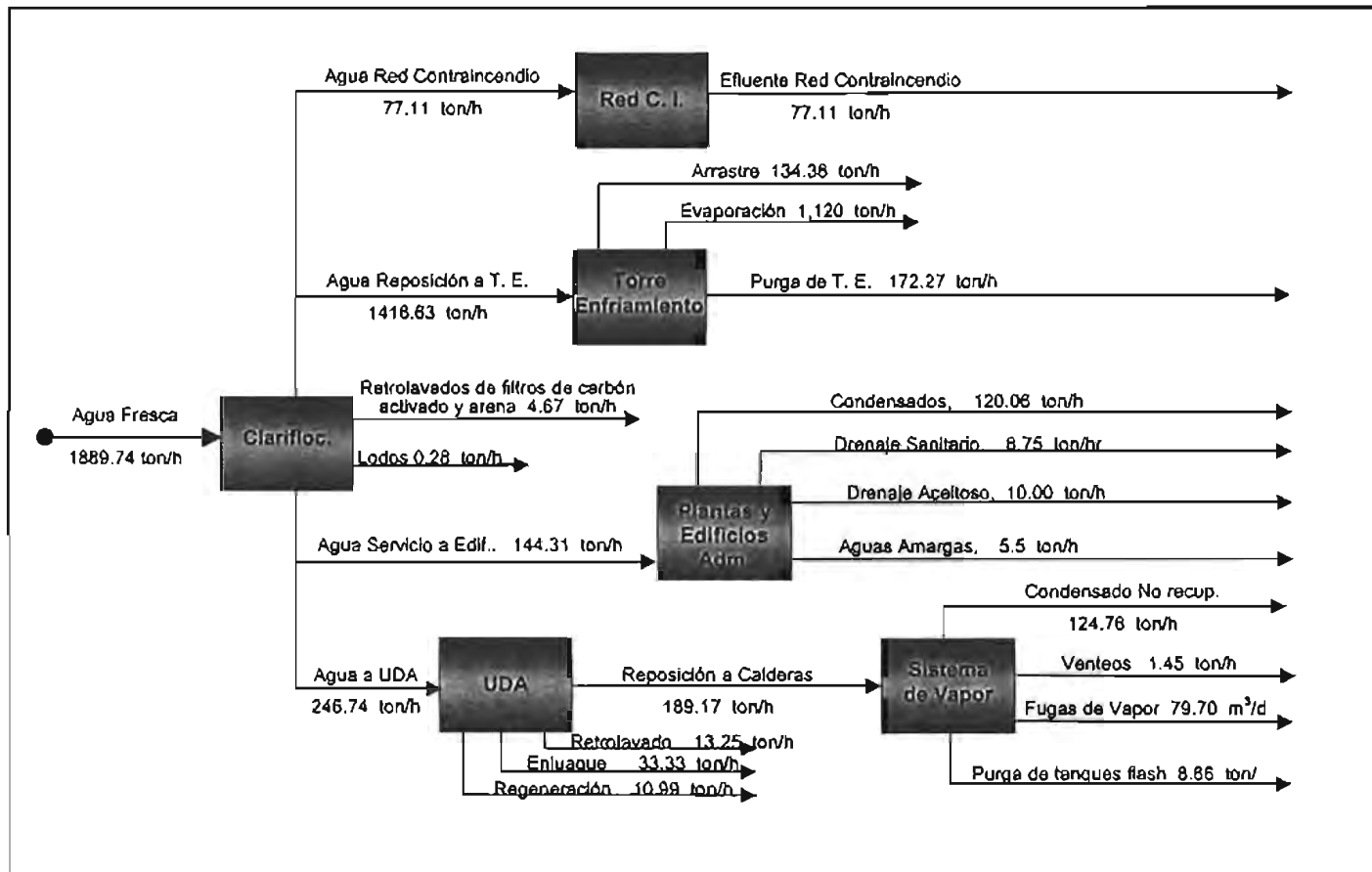


Figura 6.3 Diagrama de Flujo de la demanda de agua actual en el Complejo

Cada usuario puede presentar una ganancia, pérdida de agua o puede no presentar un cambio en el flujo de alimentación, y para esta última pueden presentarse dos casos: corrientes que se contaminan y corrientes que no se contaminan por el usuario por consiguiente se presentan los siguientes casos:

Pérdidas de agua en el proceso. Para las torres de enfriamiento, se identifican dos corrientes que se pierden, la evaporación que por el proceso de enfriamiento se produce y el arrastre de agua líquida. Estas dos corrientes no se pueden recuperar en el proceso por que se disipan a la atmósfera. Otra parte del agua se pierde en el sistema de vapor en los venteos del deaerador y las pérdidas en trampas de vapor.

Ganancia de agua en el proceso. Para el caso de estudio no se presentan ganancias de agua.

Corrientes que son contaminadas por el usuario, sin presentar variación de flujo. Son consideradas dentro de esta clasificación las purgas de las calderas, purgas de los clarifloculadores, las purgas de las unidades desmineralizadoras y las purgas de los filtros de carbón activado y arena. Para las purgas de los clarifloculadores se considera que previamente se han separado los lodos suspendidos. En el caso de los efluentes de las UDA, es necesario señalar que existen diferentes tipos de purga: la de retrolavado, la de regeneración y las de enjuague, además del retrolavado de los filtros de carbón activado.

Corrientes que NO son contaminadas por el usuario, sin presentar variación de flujo. En el caso del Complejo se identifican en esta categoría a el agua contra-incendio y al agua requerida para edificios. El agua contra incendio se incluyó en el estudio debido a que actualmente esta agua es utilizada para servicios de lavado y riego que presenta un consumo continuo de ésta.

Cada corriente está asociada a un usuario y a una fuente de agua basada en la calidad demandada por el usuario, a pesar que exista una sola alimentación general al complejo. La fuente de agua establece la concentración de entrada del contaminante y el usuario establece la concentración de salida.

La diferencia en las calidades de agua manejadas en el Complejo implica clasificar las fuentes de agua en base a la calidad demandada por los usuarios tal como se indica en la figura 6.4.

Los consumidores de agua del Complejo se agruparon en las dos categorías indicadas en la figura 6.4, de la siguiente manera:

- *Operaciones que presentan especificaciones estrictas.* En este rubro se ubicaron a las torres de enfriamiento, la UDA, el sistema de vapor y el agua de servicio suministrada a las plantas y servicios administrativos. Se consideró también como un consumidor de agua el sistema de vapor y en este caso el agua de suministro debe ser agua desmineralizada, lo que trae como consecuencia que en el análisis ésta se deba estudiar como una fuente de suministro de agua. De este

modo para el análisis pinch se manejaran tres fuentes de agua: de río, de pozo y desmineralizada.

- *Operaciones con especificaciones flexibles.* El agua de suministro para este tipo de operaciones no requiere de especificaciones muy estrictas. En esta categoría se ubicó al agua de la red contraincendio.

Las características del agua suministrada a los diferentes usuarios deben ser deben satisfacerse con el agua cruda (río o pozo) o agua desmineralizada, según sea el caso, con excepción de la alimentación a la Red Contra incendio ya que para esta corriente se puede permitir que se suministre agua con una calidad menor a la del agua cruda. Lo anterior implica que la concentración de contaminante que se utilice en el análisis pueda ser mayor o igual que la correspondiente al agua cruda.

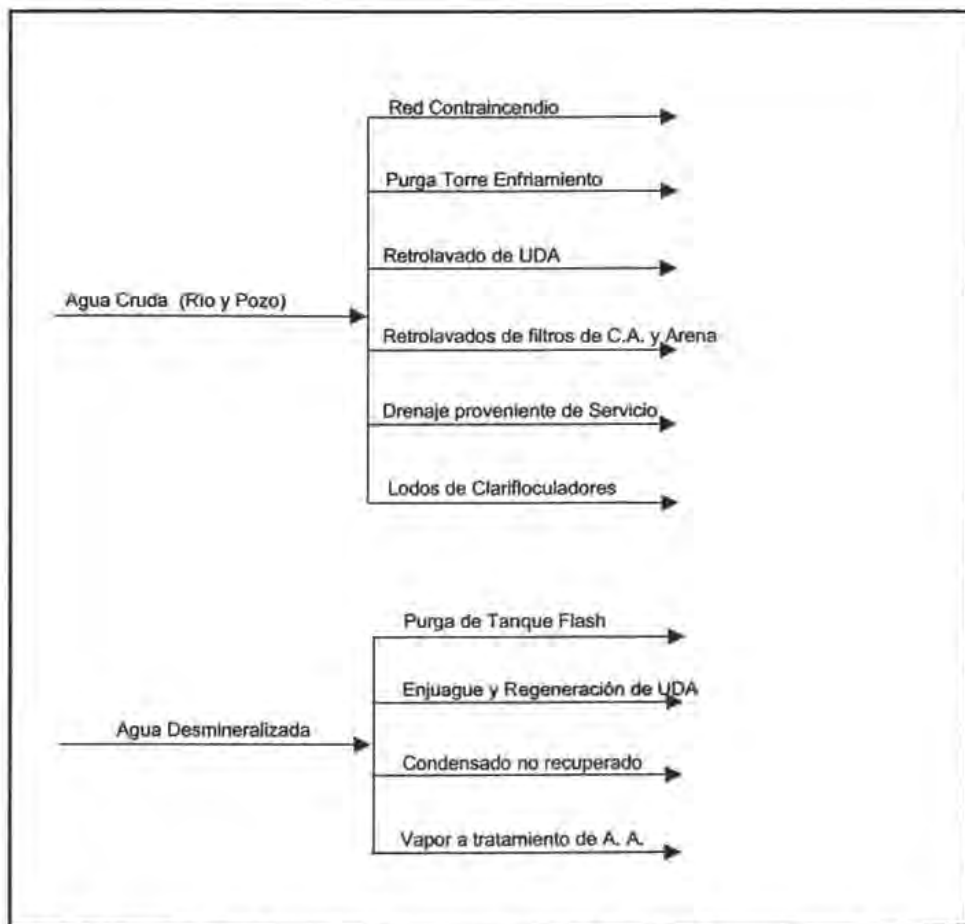


Figura 6.4 Clasificación de las operaciones por calidad de agua demandada

Con el fin de simplificar el diagrama de distribución de agua actual, en las figura 6.2 y 6.3 se omitieron ciertas recirculaciones de agua proveniente principalmente del sistema de tratamiento de agua residual, por lo cual los datos de concentración reales a la entrada de cada operación, presentados en el caso de estudio, resultan mayores a la del agua fresca. Sin embargo los datos usados para el caso de estudio representan los valores reales actuales con los cuales esta operando el complejo.

6.3 Aplicación de la Tecnología Pinch al Caso de Estudio

6.3.1 Determinación del Objetivo del estudio

Obtener un arreglo entre las operaciones que usan agua del complejo que permitan re-usar el agua entre estas misma operaciones y reducir el consumo de agua cruda y la generación de agua residual, considerando las operaciones y sistemas de tratamiento actualmente en operación, evitando en lo posible la integración de sistemas de tratamiento nuevos.

6.3.2 Desarrollo del Balance de Materia

Frecuentemente las plantas de proceso no cuentan entre su información con un balance de agua donde se muestren las características de agua necesarias para iniciar un programa de re-uso. En el caso de estudio no fue la excepción, por lo cual fue necesario recopilar la información necesaria para desarrollar el balance de materia.

6.3.2.1 Recopilación de Información

Para estructurar el balance se identificaron los sistemas de manejo, tratamiento y uso actual de agua en el Complejo; los cuales en términos generales son los siguientes:

- Suministro de agua cruda
- Pretratamiento de agua cruda
- Red contra incendio
- Unidades desmineralizadoras
- Generación de vapor
- Torres de enfriamiento de agua
- Arreglo de la red de drenajes
- Generación y tratamiento de efluentes

Posteriormente se definió y recopiló la información requerida para determinar las características de agua con las que esta operando actualmente y con los requerimientos que debe cumplir, la cual se puede clasificar en tres tipos:

- a) Normas y especificaciones para:
 - Torres de Enfriamiento
 - Uso de agua en calderas

- Descarga de efluentes a cuerpos receptores
 - Reuso de agua,
- b) Información de diseño:
- Dibujos mecánicos
 - Diagramas de tubería e instrumentación
 - Diagrama de flujo de proceso
 - Hojas de datos de equipos
 - Planos de la red de drenajes
- c) Información de condiciones de operación actuales.
- Datos históricos de flujos y caracterizaciones de las corrientes de alimentación y descarga del Complejo
 - Recorridos y levantamientos en campo.

Una vez integrada y analizada la información disponible en el Complejo, se identificó la información adicional requerida para efectuar este estudio, por lo que se requirieron las siguientes actividades:

- Campañas de muestreo y caracterización del agua, previo análisis de todas las corrientes críticas que impactan para el re-uso de agua en el complejo.
- Revisión de la infraestructura hidráulica para analizar la posible recuperación y reuso de agua, esto es, del sistema general e individual de los drenajes que componen el complejo.
- Evaluación en campo de los sistemas de: Pretratamiento de agua cruda, unidades desmineralizadoras, torres de enfriamiento, planta de tratamiento de aguas amargas y sistema de tratamiento de efluentes para identificar áreas de oportunidad y así mejorar la operación de los sistemas en relación con:
 - a) Condiciones de operación vs. condiciones de diseño
 - b) Estado actual y mantenimiento de los equipos y/o rehabilitación
 - c) Instrumentación

6.3.2.2 *Procesamiento y análisis de la información*

Posteriormente, se procedió a efectuar un procesamiento y análisis de la información obtenida, empleando para esto técnicas estadísticas y en aquellos casos donde no se dispuso de información suficiente, se aplicaron reglas heurísticas y conceptos termodinámicos; con lo que fue posible generar el diagrama de flujo de proceso.

6.3.2.3 *Desarrollo del balance de agua*

Con todo lo anterior se desarrolló el balance de agua del complejo, el cual permitió identificar los siguientes aspectos:

- Principales consumidores de agua
- Efluentes no recuperables: evaporación y arrastre
- Principales aportadores de agua residual
- Eficiencia actual de las operaciones que usan agua
- Calidad de los efluentes
- Naturaleza de los lodos producidos
- Cumplimiento con normatividad

El balance de agua para las operaciones del complejo se presentó en la figura 6.3, sin embargo para fines de aplicación del análisis pinch y considerando las fuentes de agua disponibles, este diagrama se simplificó para en análisis y se muestra como un diagrama de flujo convencional en la figura 6.5.

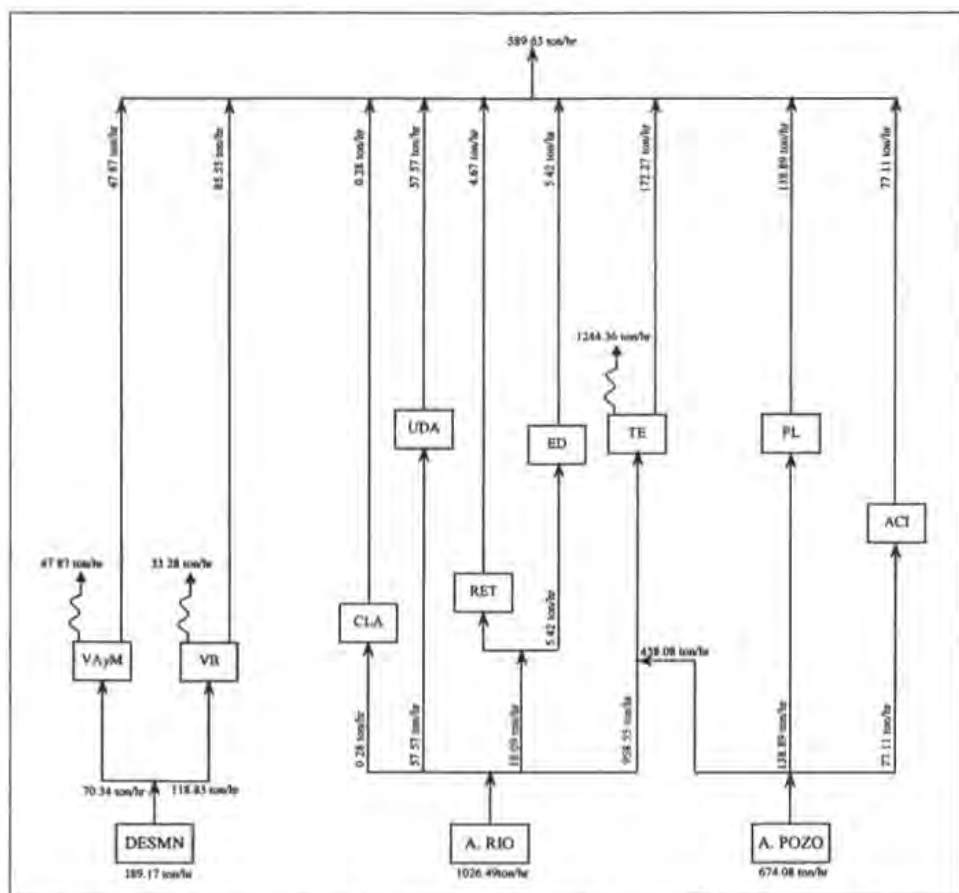


Figura 6.5 Balance de Agua simplificado del Complejo (Situación Actual)

6.3.3 Extracción de datos de proceso

En base al análisis del balance y de las restricciones de las operaciones se determinó, junto con el personal del complejo, hacer el análisis considerando al contaminante crítico. Un usuario de agua tiene un contaminante crítico diferente al resto de los usuarios lo cual obligaría a emplear el método multi-contaminante. Sin embargo, se puede elegir un contaminante que pueda involucrar a otros contaminantes implícitamente. Después de un análisis de los diferentes contaminantes presentes en el agua, se determinó que los sólidos disueltos totales (TDS) es el contaminante crítico y que limita el reuso de agua. Lo anterior debido a que engloba diversos contaminantes (tales como calcio, magnesio) y además, es un parámetro que se relaciona con la conductividad eléctrica la cual normalmente se usa para controlar purgas de equipo. Otra punto importante para considerar los TDS como el contaminante crítico, es que existe en el mercado la instrumentación analítica que permite medir este parámetro.

Una vez determinado al contaminante crítico, en la tabla 6.1 se presenta la calidad de las fuentes de agua respecto a la TDS.

Tabla 6.1 Calidad de las Fuentes de Agua Disponibles en el Complejo respecto a la TDS

Fuente de Agua	Concentración de contaminante (TDS) ppm
Agua Desmineralizada (A. DESMN)	2
Agua de Río (A. RIO)	266
Agua de Pozo (A. POZO)	350

Normalmente, el costo aumenta en la medida que se desea obtener agua de mayor calidad, por lo que es necesario usar la menor cantidad del agua de mayor pureza. Para el caso de estudio el costo mayor lo tiene el agua desmineralizada. Aunque el agua de río es la segunda fuente de agua con mejor calidad, el agua de pozo presenta mayores costos para extraerla, por lo cual se considera al agua de pozo como la segunda opción para reducir el consumo de agua. Por último, el agua de río es la más barata entre las fuentes disponibles y se considera como la tercera opción en la reducción en el consumo de agua cruda.

Una vez definido el contaminante crítico y conociendo las fuentes de agua disponibles, entonces se hizo la extracción de los datos del balance de materia los cuales se indican en la tabla 6.2, donde se incluyen los flujos de entrada y salida y las concentraciones de TDS de entrada y salida de cada operación. Con el flujo y las concentraciones, se calculó la masa intercambiada en cada una de las operaciones y con ello se identificaron las operaciones críticas y las que presentan la mayor carga de contaminante intercambiada, cuyas descargas normalmente son enviadas a tratamiento ya que no pueden ser reusadas.

Tabla 6.2 Datos de Proceso del Complejo

Operación	Flujo Entrada (ton/hr)	Flujo Salida (ton/hr)	C _{ent} (ppm)	C _{sal} (ppm)	Δm (Kg/hr)
Plantas (PL)	138.89	138.89	36.00	88.00	7.2222
Edificios (ED)	5.42	5.42	310.00	310.00	0.0000
Sist Vapor Alta y Media (VAyM)	70.34	47.87	2.70	1000.00	47.7422
Sist Vapor Baja (VB)	118.84	85.55	1.60	351.00	29.8923
Torres de Enfriamiento (TE)	1,416.63	172.27	310.00	1,397.00	187.2575
Agua Contra Incendio (ACI)	77.11	77.11	1,324.00	1,324.00	0.0000
Retrolavado (RET)	4.67	4.67	310.00	310.00	0.0000
UDA (UDA)	57.57	57.57	310.00	6,815.00	374.4922
Clarificador-Deshidratador (CLA)	0.28	0.28	300.00	310.00	0.0028
Total (t/h)	1,889.73	589.63	-	-	-
Total (m3/d)	45,353.53	14,151.01	-	-	-

Cada una de las operaciones indicadas en la tabla 6.2 requieren de un flujo de agua fijo, independientemente de las concentraciones de entrada y salida. Como se puede observar en la tabla, existen tres operaciones o aplicaciones donde no se presenta transferencia de masa alguna: edificios, agua contra incendio y el retrolavado de filtros, que a pesar de esto deben ser consideradas en el estudio ya que demandan agua. Asimismo se puede observar que el sistema de vapor de alta, media y baja son las operaciones que requieren agua con mayor calidad, esto es de agua desmineralizada. El resto de de las operaciones pueden satisfacer sus requerimientos con agua de río o de pozo. También se puede apreciar que existen tres operaciones que presentan pérdidas de agua: el sistema de vapor de alta y media, el sistema de vapor de baja presión y las torres de enfriamiento.

La tabla 6.3 muestra una representación alterna de la tabla 6.2, donde se identificaron las corrientes que presentan un cambio de flujo (pérdidas de agua): sistema de vapor de alta y media, sistema de vapor de baja y torres de enfriamiento. Donde se presenta el cambio de flujo el suministro y descarga de agua se dividió en dos partes; la primera representa el flujo de la operación que no tiene cambios y la segunda parte representa la pérdida de agua.

Tabla 6.3 Representación alterna de los datos de la tabla 6.2

Operación	Flujo Entrada (ton/hr)	Flujo Salida (ton/hr)	C _{ent} (ppm)	C _{sal} (ppm)	Δm (Kg/hr)
Plantas (PL)	138.89	138.89	36.00	88.00	7.2222
Edificios (ED)	5.42	5.42	310.00	310.00	0.0000
Sist Vapor Alta y Media I (VAyMI)	47.87	47.87	2.70	1000.00	47.7422
Sist Vapor Alta y Media II (VAyMII)	22.47	-	2.70	-	-
Sist Vapor Baja I (VBI)	85.55	85.55	1.60	351.00	29.8923
Sist Vapor Baja II (VBII)	33.28	-	1.60	-	-
Torre de Enfriamiento I (TEI)	172.27	172.27	310.00	1,397.00	187.2575
Torre de Enfriamiento II (TEII)	1,244.36	-	310.00	-	-
Agua Contra Incendio (ACI)	77.11	77.11	1,324.00	1,324.00	0.0000
Retrolavado (RET)	4.67	4.67	310.00	310.00	0.0000
UDA (UDA)	57.57	57.57	310.00	6,815.00	374.4922
Clarificador (CLA)	0.28	0.28	300.00	310.00	0.0028
Total (t/h)	1,889.73	589.63	-	-	-
Total (m3/d)	45,353.53	14,151.01	-	-	-

La representación alterna de la tabla no cambia el resultado del análisis ni la aplicación del método pinch de agua.

El siguiente paso en el análisis, es definir las concentraciones de entrada y salida máximas permitidas y que éstas no alteren o afecten la operación. Para definir éstas, se tomaron en cuenta factores heurísticos, limitaciones de corrosión, ensuciamiento, incrustación, solubilidad y de seguridad. El tener una concentración de entrada máxima permisible es esencial para permitir el reuso de agua y para el caso de estudio se consideró que no existe una variación en la carga másica debido al aumento de la concentración de entrada. La tabla 6.4 muestra las concentraciones máximas permisibles para cada una de las operaciones. La concentración máxima de salida se ha ajustado para mantener constante la carga másica transferida.

Tabla 6.4 Definición de concentraciones máximas permisibles

Operación	Flujo Entrada (ton/hr)	Flujo Salida (ton/hr)	C _{ent} (ppm)	C _{sal} (ppm)	Δm (Kg/hr)
Plantas (PL)	138.89	138.89	350.00	402.00	7.2222
Edificios (ED)	5.42	5.42	310.00	310.00	0.0000
Sist Vapor Alta y Media I (VAyMI)	47.87	47.87	2.70	1,000.00	47.7422
Sist Vapor Baja I (VBI)	85.55	85.55	12.00	361.40	29.8923
TE I (TEI)	172.27	172.27	270.00	1,357.00	187.2575
ACI (ACI)	77.11	77.11	450.00	450.00	0.0000
Retrolavado (RET)	4.67	4.67	310.00	310.00	0.0000
UDA (UDA)	57.57	57.57	310.00	6,815.00	374.4922
Clarificador (CLA)	0.28	0.28	300.00	310.00	0.0028
Total (t/h)	1,889.74	589.63	-	-	-
Total (m3/d)	45,353.53	14,151.01	-	-	-

6.3.4 Aplicación de las Técnicas de Integración de Procesos

A los datos de la tabla 6.4 se le aplicaran las técnicas del pinch de agua. Primero se construyó el diagrama de intervalo de concentraciones el cual se muestra en la figura 6.6

La figura 6.7 muestra la curva compuesta limitante del complejo construida a partir de los datos de diagrama de intervalo de concentraciones de la figura 6.6, en la cual no se muestran los cambios de flujo (perdidas de agua del sistema de vapor de alta y media, sistema de vapor de baja y torres de enfriamiento). También se muestra una línea de suministro de agua considerando únicamente el suministro de agua desmineralizada, resultando un flujo de 293.15 ton/hr.

Concentr. (ppm)	PL (ton/hr)	ED (ton/hr)	VAYMI (ton/hr)	VBI (ton/hr)	TEI (ton/hr)	ACI (ton/hr)	RET (ton/hr)	UDA (ton/hr)	CLA (ton/hr)	Carga Mésica (kg/hr)	Carga Mésica Acumulada (kg/hr)	Flujo Agua (ton/hr)
0	138.89	5.42	47.87	85.55	172.27	77.11	4.87	57.57	0.28		0.0000	0.00
2.00										0.0000	0.0000	0.00
2.70										0.0000	0.0000	0.00
12.00										0.4450	0.4450	37.08
266										33.8900	34.3349	129.08
270.00										0.5337	34.8686	129.14
300.00										9.1709	44.0395	146.80
310.00										3.0597	47.0992	151.83
350										14.9341	62.0333	177.24
381.40										5.7245	67.7578	187.49
402.00										18.9139	84.6717	210.83
450										13.3302	98.0019	217.78
1000.00										195.1508	293.1527	293.15
1357.00										82.0528	375.2055	276.50
6815.00										314.2166	689.4221	101.16

Figura 6.6 Diagrama de Intervalo de Concentraciones para los datos del Complejo

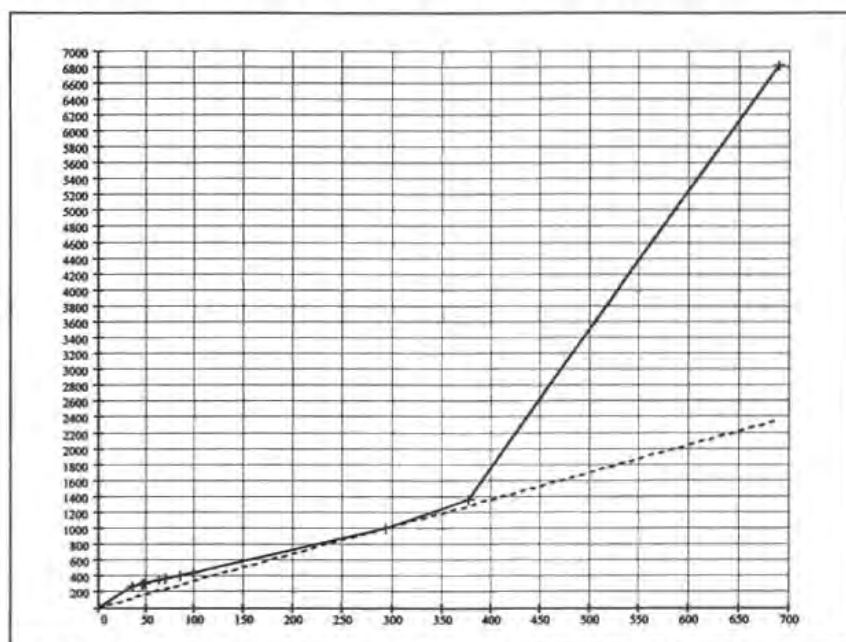


Figura 6.7 Curva compuesta Limitante y Curva de Agua (considerando solo agua desmineralizada) sin considerar cambios de flujo para los datos del Complejo

Como se puede observar, tanto en la figura 6.6 como en la figura 6.7, si se considera únicamente el suministro de agua desmineralizada, el punto pinch se encuentra a 1000 ppm. Sin embargo, en el caso de que se usara este tipo de agua, el costo para obtenerla resulta alto, por lo tanto para satisfacer los requerimientos del proceso se deben considerar las dos fuentes disponibles de suministro de agua (agua de río y de pozo) que presentan un costo menor.

Para incluir el agua de río y el agua de pozo en el diagrama se debe construir una curva compuesta de suministro de agua, donde se incluya al agua desmineralizada, al agua de río y al agua de pozo. Los intervalos de concentraciones de la curva de agua serán de acuerdo a las concentraciones indicadas en la tabla 6.1, esto es:

Agua Desmineralizada:	2-266 ppm
Agua de Río:	266-350 ppm
Agua de Pozo:	350- ppm

Con estos intervalos de concentración, la línea de suministro de agua tendrá varios puntos pinch, al menos uno para cada fuente de agua. Haciendo esta consideración se construye la curva compuesta de agua tal y como se indica en la figura 6.8.

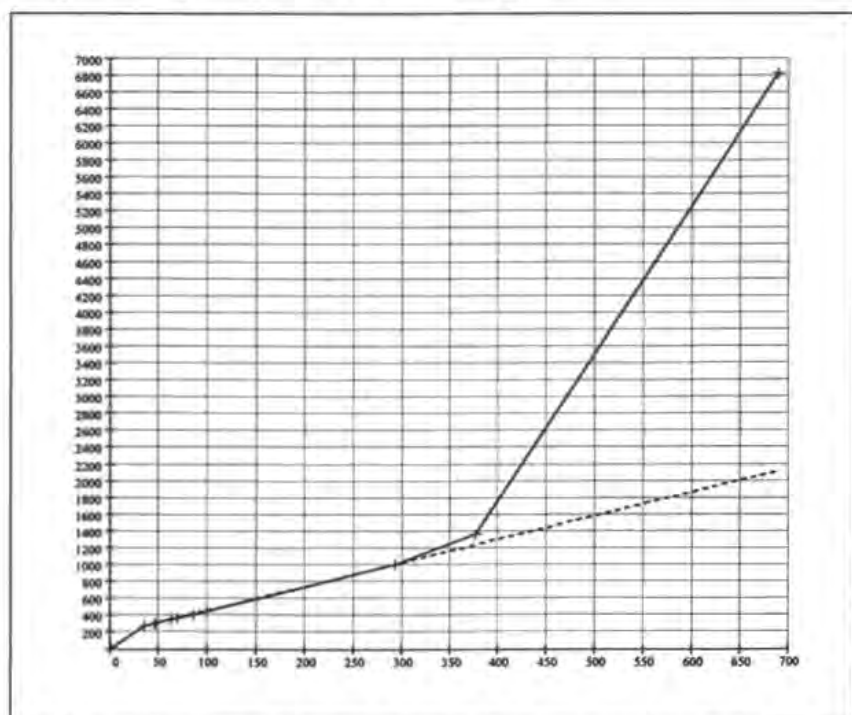


Figura 6.8 Curva compuesta Limitante y Curva de Agua considerando las tres fuentes de agua: desmineralizada, de río y de pozo, sin cambios de flujo

La figura 6.8 muestra tanto la curva compuesta limitante de los datos del complejo como la curva limitante de agua considerando las tres fuentes de agua. Para la curva de agua el punto pinch de agua desmineralizada se encuentra a 266 ppm, para el agua de río se encuentra a 350 ppm y para el agua de pozo se encuentra a 1000 ppm, sin embargo ocurre una violación en el rango de 350 a 450 ppm tal y como se puede apreciar en el rango ampliado de la figura 6.9.

De este análisis se encuentra que los flujos para cada una de las fuentes de agua son:

Rango 2-266 ppm:	130.06 ton/hr (Agua Demineralizada)
Rango 266-350 ppm:	329.74 ton/hr (130.06 ton/hr de Agua Demineralizada + 199.69 ton/hr de Agua de Río)
Rango 350- ppm:	355.57 ton/hr (130.06 ton/hr de Agua Demineralizada + 199.69 ton/hr de Agua de Río+ 25.83 ton/hr de Agua de pozo) y se presenta violación de flujo

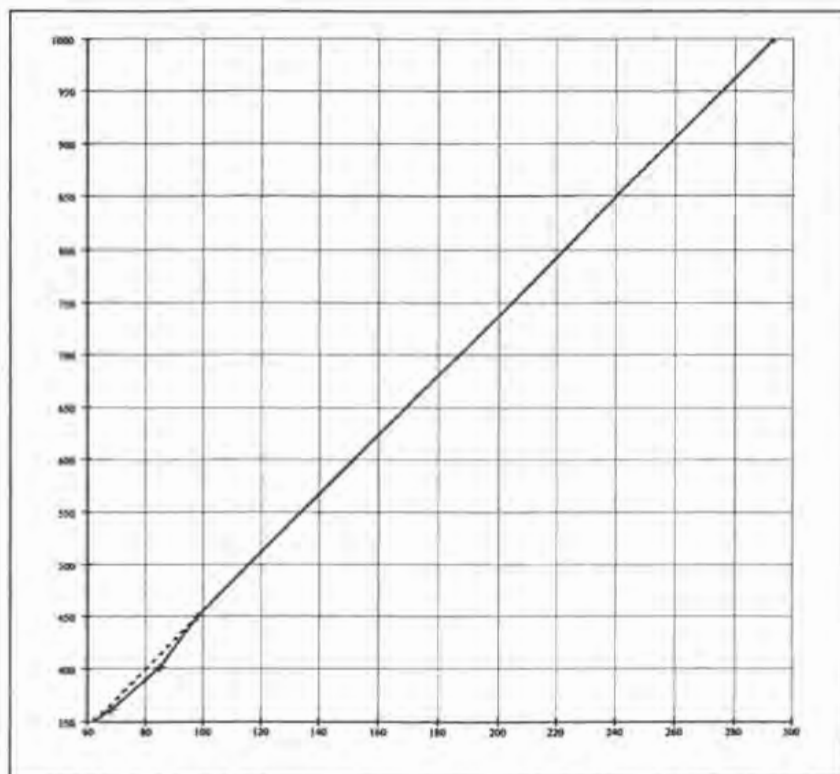


Figura 6.9 Violación de flujo para el agua de pozo (ampliación de la figura 6.8 en el rango de 350 a 1000 ppm) sin considerar cambios de flujo

Para evitar la violación que se presenta para el agua de pozo se debe incrementar el flujo, considerando el mismo del intervalo de 350 a 361.4 ppm. La figura 6.10 muestra el incremento para evitar la violación y se encuentra que el punto pinch del agua de pozo ahora es de 361.4 ppm. El incremento de flujo fue de 25.83 ton/hr a 172.41 ton/hr. En resumen los flujos manejados para cada fuente de agua (aun sin considerar cambios de flujo) quedan como sigue:

Rango 2-266 ppm:	130.06 ton/hr (Agua Demineralizada)
Rango 266-350 ppm:	329.74 ton/hr (130.06 ton/hr de Agua Demineralizada + 199.69 ton/hr de Agua de Río)
Rango 350- ppm:	502.15 ton/hr (130.06 ton/hr de Agua Demineralizada + 199.69 ton/hr de Agua de Río+ 172.41 ton/hr de Agua de pozo) incrementando flujo para evitar la violación

Para manejar estos flujos entre las operaciones del complejo, se puede requerir de reciclaje local para satisfacer las restricciones de flujo en cada una de ellas.

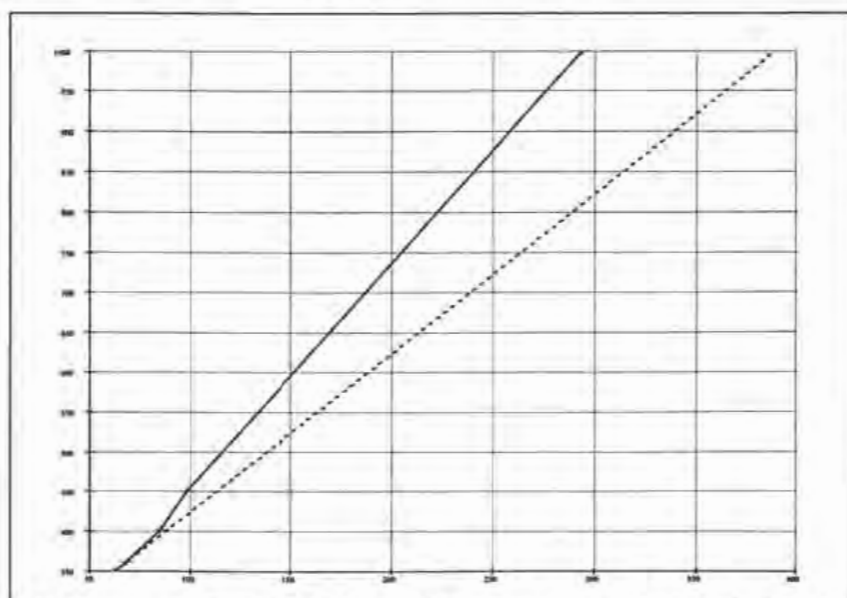


Figura 6.10 Incremento en el flujo de agua de pozo para evitar la violación (ampliación de la figura 6.8 en el rango de 350 a 1000 ppm) sin considerar cambios de flujo

La curva compuesta del sistema completo; esto es, de todos los datos del complejo, junto con la curva de agua de las tres fuentes de agua, se observa en la figura 6.11. En esta figura aun no se han incluido los cambios de flujo, esto es las pérdidas de agua del sistema de vapor de alta y media, el sistema de vapor de baja y las torres de enfriamiento.

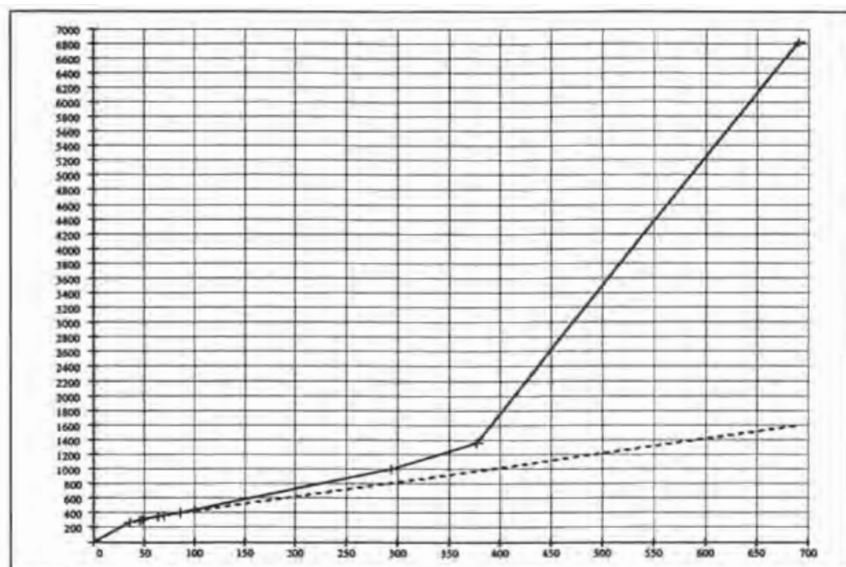


Figura 6.11 Curva compuesta incluyendo las tres fuentes de agua sin violación de flujo sin considerar cambios de flujo

La figura 6.12 muestra las pérdidas de 22.47 ton/hr del sistema de vapor de alta y media a 2.7 ppm y 33.28 ton/hr del sistema de vapor de baja a 12 ppm. Estas pérdidas de agua caen dentro del intervalo de suministro de agua desmineralizada. De este modo, el flujo mínimo en el intervalo de 2-266 ppm (agua desmineralizada) considerando pérdidas aumenta a 184.49 ton/hr.

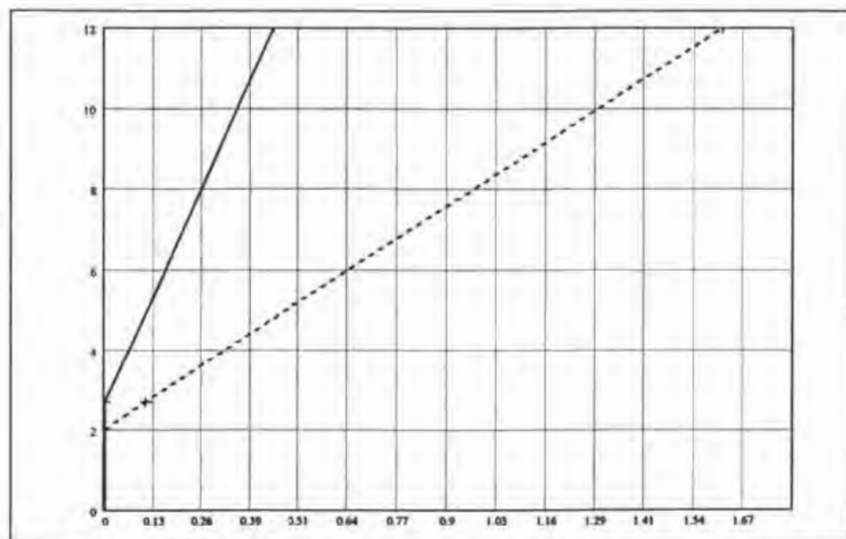


Figura 6.12 Pérdidas de agua a 2.7 y 12 ppm de los sistemas de vapor

La figura 6.13 muestra las pérdidas de 1244.36 ton/hr a 270 ppm correspondientes a las torres de enfriamiento. Estas pérdidas de agua caen dentro del intervalo de suministro del agua de río. De este modo, el flujo de agua en el rango de 266-350 ppm considerando pérdidas aumenta a 1514.84 ton/hr (184.49 – 22.47- 33.28 ton/hr de agua desmineralizada + 1386.10 ton/hr de agua de río).

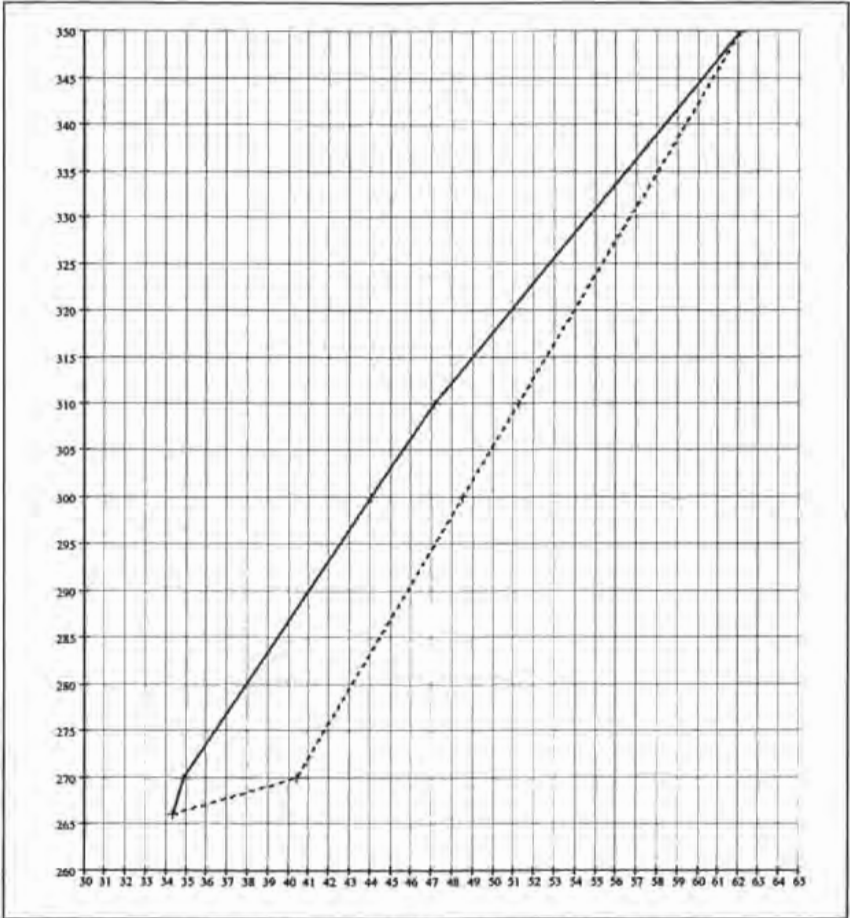


Figura 6.13 Pérdidas de agua a 270 ppm de las torres de enfriamiento

Para el caso de agua de pozo no se presentan cambios de flujo, por lo que el flujo total de agua se mantiene 502.15 ton/hr (184.49 – 22.47- 33.28 ton/hr de agua desmineralizada + 1386.10 – 1244.36 ton/hr de agua de río + 231.67 ton/hr de agua de pozo).

La figura 6.14 muestra la curva compuesta final con la línea de suministro de agua de las tres fuentes considerando pérdidas de agua a 2,7, 12 y 270 ppm.

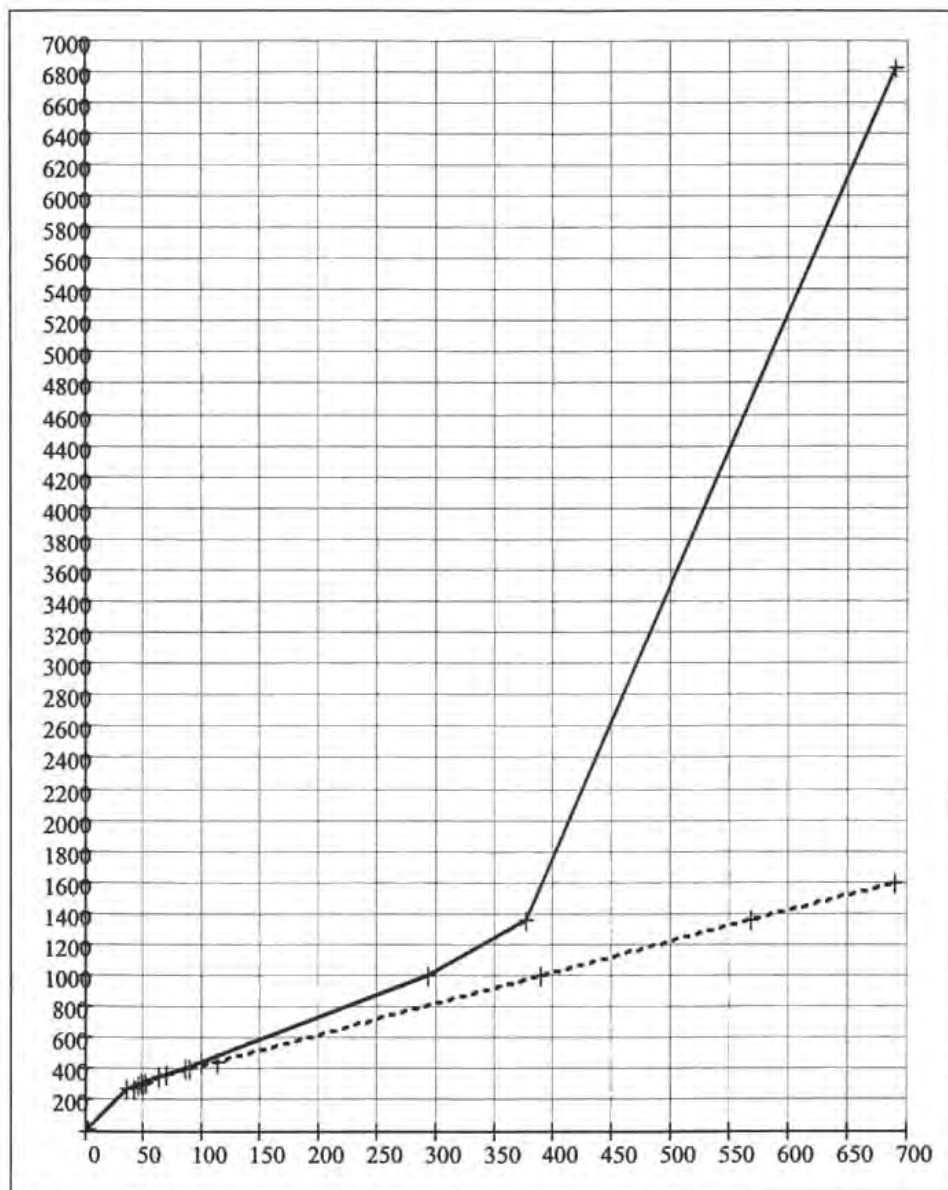


Figura 6.14 Curva compuesta y líneas de suministro de agua final, considerando cambios de flujo

La figura 6.15 muestra una ampliación en el rango de 2 a 270 ppm de la figura 6.14 para observar el comportamiento de la curva donde se presentan las pérdidas de agua.

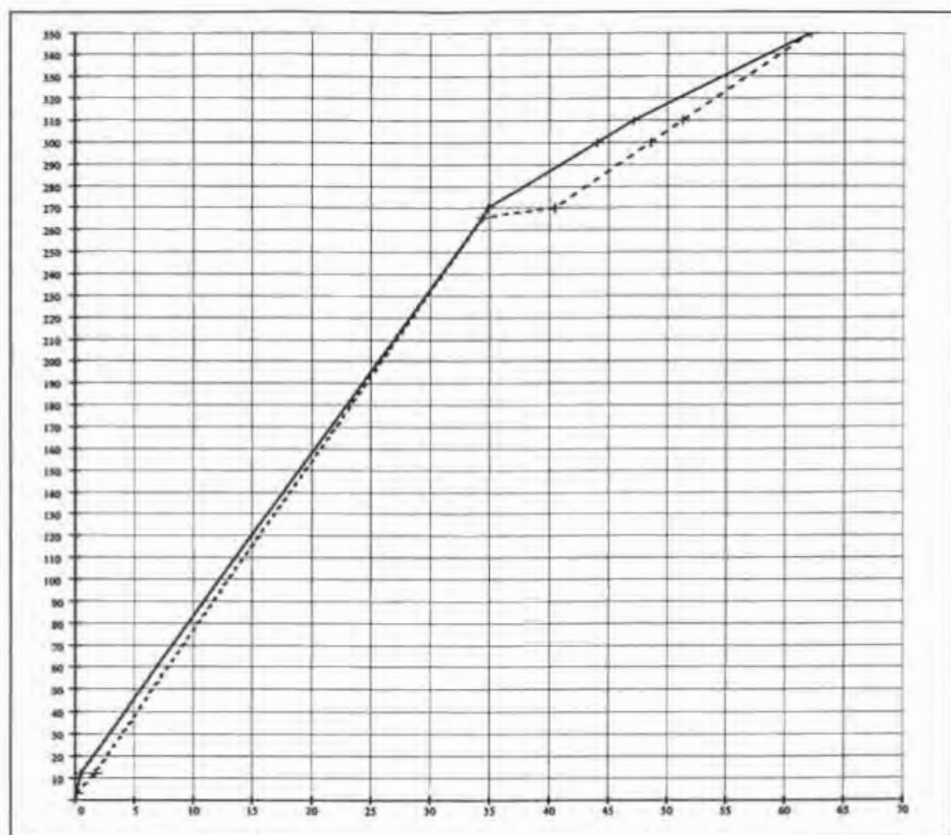


Figura 6.15 Ampliación de la figura 6.14 en el rango donde se presentan los cambios de flujo (de 2 a 350 ppm)

Al incluir los cambios (perdidas de agua), los flujos de cada fuente de agua resultan como se indica a continuación:

Rango 2-266 ppm:	184.49 ton/hr (Agua Demineralizada)
Rango 266-350 ppm	1514.84 ton/hr (184.49 – 22.47- 33.28 ton/hr de agua desmineralizada + 1386.10 ton/hr de agua de río)
Rango 350- ppm	502.15 ton/hr (184.49 – 22.47- 33.28 ton/hr de agua desmineralizada + 1386.10 – 1244.36 ton/hr de agua de río + 231.67 ton/hr de agua de pozo)

Para diseñar la red de agua preliminar que maneje estos flujos se usa el método del número mínimo de fuentes de agua (método 2). La figura 6.16 muestra el diseño inicial para manejar los flujos resultantes de la figura 6.14 usando el diagrama de mallas.

La figura 6.17 muestra el diseño inicial identificando los ciclos.

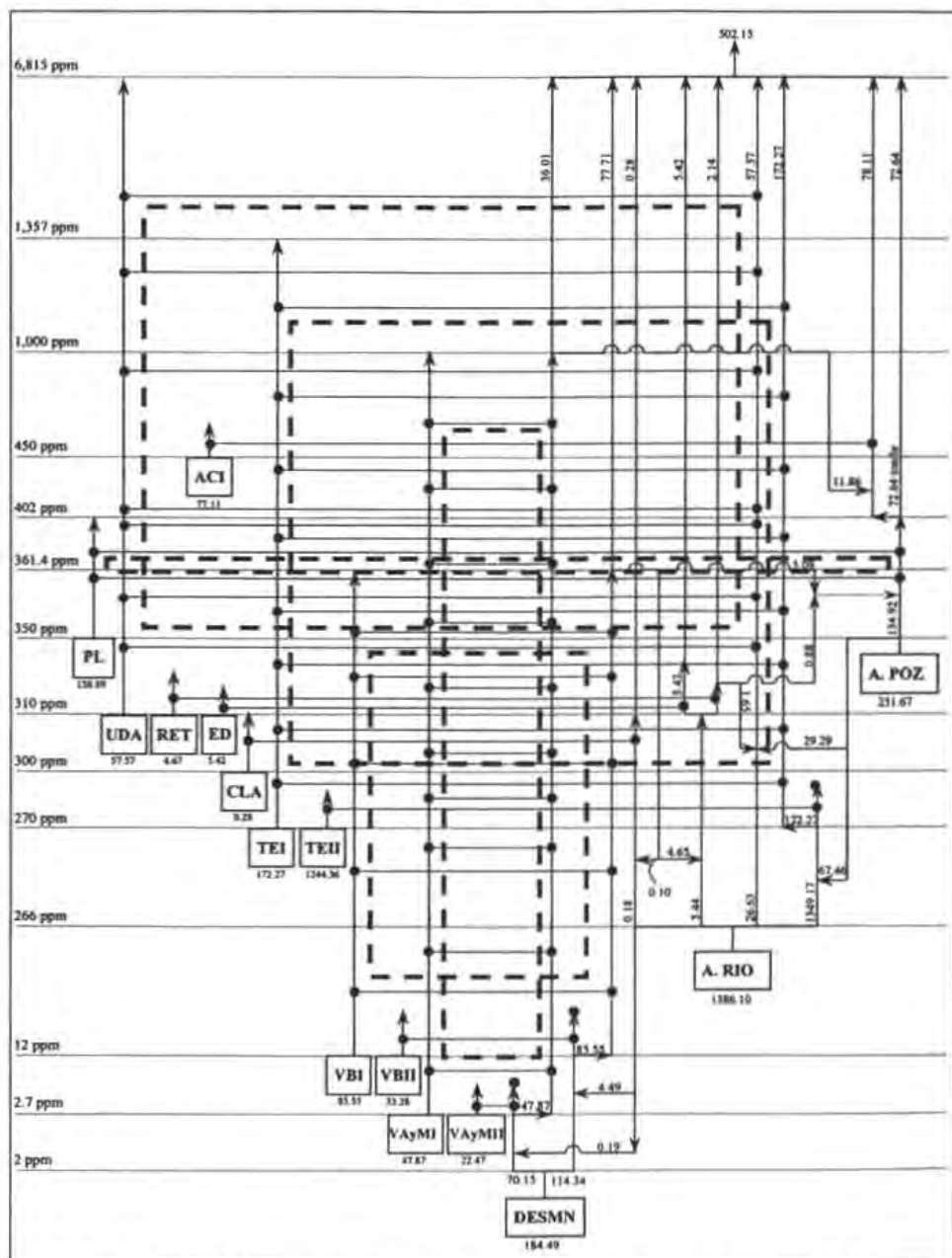


Figura 6.17 Identificación de los ciclos del diseño inicial de la figura 6.16

La figura 6.18 muestra la evolución del diseño cortando los ciclos.

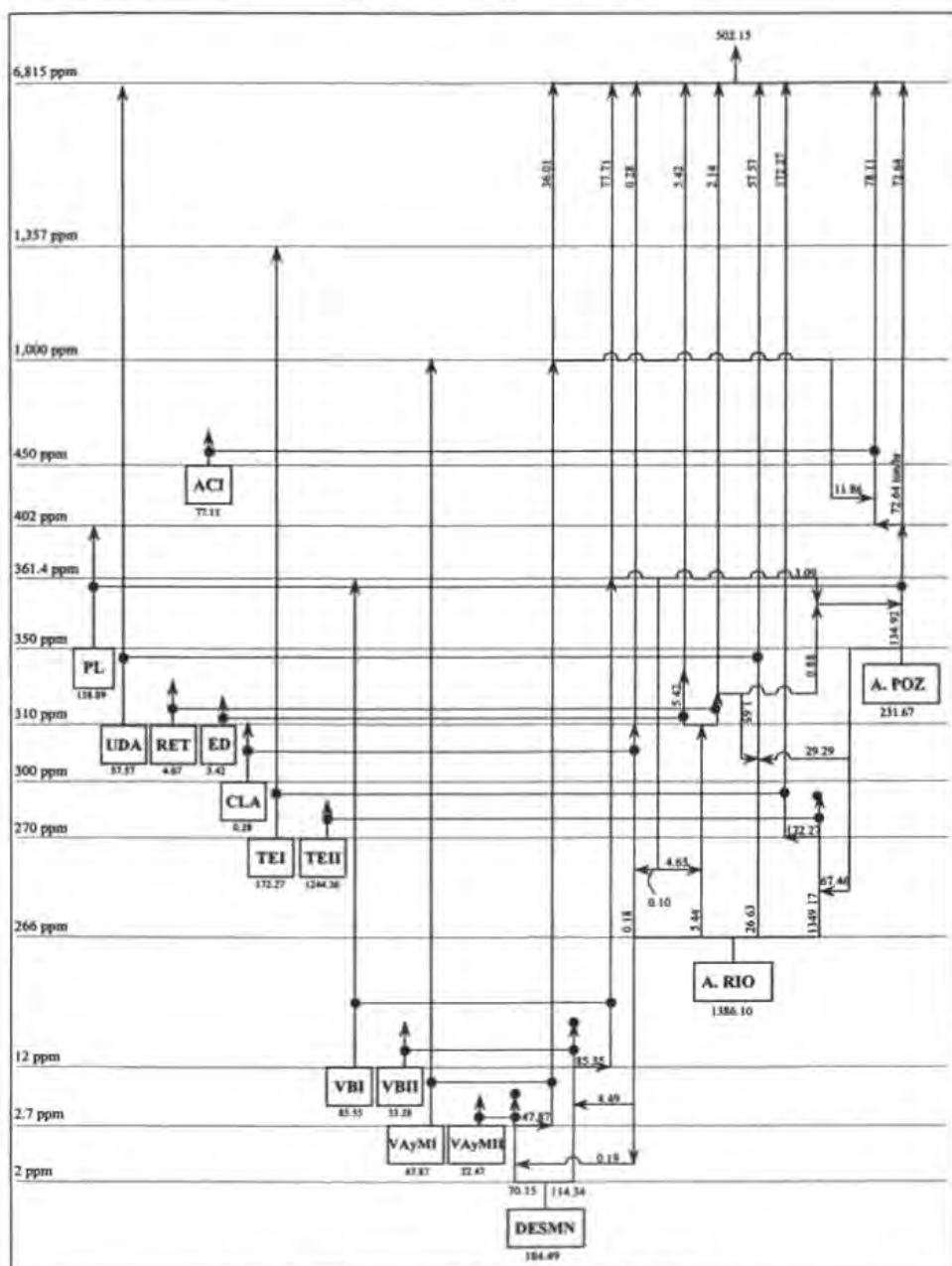


Figura 6.18 Diseño simplificado cortando los ciclos

El diagrama de flujo final basado en el diagrama de mallas de la figura 6.18 se muestra en la figura 6.19.

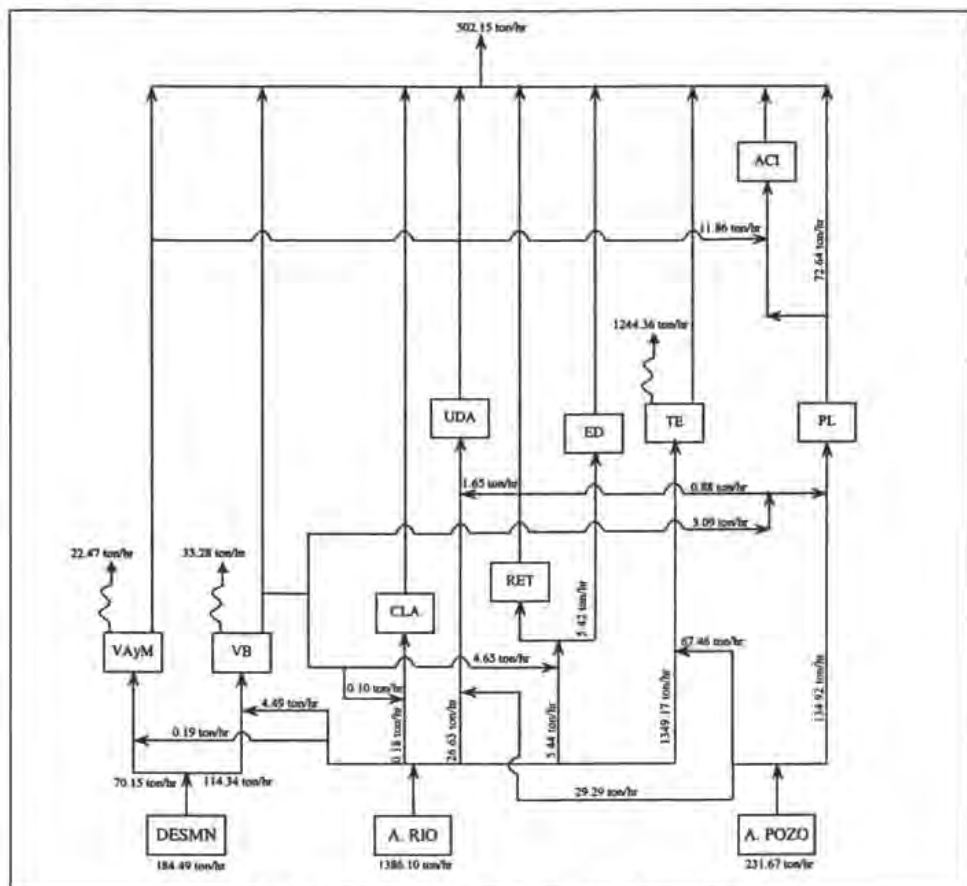


Figura 6.19 Diagrama de flujo final para el caso de estudio

Comparando el diagrama de flujo de la figura 6.5 con el diseño de la figura 6.19 se puede observar que se logra una reducción de 87.47 ton/hr de agua fresca lo que representa un ahorro del 4.6%. Respecto a la generación de agua residual se logra una reducción del 14.8% en las descargas, lo que implica una reducción en los costos de tratamiento. La tabla 6.5 muestra un comparativo de los ahorros de agua para las tres fuentes de agua respecto a la situación actual.

Tabla 6.5. Tabla comparativa de los ahorros para cada una de las fuentes de agua

Fuente de Agua	Flujo Situación Actual (ton/hr)	Flujo con Re-uso de Agua (ton/hr)	% de Ahorro
Agua Desmineralizada	189.17	184.49	2.5 %
Agua de Río	1026.49	1386.10	25.94% (Incremento)
Agua de Pozo	674.08	231.67	65.6%
Efluentes	589.63	502.15	14.80%

De forma global, la reducción de agua cruda no representa un ahorro significativo debido a que el método llevó a una distribución y mezclado entre las tres fuentes de suministro de agua y no al re-uso de agua entre las operaciones del complejo. Esto permite deducir que para tener un mayor re-uso de agua se debe considerar el uso del mínimo número de fuentes de agua. Para este caso de estudio lo ideal sería contar solo con dos fuentes de suministro de agua: desmineralizada y de río.

6.3.5 Presentación de resultados al personal de la planta

Estos resultados fueron presentados al personal clave de la planta junto con la recomendación y posibilidad de usar solo dos fuentes de agua: desmineralizada y de río, para tener mayores posibilidades de ahorro. El resultado de esta junta fue la aprobación de la recomendación ya que el complejo tiene posibilidades de extraer una mayor cantidad de agua de río eliminando el suministro de agua de pozo. El personal también comentó que puede incrementar la generación de agua desmineralizada ya que de los 3600 GPM (818 ton/hr) de capacidad de diseño que tiene actualmente solo se aprovecha el 23% de su capacidad (el incremento puede estar entre 80-90%). Con esta premisa se volvió a aplicar la tecnología pinch de agua a dos casos: el uso de agua desmineralizada y de río y el uso de agua desmineralizada y una mezcla de desmineralizada-río.

6.3.5.1 Uso de agua desmineralizada y agua de río

El balance de materia y la extracción de datos no se modifican por lo que pueden seguir usándose las tablas 6.2 a 6.4 y la figura 6.6. La curva compuesta no se afecta, solo la curva de agua, la cual se muestra sin cambios de flujo (perdidas de agua) en la figura 6.20.

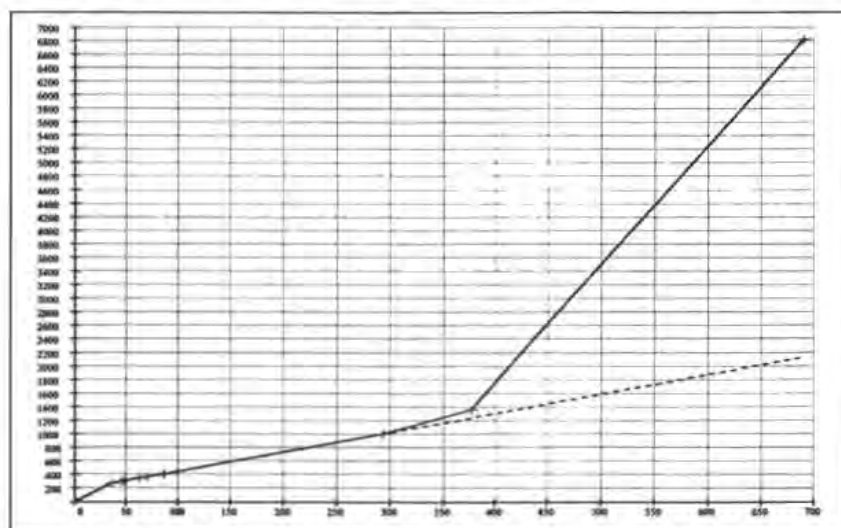


Figura 6.20 Curva compuesta Limitante y Curva de Agua (considerando solo dos fuentes de agua, desmineralizada y de río) sin considerar cambios de flujo

Nuevamente, para la curva de agua desmineralizada el punto pinch se encuentra a 266 ppm y para el agua de río se encuentra a 1000 ppm, sin embargo en el rango de 361.4 a 450 ppm se presenta una violación de flujo tal y como se puede apreciar en el rango ampliado de la figura 6.21.

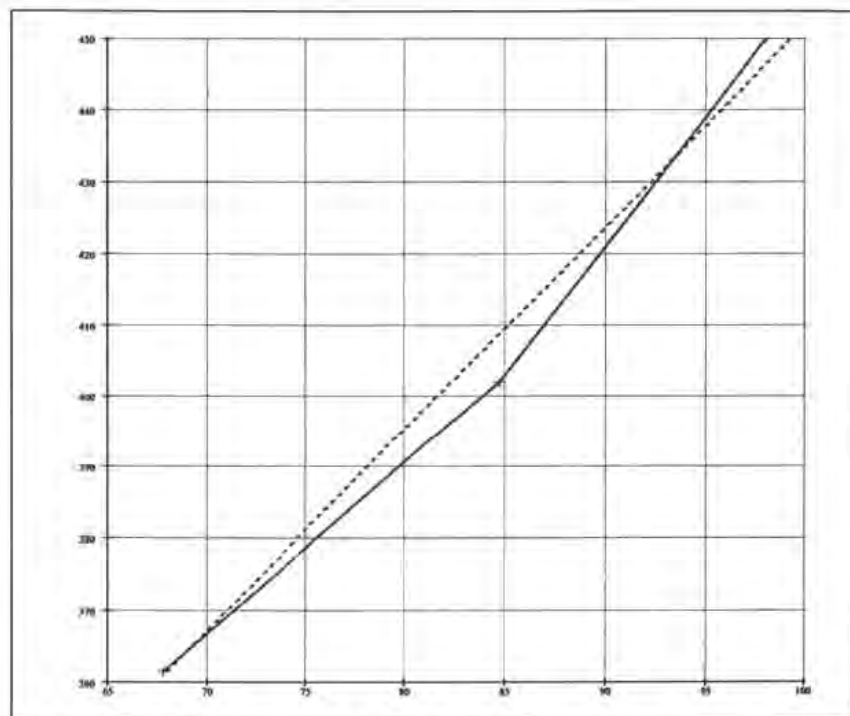


Figura 6.21 Violación de flujo para el agua de río (ampliación de la figura 6.20 en el rango de 350 a 450 ppm) sin considerar cambios de flujo

A pesar de presentar esta violación, el flujo de agua se mantendrá en los valores obtenidos, ya que, como se vera mas adelante, al introducir las perdidas de agua el sistema eliminara esta violación. De este modo los flujo, sin considerar cambios (perdidas de agua), para las dos fuentes de agua quedan como sigue:

Rango 2-266 ppm:	130.06 ton/hr (Agua Demineralizada)
Rango 266- ppm:	352.61 ton/hr (130.06 ton/hr de Agua Demineralizada + 222.55 ton/hr de Agua de Río)

Como el flujo de agua desmineralizada no cambió al considerar solo dos fuentes de agua, las perdidas de 22.47 ton/hr a 2.7 ppm del sistema de vapor de alta y media y de 33.28 ton/hr a 12 ppm del sistema de vapor de baja permanecen tal y como se muestra en la figura 6.12. De este modo, el flujo mínimo en el rango de 2-266 ppm (agua desmineralizada) considerando perdidas se mantiene en 184.49 ton/hr.

La figura 6.22 muestra la curva final del sistema considerando dos fuentes de agua así como las pérdidas de 1244.36 ton/hr a 270 ppm correspondientes a las torres de enfriamiento y las pedidas de los sistemas de vapor.

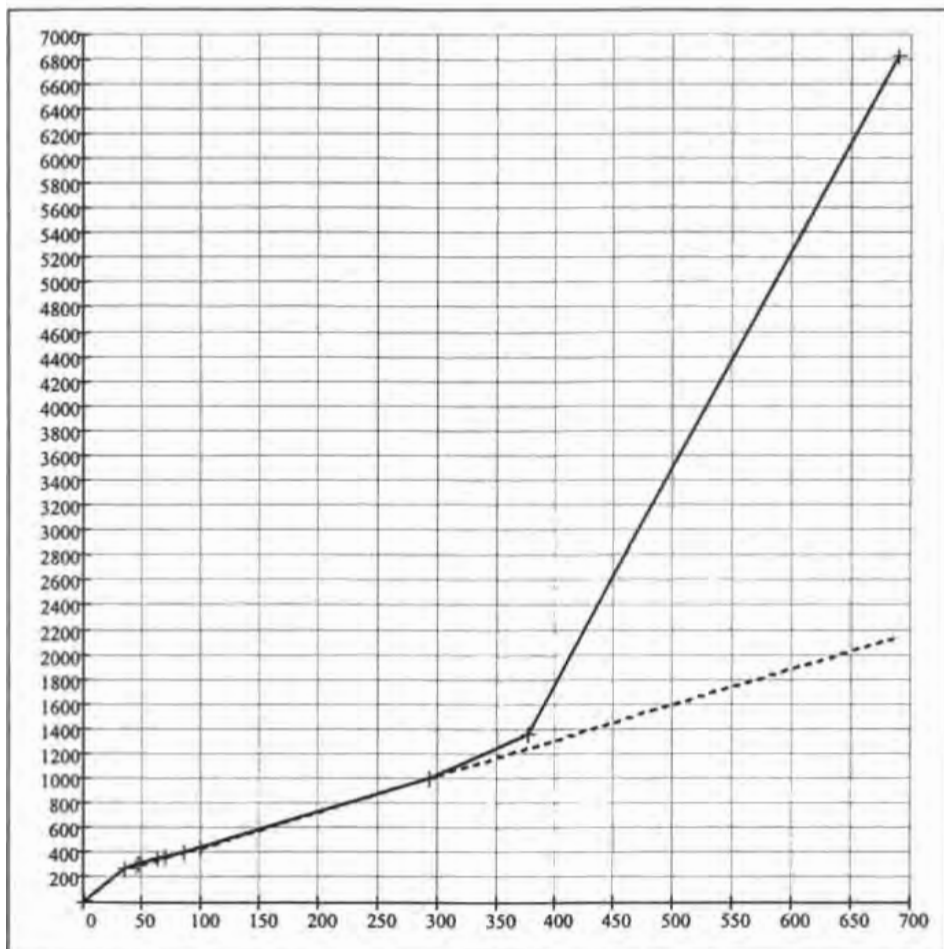


Figura 6.22 Curva compuesta y líneas de suministro de agua final, considerando dos fuentes de agua (desmineralizada y de río) y los cambios de flujo

Las figura 6.23 y 6.24 muestra una ampliación en los rango de 260 a 460 y 400 a 1400 ppm de la figura 6.22 donde se comprueba que no se presentó la violación de flujo al incluir las pérdidas de agua de la torre de enfriamiento de modo que el punto pinch se mantiene en 1000 ppm.

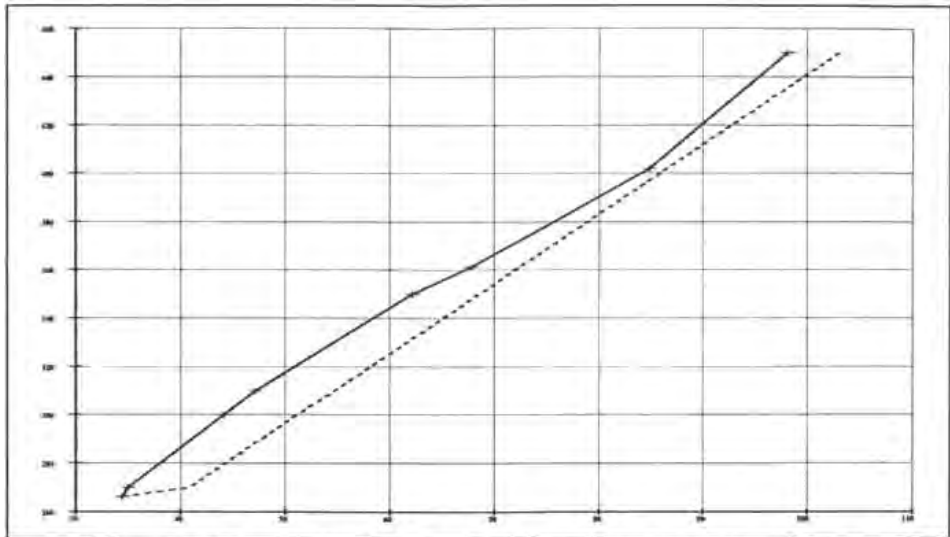


Figura 6.23 Ampliación de la figura 6.22 en el rango de 260 a 460 ppm

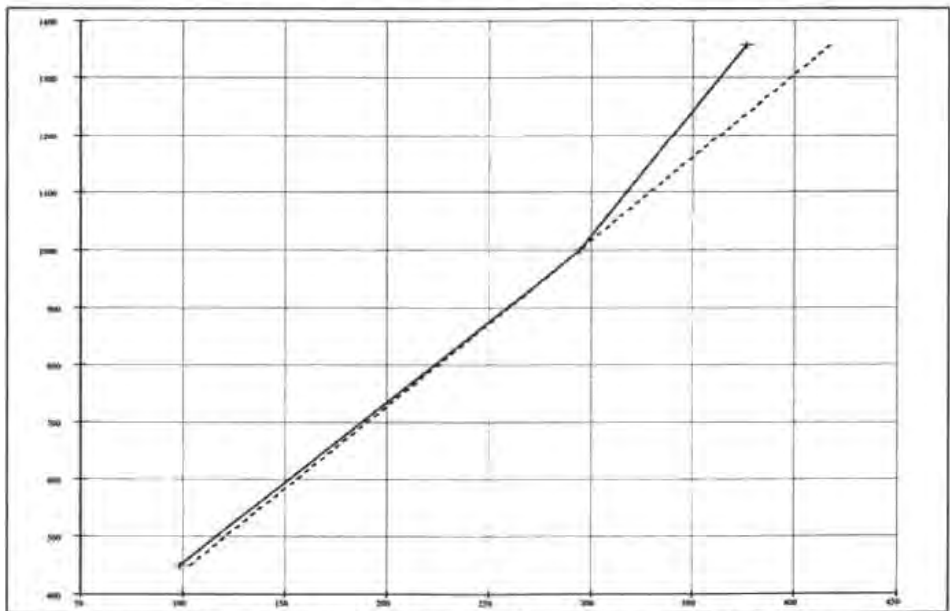


Figura 6.24 Ampliación de la figura 6.22 en el rango de 400 a 1400 ppm

Los flujos finales de las dos fuentes de agua quedan como se indica a continuación:

Rango 2-266 ppm:	184.49 ton/hr (Agua Demineralizada)
Rango 266-ppm	1590.19 ton/hr (184.49 – 22.47- 33.28 ton/hr de agua desmineralizada + 1405.70 ton/hr de agua de río)

La figura 6.25 muestra el diseño inicial para manejar los flujos mínimos resultantes de la figura 6.22 usando el diagrama de mallas.

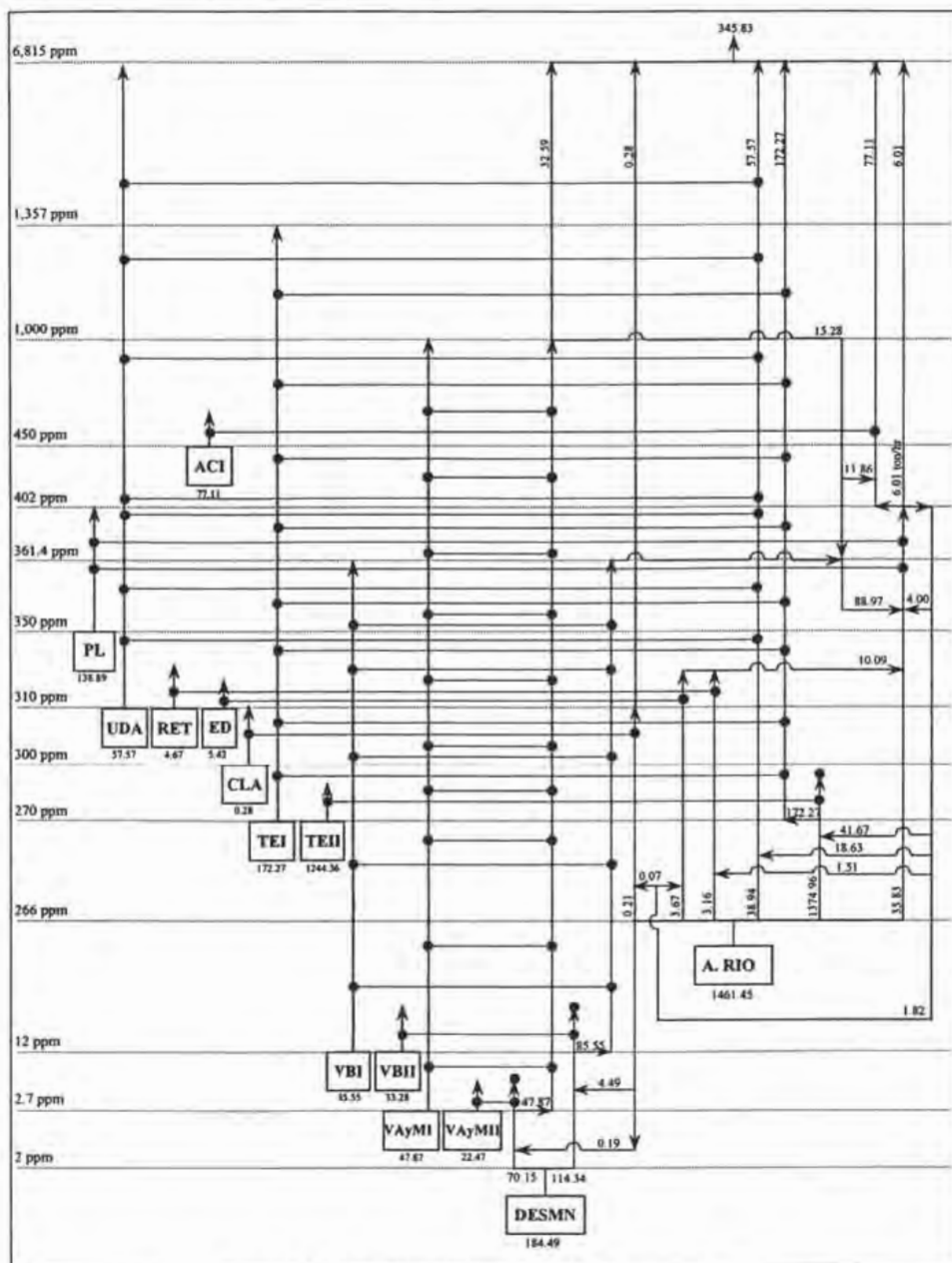


Figura 6.25 Diseño inicial usando dos fuentes de agua

La figura 6.26 muestra el diseño simplificado una vez que se han cortado los ciclos.

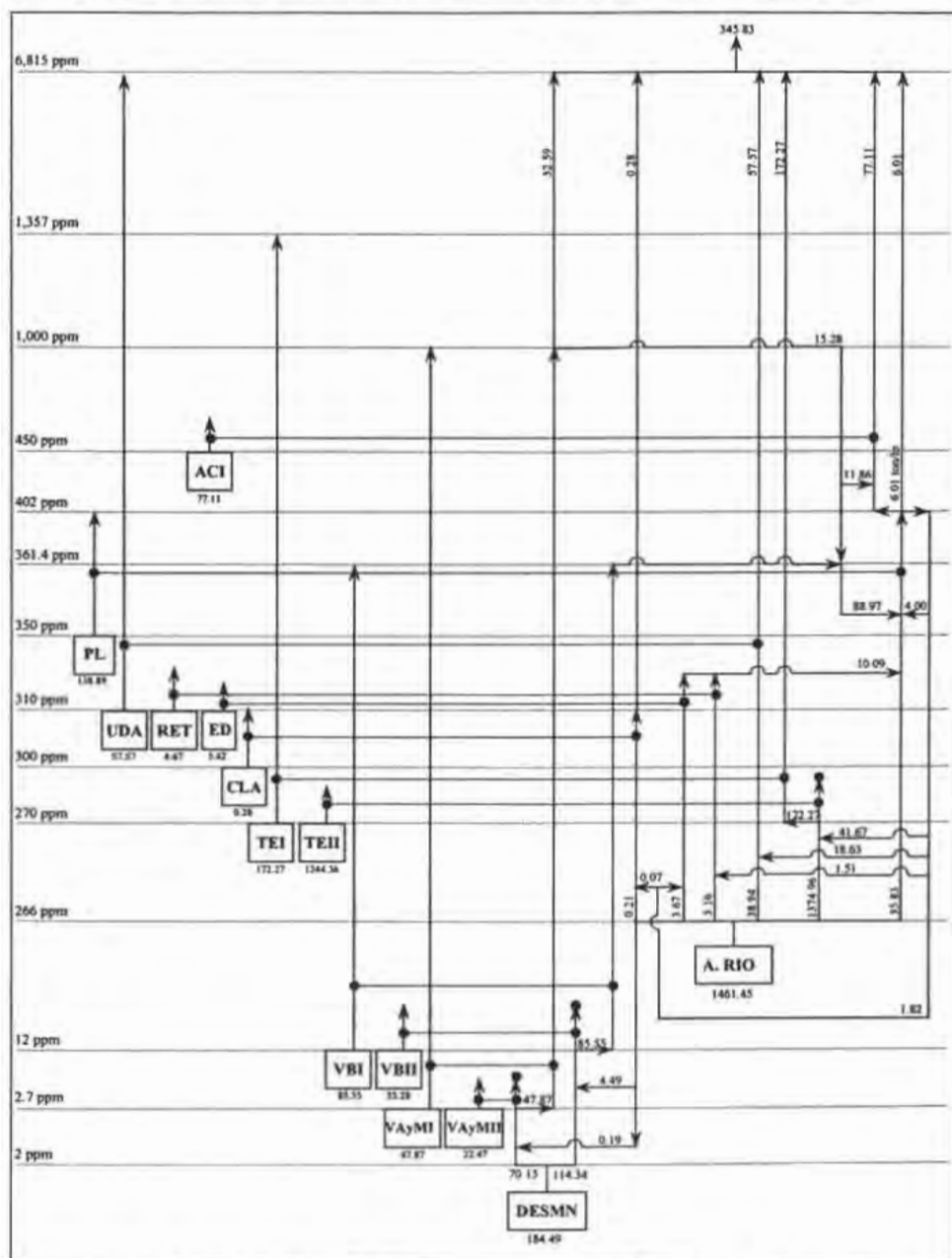


Figura 6.26 Diseño simplificado usando dos fuentes de agua

El diagrama de flujo final se muestra en la figura 6.27.

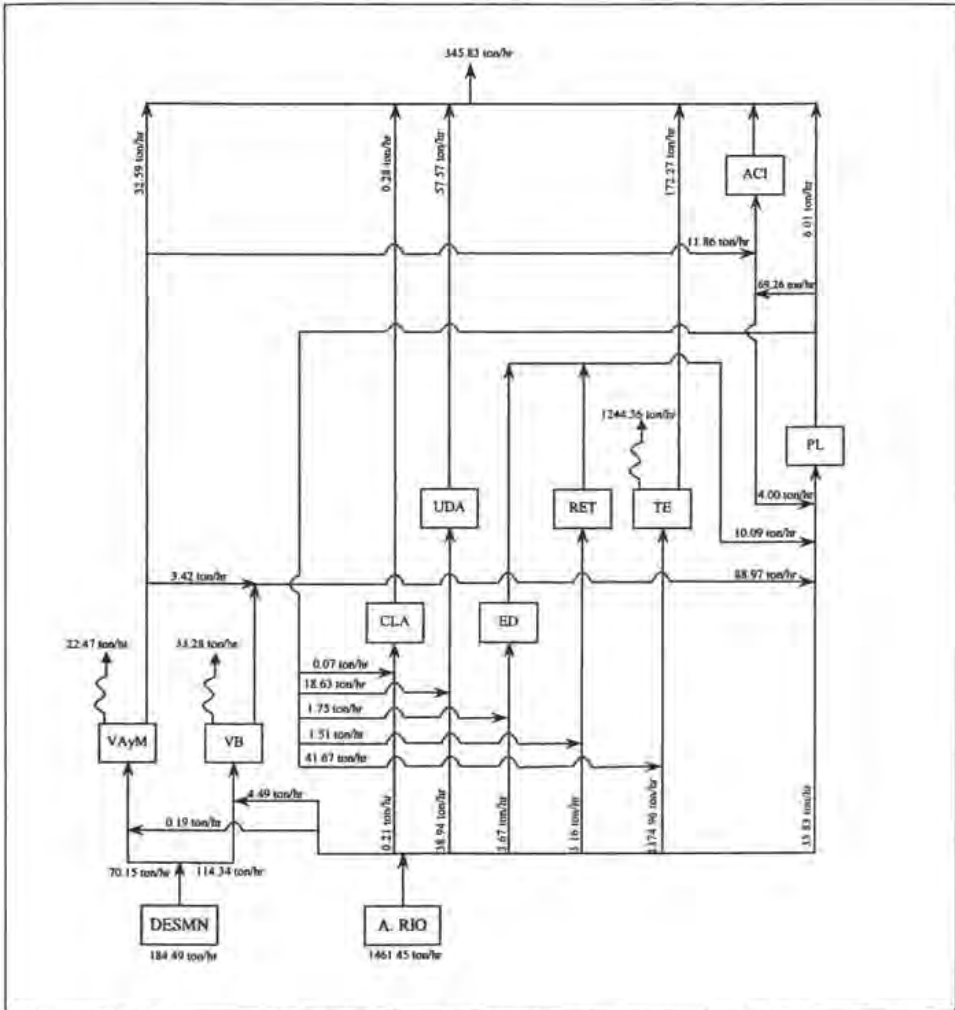


Figura 6.27 Diagrama de flujo final para el caso de estudio usando dos fuentes de agua

En el diseño resultante de la figura 6.27, muestra que se puede logra una reducción de 243.79 ton/hr de agua fresca usando solo dos fuentes de agua (desmineralizada y de río) lo que representa un ahorro del 12.90% para el suministro de agua y para el caso de la generación de agua residual se presenta una reducción de 243.80 ton/hr lo que representa un reducción del 41.35 %.

La ventaja de este nuevo arreglo es que se elimina el agua de pozo, aunque se incrementa el flujo de agua de río en un 30.81%. Los ahorros para el consumo de agua se observan en la tabla 6.6.

Tabla 6.6. Tabla comparativa de los ahorros considerando solo dos fuentes de agua

Fuente de Agua	Flujo Situación Actual (ton/hr)	Flujo con Re-uso de Agua (ton/hr)	% de Ahorro
Agua Desmineralizada	189.17	184.49	2.5 %
Agua de Río	1026.49	1461.45	29.76 % (Incremento)
Agua de Pozo	674.08	0	100 %
Efluentes	589.63	345.83	41.35%

6.3.5.2 *Uso de agua desmineralizada y mezcla de agua desmineralizada-agua de río*

Nuevamente, el balance de materia y la extracción de datos no se modifican por lo que puede seguir usándose las tablas 6.2 a 6.4 y la figura 6.6. La curva compuesta no se afecta, solo la curva de agua, la cual se muestra sin cambios de flujo (perdidas de agua) en la figura 6.28.

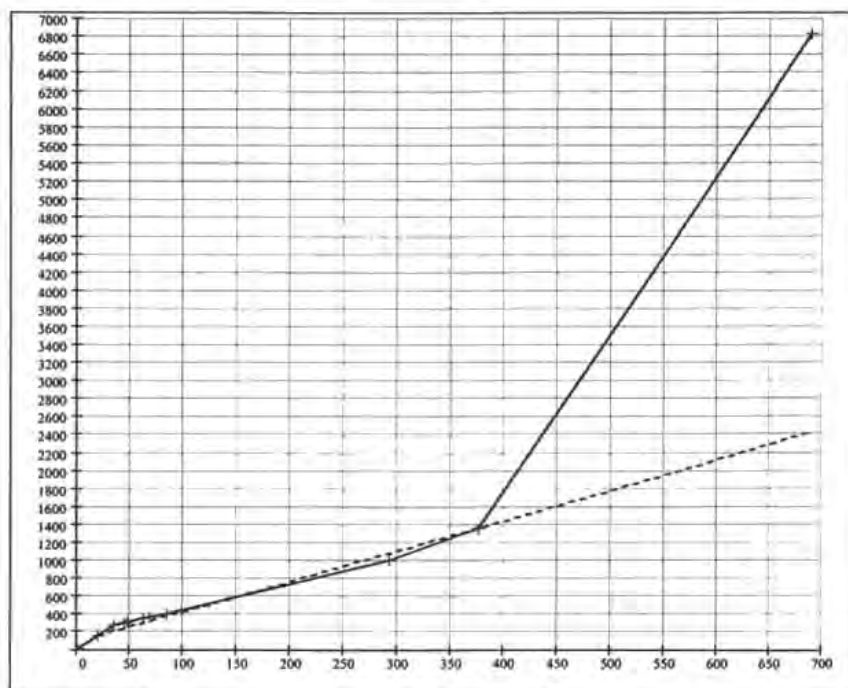


Figura 6.28 Curva compuesta Limitante y Curva de Agua (considerando dos fuentes de agua, desmineralizada y mezcla desmineralizada- río) sin considerar cambios de flujo

El punto pinch para la curva de agua desmineralizada ahora se encuentra a 155 ppm y para la mezcla de agua desmineralizada + agua de río cambia a 1357 ppm y en el rango de 361.4 a 450 ppm se presenta una violación de flujo, sin embargo, el flujo de agua se mantendrá en

los valores obtenidos, ya que al introducir las pérdidas de flujo al sistema se eliminara esta violación.

La figura 6.29 muestra la curva final introduciendo las pérdidas de las torres de enfriamiento así como las pérdidas de los sistemas de vapor, donde se comprueba que se elimina la violación de flujo.

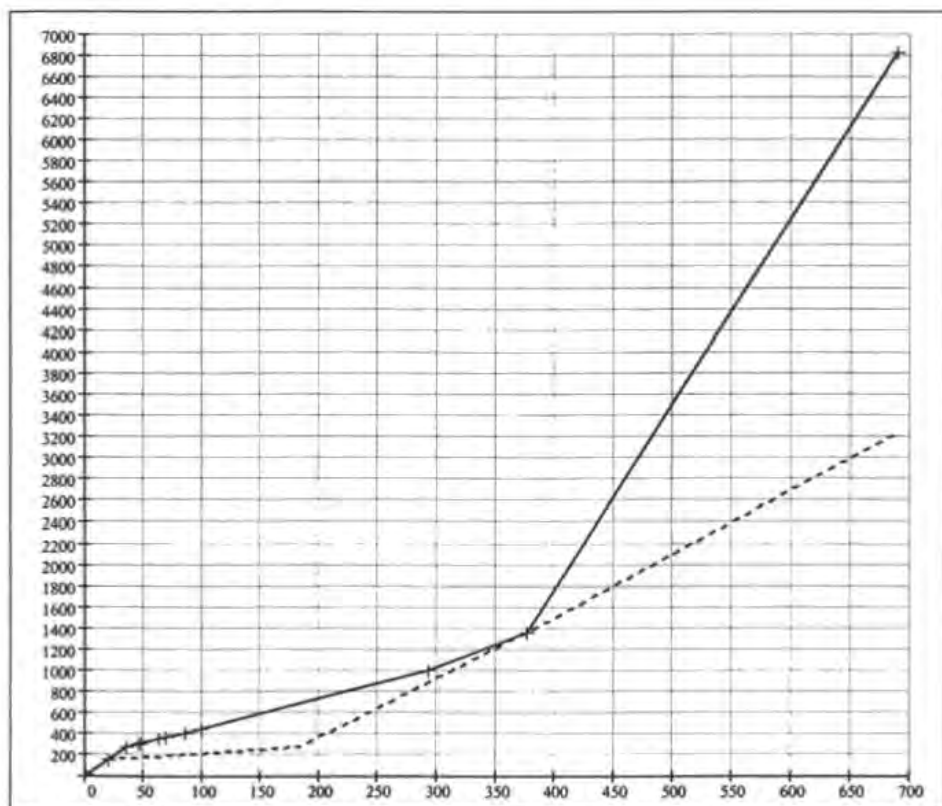


Figura 6.29 Curva compuesta y líneas de suministro de agua final, considerando dos fuentes de agua (desmineralizada y mezcla desmineralizada-río) y los cambios de flujo

Los flujos finales de las dos fuentes de agua quedan como se indican a continuación:

Rango 2-155 ppm:	181.08 ton/hr (Agua Desmineralizada)
Rango 155-ppm	1421.22 ton/hr (181.08 – 22.47- 33.28 ton/hr de agua desmineralizada + 1295.88 ton/hr de mezcla agua desmineralizada-río)

La figura 6.30 muestra el diseño inicial para manejar los flujos mínimos resultantes de la figura 6.29 usando el diagrama de mallas.

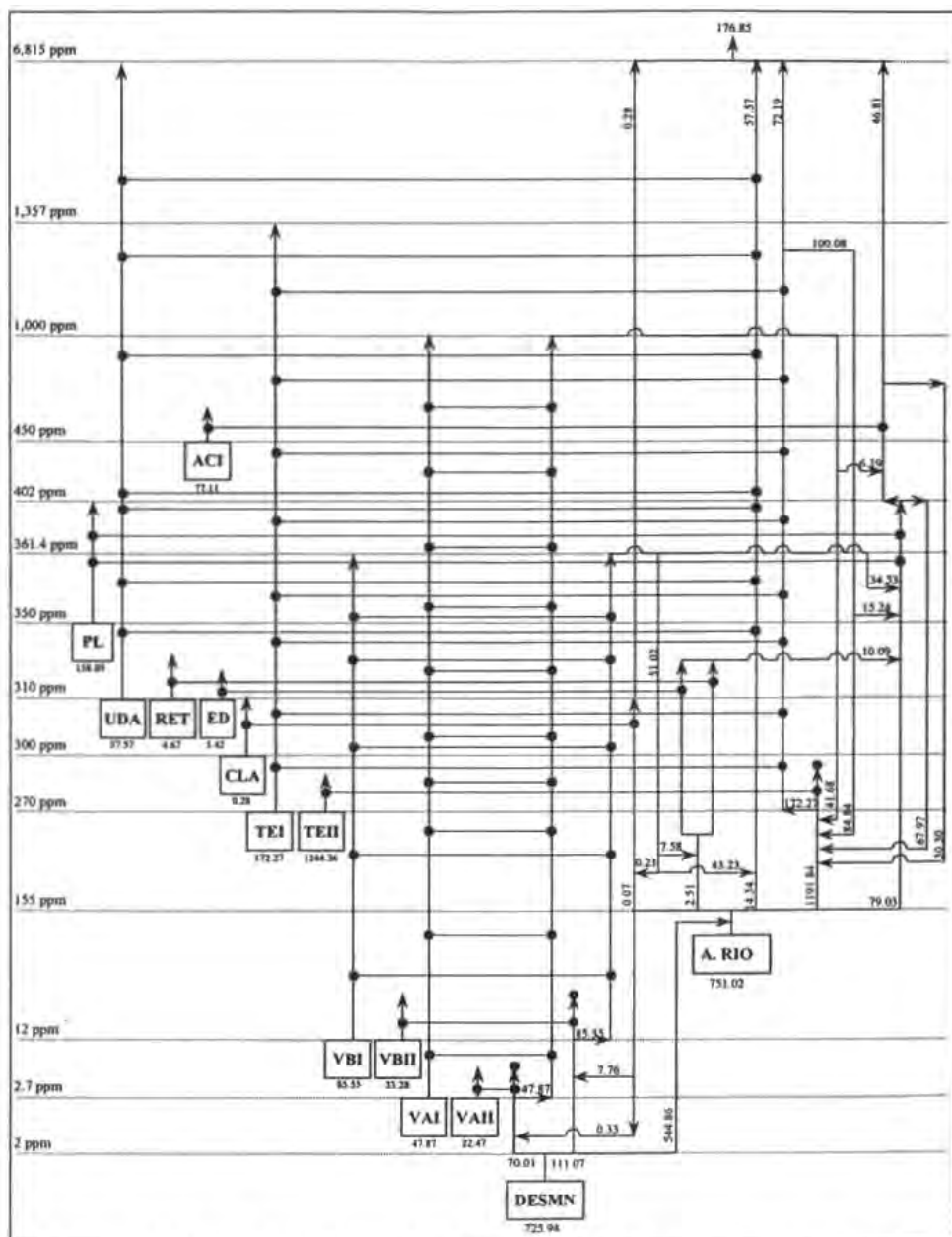


Figura 6.30 Diseño inicial usando dos fuentes de agua (desmineralizada y mezcla desmineralizada-río)

La figura 6.31 muestra el diseño simplificado una vez que se han cortado los ciclos.

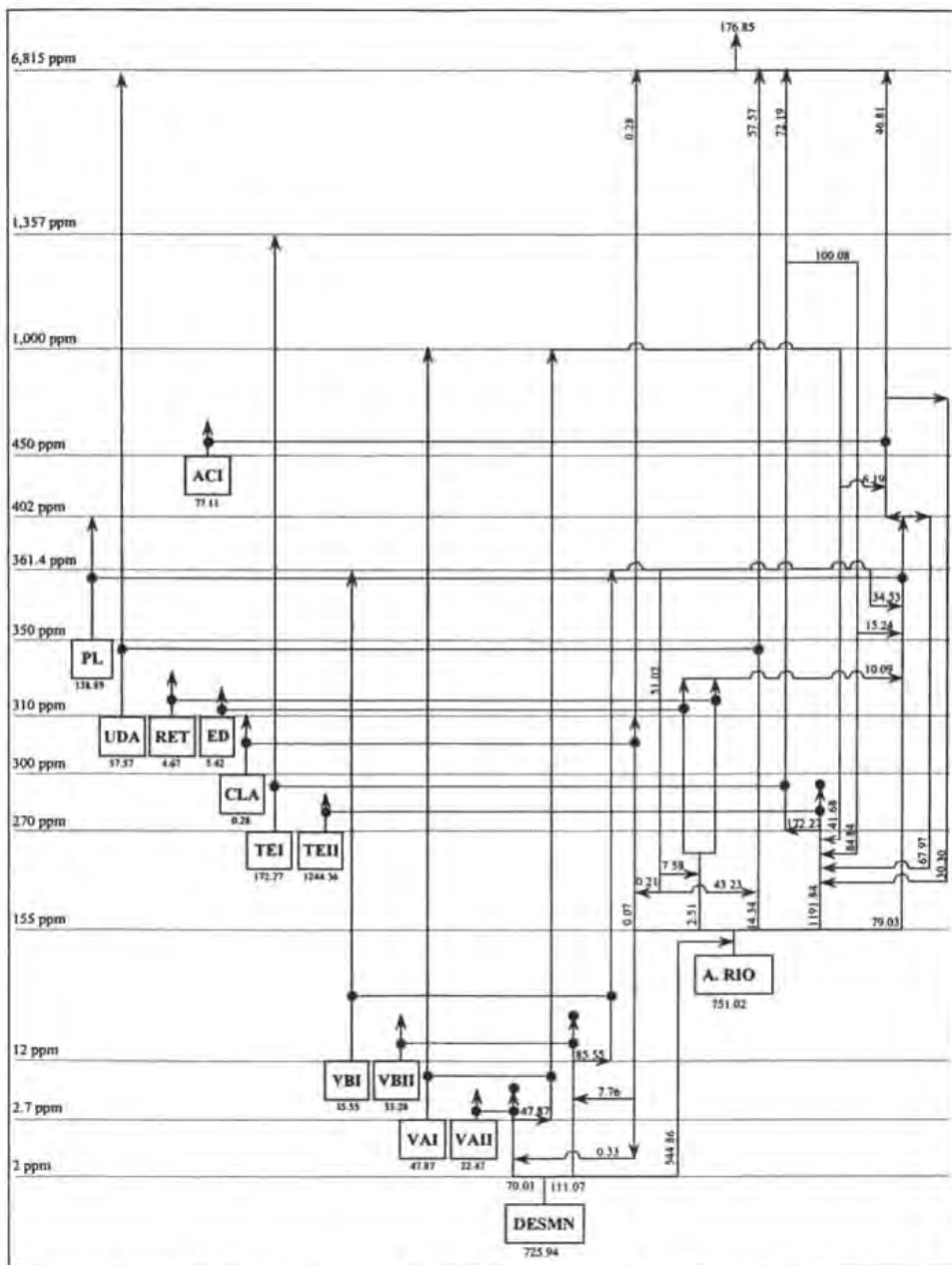


Figura 6.31 Diseño simplificado usando dos fuentes de agua (desmineralizada y mezcla desmineralizada-río)

El diagrama de flujo final se muestra en la figura 6.32.

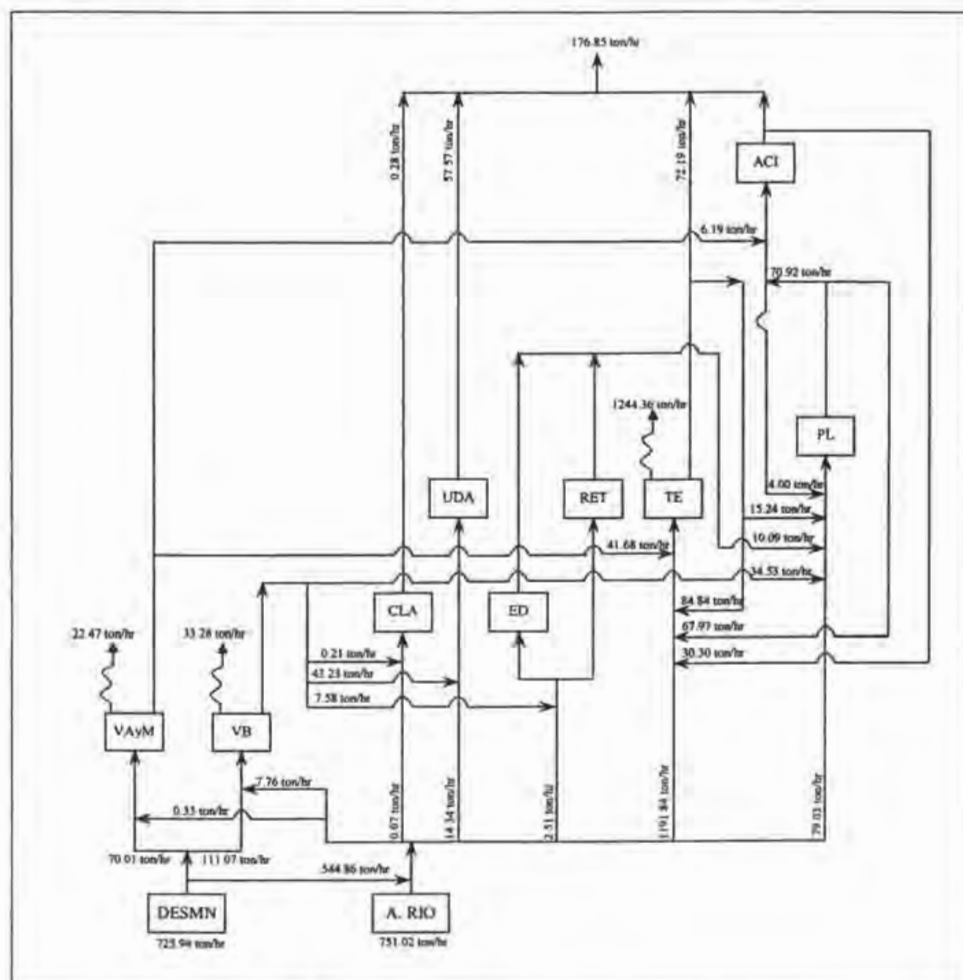


Figura 6.32 Diagrama de flujo final para el caso de estudio usando dos fuentes de agua (desmineralizada y mezcla desmineralizada-río)

En el diseño resultante de la figura 6.32 se muestra que se puede lograr una reducción de 412.77 ton/hr de agua fresca usando solo dos fuentes de agua (desmineralizada y mezcla desmineralizada-río) lo que representa un ahorro del 21.84% para el suministro de agua. El flujo de agua desmineralizada aumenta y con este nuevo arreglo deberá operar al 89 % de su capacidad, valor que se encuentra dentro del rango establecido por personal del complejo.

La ventaja de este nuevo arreglo es que se elimina el agua de pozo, se reduce el consumo de agua de río y se trabaja el agua desmineralizada a la capacidad requerida por el complejo. Los ahorros para el consumo de agua se observan en la tabla 6.7.

Tabla 6.7. Tabla comparativa de los ahorros considerando solo dos fuentes de agua (agua desmineralizada y mezcla desmineralizada-río)

Fuente de Agua	Flujo Situación Actual (ton/hr)	Flujo con Re-uso de Agua (ton/hr)	% de Ahorro
Agua Desmineralizada	189.17	725.94	73.94 % (Incremento)
Agua de Río	1026.49	751.02	26.84 %
Agua de Pozo	674.08	0	100 %
Efluentes	589.63	176.85	70.01 %

Respecto a la generación de agua residual se logra una reducción significativa del 70.01 % en las descargas, lo que implica una mayor reducción en los costos de tratamiento.

En la figura 6.3 se observa que se considera el re-uso del agua contra incendio, sin embargo por seguridad, en caso que el complejo desee mantener el uso de agua contra incendio exclusivamente para este propósito, se eliminaría el re-uso de 30.30 ton/hr de agua en las torres de enfriamiento y esta agua se debe reponer mediante el uso de agua cruda adicional proveniente del agua de río tal y como se observa en la figura 6.33.

En el diseño resultante de la figura 6.33 se puede observar que existe un incremento de agua de río de 30.19 ton/hr y se usan además 0.11 ton/hr de agua de purga de torres de enfriamiento lo cual permite cubrir los requerimientos de las 30.30 ton/hr de agua contra incendio que ya no serán re-usadas. A pesar de este incremento aun se logra una reducción de 382.58 ton/hr en el consumo de agua fresca (desmineralizada y mezcla desmineralizada-río) lo que representa un ahorro del 20.25% para el suministro de agua.

A pesar que la generación de agua residual se incrementa a 207.04 ton/hr, esta representa una reducción en las descargas de 64.89% la cual sigue representando una reducción considerable en las descargas de agua.

Los ahorros para el consumo considerando el arreglo de la figura 6.33 se observan en la tabla 6.8.

Tabla 6.8. Tabla comparativa de los ahorros considerando solo dos fuentes de agua (agua desmineralizada y mezcla desmineralizada-río) sin re-usar el agua contra incendio

Fuente de Agua	Flujo Situación Actual (ton/hr)	Flujo con Re-uso de Agua (ton/hr)	% de Ahorro
Agua Desmineralizada	189.17	725.94	73.94 % (Incremento)
Agua de Río	1026.49	781.21	23.90 %
Agua de Pozo	674.08	0	100 %
Efluentes	589.63	207.04	64.89 %

Estos resultados muestran la posibilidad adicional de mantener la disponibilidad del agua contra incendio (sin usarla en otras operaciones) en caso que se presente alguna contingencia o emergencia.

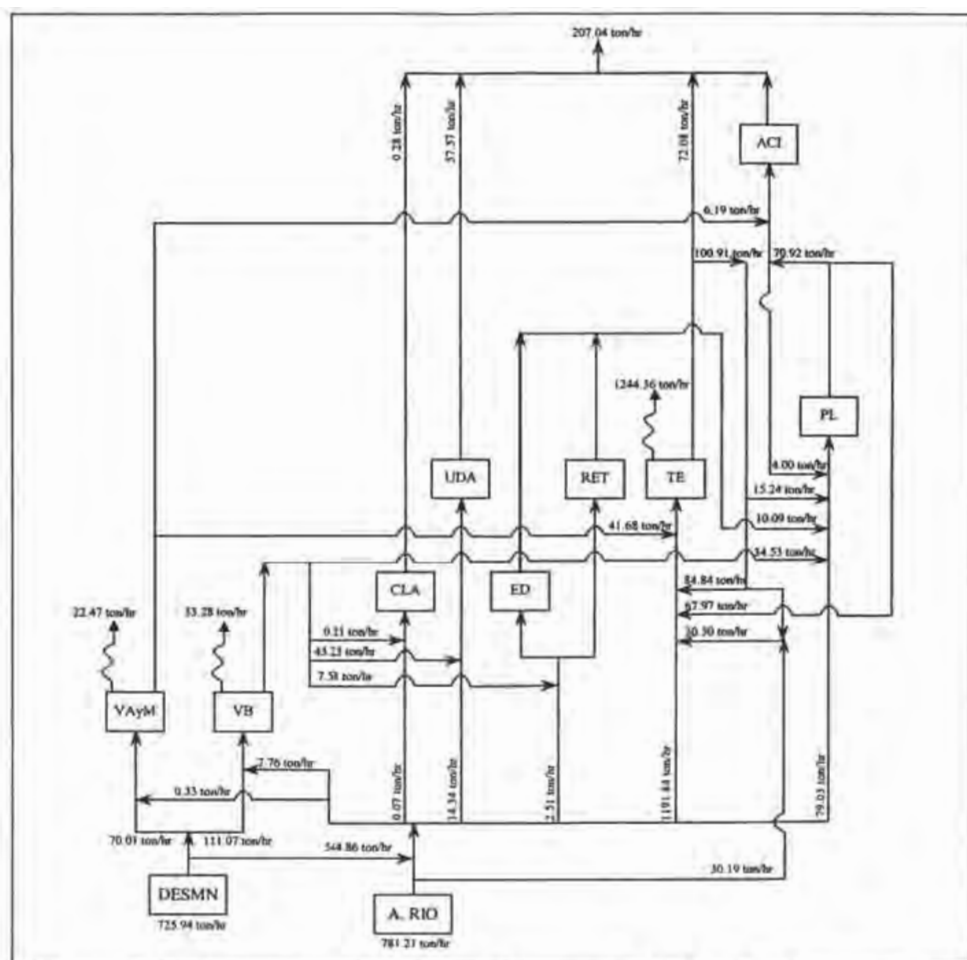


Figura 6.33 Diagrama de flujo eliminando el re-uso de 30.30 ton/hr de agua contra incendio de la figura 6.32

6.3.6 Recomendación de un plan de acción

Antes de presentar la recomendación es importante puntualizar la situación actual del consumo de agua en el complejo para saber si los ahorros obtenidos son aceptables.

En general, la operación que consume la mayor cantidad de agua es la torre de enfriamiento, con aproximadamente el 75% del total de agua utilizada. Asimismo, es esta donde se presentan las mayores pérdidas de agua que resultan irre recuperables (por evaporación y arrastre) y representan aproximadamente el 66% de total de agua consumida. De modo que la mayor parte del agua alimentada al complejo es para satisfacer los requerimientos de las torres de enfriamiento.

Si consideramos el total de agua perdida por las torres de enfriamiento y los sistema de vapor se tiene que estas representan el 69% del total de agua alimentada, por lo tanto solo existe la posibilidad de ahorrar como máximo hasta un 31% del total de agua alimentada.

Respecto las descargas, las de plantas y torres de enfriamiento juntas representan el 53%, es decir, mas de la mitad de las aportaciones. Asimismo, las descargas que representarían mayor problemática para ser reusadas por sus características, son el agua de UDAs y el agua de las torres de enfriamiento, ya que el agua de UDAs de la regeneración contiene un alto contenido de ácido o sosa por lo que resultaría agresiva su uso en los equipos. El agua de las torres de enfriamiento, además de tener un alto contenido de sólidos, también trae consigo quimicos, como los biocidas que también resultan agresivos. El resto del agua descargada no tendría problemas para ser reusada. Estos fueron los criterios para decidir re-usar o no el agua descargada de cada operación. Por lo anterior es importante mencionar que se deben seguir ciertos criterios heurísticos para proponer una mezcla de corrientes de agua de diferentes calidades o para re-usar el agua que sale de un equipo u operación y poder enviarlo a otro.

Para el caso de estudio solo se analizaron las posibilidades de re-usar directamente el agua ya que representa una inversión menor. No se incluyo aquí un caso de regeneración de agua que permita re-usar una mayor cantidad de agua ya que el personal del complejo así lo expreso y en caso que se deseara considerar un sistema de tratamiento nuevo para regenerar el agua, sería usado principalmente para el caso del agua de UDAs y de las torres de enfriamiento principalmente. Sin embargo debido a experiencias obtenidas en algunos proyectos y para este tipo específico de agua, resulta difícil tratarla y acondicionarla a las características requeridas por las operaciones, debido a la cantidad de contaminantes contenidos en ellos aunado a las características corrosivas que presenta esta agua. Aunque en caso que se hubiera requerido, es posible tratar y acondicionar el agua siempre y cuando se cuenten con los recursos necesarios para efectuarlo o los objetivos del proyecto obliguen a usar estos tipos de tratamiento.

Ahora bien, basado en el análisis pinch aplicado a los diferentes casos se tiene se pudieron generar cuatro opciones de re-uso de agua, las cuales generaron diferentes porcentajes de ahorro de agua y diferentes porcentajes en la reducción de efluentes:

- 1) Uso de tres fuentes de agua: desmineralizada, de pozo y de río. Esta opción se genero usando las fuentes de suministro de agua tal y como actualmente lo hace el complejo
- 2) Uso de dos fuentes de agua: desmineralizada y de río. Opción propuesta para reducir eliminar el consumo de agua de pozo y operar únicamente con dos fuentes de suministro.
- 3) Uso de dos fuentes de agua: desmineralizada y mezcla desmineralizada-río re-usando el 60.71 % de agua contraincendio. Opción generada para reducir aun mas el consumo de agua y la generación de efluentes y aprovechar la capacidad existente de la planta de generación de agua desmineralizada.
- 4) Uso de dos fuentes de agua: desmineralizada y mezcla desmineralizada-río sin re-usar el agua contraincendio. Para eliminar el reuso de agua contraincendio y tener esta agua disponible en caso de presentarse alguna eventualidad.

La tabla 6.9 muestra una tabla comparativa donde se resumen los ahorros y se mencionan las ventajas y desventajas de cada opción lo cual permitió llegar a una recomendación.

Tabla 6.9. Tabla comparativa de las cuatro opciones de re-uso de agua estudiadas

No.	Opción	% Ahorro Agua Cruda	% Reducción Agua residual	Ventajas	Desventajas
1	Uso tres fuentes agua (desmineralizada, río y pozo)	4.60	14.84	Operar prácticamente como lo hace actualmente el complejo, lo que implica cambios menores en las instalaciones	Se logra muy poco ahorro en el consumo de agua fresca
2	Uso dos fuentes agua (desmineralizada y río)	12.90	41.35	Se logra una reducción considerable en la generación de agua residual	Modificaciones mayores de interconexiones de tubería requeridas para implementar los reusos
3	Uso dos fuentes agua (desmineralizada y mezcla desmineralizada-río)	21.20	70.01	Se logra una reducción en el consumo de agua fresca aceptable y una reducción en la generación de agua residual considerable	Se re-usa un gran porcentaje de agua contraincendio (60.71%) no teniendo disponibilidad completa de esta agua
4	Uso dos fuentes agua (desmineralizada y mezcla desmineralizada-río) si re-usar el agua contra incendio	20.25	64.89	Se logra una reducción en el consumo de agua fresca aceptable y una reducción en la generación de agua residual considerable	Modificaciones mayores de interconexiones de tubería requeridas para implementar los reusos

Basado en la tabla 6.9 y considerando las ventajas y desventajas técnicas, se recomendó la opción número 4, al permitir el ahorro de alrededor del 20% (muy cercano al 31% posible) en el consumo de agua fresca y una reducción de casi el 65% en la generación de agua residual.

Para respaldar la recomendación técnica, se hizo un análisis económico considerando los costos (o tarifas de servicios auxiliares) para generar tanto el agua fresca como la desmineralizada. Estas tarifas fueron proporcionados por personal del complejo para ser aplicados al caso estudio (datos de diciembre del 2002). La tabla 6.10 muestra las tarifas aplicables para el caso de estudio.

Tabla 6.10 Costo (o tarifas de servicios auxiliares) para el agua fresca y desmineralizada

Tipo de Agua	Costo (\$/ton)
Agua Fresca	3.856
Agua Desmineralizada	7.336

Debido a que el agua desmineralizada se obtiene a partir de la misma agua fresca, el costo adicional por generar el agua desmineralizada resulta ser de 3.48 \$/m³.

La tabla 6.11 muestra los costos para cada opción y para la situación actual. Asimismo se muestran los ahorros que son posibles de obtener al implementar las técnicas de integración considerando las cuatro opciones propuestas.

Tabla 6.11 Comparativo entre los costos para cada una de las opciones respecto a la situación actual

No.	Opción	Consumo de agua (ton/hr)		Costo (\$/hr)			Ahorro Respecto a situación actual (\$/hr)	Ahorro Anual Respecto a situación actual (\$/hr)	Notas
		Fresca	Desmin.	Fresca	Desmin.	Total			
0	Uso Actual (Tres fuentes de agua, desmineralizada, río y pozo)	1700.57	189.17	\$6,557.40	\$658.31	\$7,215.71	\$0.00	\$0.00	Sin aplicar técnicas de integración
1	Uso de tres fuentes de agua (desmineralizada, río y pozo)	1617.77	184.49	\$6,238.12	\$642.03	\$6,880.15	\$335.56	\$2,899,266.05	Aplicando técnicas de integración
2	Uso de dos fuentes de agua (desmineralizada y río)	1461.45	184.49	\$5,635.35	\$642.03	\$6,277.38	\$938.33	\$8,107,198.16	Aplicando técnicas de integración
3	Uso de dos fuentes de agua (desmineralizada y mezcla desmineralizada-río) reusando el agua contraincendio	751.02	725.94	\$2,895.93	\$2,526.27	\$5,422.20	\$1,793.51	\$15,495,884.93	Aplicando técnicas de integración
4	Uso de dos fuentes de agua (desmineralizada y mezcla desmineralizada-río) sin re-usar el agua contraincendio	781.21	725.94	\$3,012.35	\$2,526.27	\$5,538.62	\$1,677.09	\$14,490,079.72	Aplicando técnicas de integración

Como se puede observar en la tabla 6.11, aplicando las técnicas de integración de procesos se logran ahorros de diferentes magnitudes, sin embargo los ahorros mayores se observan para las opciones 3 y 4. Así que se recomienda opción la técnicamente viable o mas adecuada para el complejo, que de acuerdo al análisis hecho a la tabla 6.9 esta opción resulta ser la 4.

Respecto a la implementación del proyecto y evaluación del desempeño, el complejo esta en espera de la aprobación del presupuesto para implementar el re-uso de agua por lo cual no se integran resultados en este aspecto, sin embargo se recomendó el involucrar al personal participante en el estudio para que la compañía contratista encargada de realizar la ingeniería de detalle y la construcción reciba asesoramiento adecuado y se resuelvan problemas que puedan surgir en esta etapa.

VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- 1) Considerando el caso de estudio en primera instancia se puede concluir que el análisis pinch de agua si permite lograr una reducción en el consumo de agua fresca aunque no al nivel que se reporta en la literatura (de hasta el 50% de ahorro). Para lograr ahorros mayores se deben plantear diferentes opciones o escenarios con estrecha colaboración del personal de operación de la planta. La metodología por si misma no detecta problemas operacionales, éstos los transmite el personal de la planta, o se puede efectuar un estudio independiente al del pinch, y con las mejoras que puedan hacerse a la operación se pueden considerar estos datos como apoyo a la metodología pinch.
- 2) La aplicación de la tecnología pinch implica obtener diferentes escenarios o propuestas para el re-uso de agua. La metodología se debe aplicar a cada propuesta, debiendo tener una colaboración muy cercana con el personal de la planta, para que ellos evalúen la posibilidad de implementar los arreglos propuestos. Esta retroalimentación es esencial para el buen éxito de un estudio pinch, sin perder de vista aspectos económico, técnicos, de seguridad y operativos. Por ejemplo, debido al alto contenido de sólidos en las purgas de una torre de enfriamiento, el re-uso directo de este tipo de agua es limitando, aunado al contenido de químicos (como biocidas, dispersantes) que trae consigo esta agua, como consecuencia del tratamiento que se la da a las torres de enfriamiento. En caso que se deseara regenerar este tipo de agua, el tratamiento resulta difícil y costoso, debido a la gran cantidad de componentes que contienen estos tipos de agua.
- 3) Para cada propuesta o escenario pueden presentarse cambios en la posición del punto pinch. El cambio del punto pinch se detecta cuando se presentan violaciones de flujo, para lo cual se debe incrementar o disminuir el flujo de agua. Asimismo estos cambios pueden provocar el aumento en las descargas de agua residual o disminución de las mismas, de modo que para elegir el mejor escenario, como se mencionó antes, es importante la retroalimentación por parte del personal de la planta.
- 4) Una de las aportaciones al re-uso de agua y a la tecnología pinch planteadas en la presente tesis y en particular en el caso de estudio, fue la aplicación de la metodología considerando el uso de varias fuentes de agua. En la literatura prácticamente no se ha reportado el estudio con diferentes fuentes de agua (excepto Wang y Smith hacen una breve mención pero no abunda en esta). Los resultados mostrados en el presente trabajo de tesis demuestran que es preferible usar un numero mínimo de fuentes de agua y se plantea la posibilidad de usar el mezclado entre fuentes de agua con diferentes calidades para lograr mayores ahorros en el consumo y descarga de agua. Por ejemplo, para el caso de estudio, la metodología considera la clasificación de las operaciones por concentraciones limitantes de entrada y con ello determinar las necesidades de calidad de agua alimentada. Considerando los requisitos, en cuanto a calidad y cantidad de agua demandados por el complejo, se encontró que la mejor opción fue manejar dos fuentes de agua (desmineralizada y de río), eliminando así el uso del agua de pozo. Al mezclar el

agua desmineralizada con la de río aumentó el ahorro de agua y por consiguiente se redujo la generación de agua residual, sin invertir en equipo nuevo de tratamiento (objetivo planteado por el personal del complejo) sino solo realizando cambios en las interconexiones de los procesos de agua.

- 5) Cuando se emplean diferentes fuentes de agua se debe encontrar un punto pinch para cada una de ellas, por lo que se presentan un problema multi-pinch, de modo que para calcular los flujos mínimos primero deben clasificarse las operaciones que forman parte de cada fuente de agua para encontrar su punto pinch. Del mismo modo, identificar en cual fuente de agua deben encontrarse los cambios de flujo (la perdidas y ganancias de agua en un proceso, operación o equipo) y encontrar el pinch de agua considerando estas perdidas ó ganancias correspondiente cada fuente ya que en caso contrario se obtendrán violaciones de flujo.
- 6) Otra aportación fue incluir el manejo de operaciones que no presentan un cambio en la carga másica; esto es, si hacemos una clasificación de las operaciones basado en las características de flujo y de la carga másica tenemos que se presentan las siguientes:
 - a) Operaciones que demanda un flujo de agua constante
 - b) Operaciones que presentan el uso de un volumen de agua variable
 - c) Operaciones que presentan carga másica constante
 - d) Operaciones con carga másica variable.
- 7) Los estudios reportados en la literatura mencionan la aplicación del pinch de agua para todos los casos anteriores excepto para el tercero, esto es, para operaciones que no presentan cambios en la carga másica. En esta tesis, se incluyeron dentro del caso de estudio, las operaciones que no presentaban intercambio de masa, esto es, que la carga másica de contaminante de entrada fue igual a la de salida (que para el ejemplo práctico fueron los edificios, el agua contraincendio y el retrolavado de filtros) y el resultado fue que estas fueron una opción importante para el re-uso de agua, puesto que prácticamente toda el agua manejada por las operaciones de este tipo fue re-usada. En el caso práctico se considero al agua contraincendio como una operación de agua debido a que la planta la consume regularmente para lavado y riego; sin embargo, en la recomendación hecha se propone el mantener esta agua para uso exclusivo de contra incendio.
- 8) Debido a que el nivel de re-uso para el caso de estudio resultó aceptable, no se considero la integración de un sistema de regeneración de agua. Sin embargo en caso que el personal del complejo hubiera establecido esta regeneración aumentaría el nivel de ahorro de agua cruda.
- 9) El resultado en una sola aplicación (como el caso de estudio) no necesariamente quiere decir que se pueda obtener el mismo nivel de ahorro en otras plantas o complejos. Cada planta o proceso tendrá su propio nivel de ahorro dependiendo de la calidad de agua disponible en el lugar ya que esta es la que dictaminara la posibilidad de los re-usos.

7.2 Recomendaciones

1) Para obtener un mejor aprovechamiento al implementar el re-uso de agua y que no puede incluirse en el análisis pinch, se debe considerar la automatización de los sistemas, lo cual permitiría mejorar la operación y calidad de agua manejada y descargada. La mayor parte de la industria presta poca atención a los servicios auxiliares y el servicio de agua se encuentra en esta situación. En la experiencia obtenida en los estudios de este tipo de proyectos, nos ha sorprendido que la mayoría de las plantas visitadas carecen de una instrumentación y control que permitan operar de forma automática. Solo se cuenta con indicadores locales y las operaciones de adición de químicos o neutralizaciones se efectúan manualmente. Asimismo los análisis de agua las realizan manualmente siendo que algunos de estos pueden sustituirse por la instrumentación analítica adecuada (como pH, sólidos suspendidos, cloro residual, etc) para monitorear automáticamente la calidad y los análisis manuales solo se aplicarían como verificación y para los casos en que no exista en el mercado la instrumentación para la medición de alguna variable (como por ejemplo coliformes fecales).

Una adecuada automatización permitiría recuperar mayor cantidad de agua de buena calidad, como por ejemplo en la UDAS, donde al implementar un buen arreglo de válvulas automáticas, se puede recuperar el agua de enjuague y retrolavado y solo enviar a tratamiento el agua de regeneración (para neutralizarla).

- 2) La detección y reparación de fugas es otro factor que permitirían ahorrar agua y que no considera el método pinch. Es recomendable que el personal de la planta realice su programa de mantenimiento preventivo para que la planta opere de forma mas eficiente.
- 3) Crear conciencia en el personal de la planta o en el cliente para dar seguimiento hasta la etapa de construcción y de operación de las modificaciones surgidas del estudio para conocer las dificultades y problemas que puedan surgir, lo que permitiría mejorar las técnicas y metodologías e ir adquiriendo un mayor aprendizaje sobre estas.
- 5) Si se implementan los tratamientos adecuados con la capacidad adecuada, previo a la implementación de los re-usos, se puede reducir la inversión del acondicionamiento de agua cruda a los niveles requeridos por las operaciones o para dar cumplimiento a la normatividad.
- 6) Es recomendable que previo al estudio de re-uso de agua se efectúe otro para la eficiencia de energía y así poder obtener mayores ahorros de agua. Debido a que, normalmente la torre de enfriamiento es el principal consumidor de agua, al realizar un estudio de eficiencia de energía el resultado es que las demandas de agua de enfriamiento y vapor para calentamiento o generación de energía eléctrica disminuyan presentado una reducción en el consumo de agua fresca.

- 7) Una vez obtenidas las demandas de agua de enfriamiento y calentamiento del estudio de eficiencia de energía se puede usar la tecnología pinch de agua para lograr mayores ahorros de agua y por consiguiente obtener una reducción en la descarga de agua residual.
- 8) Se pueden emplear técnicas de optimización y particularmente el modelo expandido de transbordo mencionado en el capítulo 2, punto 2.4, para encontrar el flujo mínimo de agua requerido y con ello obtener el mejor arreglo de redes de intercambio de agua.

GLOSARIO DE TERMINOS

A	Arrastre, Flujo de agua
ABMA	American Boiler Manufacturers Association
AIE	Agencia Internacional de Energía
ASM	Agente de separación de Masa
ASME	American Society of Mechanical Engineers
b	Ordenada al origen
c	Costo unitario
C	Concentración de contaminante
Ca	Calcio
Cl	Cloruros
CNA	Comisión Nacional del Agua
CO ₂	Dióxido de Carbono
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DIC	Diagrama de Intervalo de Concentraciones
DQO	demanda química de oxígeno
E	Evaporación
<i>et. al.</i>	Abreviación de la frase del latín “et alii” que significa “y otros”
<i>f</i>	Flujo de agua
G	Flujo Másico de la Corriente Rica
hr	hora
IMP	Instituto Mexicano del Petróleo
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología de Agua
L	Flujo Másico de la Corriente Pobre
<i>m</i>	Carga Másica de contaminante, pendiente
M	Agua de Reposición / Suministro o Carga Másica
Mg	Magnesio
MMSCFD	Millones de pies cúbicos estándar por día
N	Numero consecutivo (Intervalos, corrientes, etc)
Na	Sodio
NRA	Nacional Rivers Authority
NO _x	Óxidos de Nitrógeno
OH	Hidróxido
P	Purga
PEMEX	Petróleos Mexicanos
pH	Potencial de Hidrógeno
PL	Programación Lineal
PLME	Programación Lineal de Mezcla de Enteros
ppm	Partes por millón
Proc	Proceso
Q	Calor Trasferido
R	Carga Másica Residual, Relación de Remoción
SO ₄	Sulfatos
TDS	Sólidos Disueltos Totales

Ton	Toneladas métricas
UDA	Unidad de Desmineralización
V	Vapor Generado
vs	Versus
W	Flujo de Agua de Enfriamiento
x	Composición de la corriente pobre
y	Composición del la corriente rica
z	Función objetivo
\$	Pesos (Mexicanos)

Símbolos y Letras Griegas

Δ	Delta (Diferencia salida-entrada)
\$	Pesos (Mexicanos)
ε	Diferencia mínima de composiciones operación-equilibrio
0, 1, 2, 3, ...	Numero de Corriente, operación o intervalo
C*	Contaminante de Referencia
m*	Carga másica de Referencia

Subíndices

A, B, C, ...	Contaminante A, B, C, ...
AC	Agua Cruda
CA	Corrientes de Agua
CP	Corrientes de Proceso
ENT, ent	Entrada
int	Intervalo
i	Componente, Intervalo u operación
j	Componente, Intervalo o Contaminante
k	Intervalo
l	Componente, Intervalo o Contaminante
L	Fijo
lim	Limitante
max	Máxima (o)
n, m	Numero de fuente de agua fresca n, m
PERD	Pérdida
POT	Agua potable
REGEN	Regeneración
SA	Suministro de Agua
SAL, sal	Salida

Superíndices

<i>ent</i>	Entrada
<i>L</i>	Cota Inferior (Lower)
<i>max</i>	Máxima (o)
<i>P</i>	Pobre
<i>R</i>	Rica
<i>S</i>	Suministro
<i>sal</i>	salida
<i>T</i>	Objetivo (Target)
<i>U</i>	Cota Superior (Upper)
<i>W</i>	Conjunto de fuentes de agua fresca

REFERENCIAS

- Altamirano J. A. & Gonzalez G.
Diseño de Redes de Intercambio Térmico Aplicando el Criterio del Punto de División de Umbral,
Revista del Instituto Mexicano del Petróleo, Octubre-Diciembre, XXIII (4), 60-66, 1990
- Alva-Argáez, A., Kokossis, A. C., & Smith, R.
Wastewater minimisation of industrial systems using an integrated approach.
Computers & Chemical Engineering, 22 (Suppl.), S741–S744, 1998.
- Arriola-Medellín A., Gutiérrez-González E.,
El análisis de pliegue (pinch analysis) una técnica de integración energética de proceso,
Boletín IIE Julio-Agosto, www.iie.org.mx/publica/boljul96/aplitech.htm, 1996
- Atkins Consultants Ltd,
Reducing water and effluent costs in PCB manufacture,
Envirowise, 2001.
- ATLAS Project, Industru, Process Integration,
http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/homeu.html.
- Bagajewicz M.,
A Review of Recent Design Procedures for Water Networks in Refineries and Process Plants.
Computers & Chemical Engineering, 24, 2093–2113, 2000
- Belhateche, D. H.,
Choose appropriate wastewater treatment technologies.
Chemical Engineering Progress, August, 32, 1995
- Benko, N., Rev, E., Szitkai, Z., & Fonyo, Z.,
Optimal water use and treatment allocation.
Computers & Chemical Engineering, 23 (Suppl.), S589–S592, 1999
- Buehner F. W. & Rossiter A. P.,
Minimize Waste by Managing Process Design.
CHEMTEC, April, 64-72, 1996
- Byers B.,
Zero Discharge: A Systematic Approach to Water Reuse.
Chemical Engineering, July, 96-100, 1995

- Castro P., Matos H., Fernandes, M. C., Nunes C. P., Improvements for mass-exchange networks design, *Chemical Engineering Science*, 54, 1649-1665, 1999
- Comisión Nacional del Agua, Compendio Basico del Agua en México, CNA, México D.F., 2003
- Comisión Nacional del Agua, Estadísticas del Agua en México, Síntesis, México, CNA, 2005
- Comisión Nacional del Agua, Perspectivas del agua en México, México D. F., 2001.
- National Academy of Sciences, Committee on Challenges for the Chemical Sciences in the 21st Century, National Research Council, *The Environment*, National Academy of Sciences, 2003
- National Academy of Sciences, Committee on Challenges for the Chemical Sciences in the 21st Century, National Research Council, *Beyond the Molecular Frontier: Challenges for Chemistry and Chemical Engineering*, National Academy of Sciences, 2003
- DeSilva F., Tips for Process Water Purification, *Chemical Engineering*, August ,72-82, 1996
- Diepolder, P., Is 'zero discharge' realistic? *Hydrocarbon Processing*, October, 1992
- Dhole, V. R., Ramchandani N., Tainsh, R. A., & Wasilewski, M., Make your process water pay for itself. *Chemical Engineering*, January, 100, 1996
- Douglas, J. M., *Conceptual design of chemical processes*. New York: McGraw-Hill, 1988
- Doyle, S. J., & Smith, R., Targeting water reuse with multiple contaminants. *Transactions of International Chemical Engineering, Part B*, 75(3), 181–189, 1997

- Eastwood A. R., Tainsh R. A. & Fien G. -J.,
Minimising Wastewater Emissions using WaterPinch™ Analysis.
Technical White Paper. Linnhoff March, 6 August, 1998
- El-Halwagi,
Pollution Prevention via process Integration, Systematic Design Tools,
Academic Press, USA, 1997
- El-Halwagi, M. M., & Manousiouthakis, V.,
Mass exchanger networks.
American Institute of Chemical Engineering Journal, 35(8), 1233, 1989
- El-Halwagi, M. M., & Manousiouthakis, V.,
Automatic synthesis of mass exchanger networks with single component targets.
Chemical Engineering Science, 45(9), 2813, 1990
- El-Halwagi M. M. & Spriggs H. D.,
Solve Design Puzzles with Mass Integration.
Chemical Engineering Progress, August, 25-44, 1998
- Fraser D. M. & Hallale N.,
Retrofit of Mass Exchange Networks Using Pinch Technology,
American Institute of Chemical Engineering Journal, October, 46(10), 2112-2117, 2000
- Galán, B., & Grossmann, I. E.,
Optimal design of distributed wastewater treatment networks.
Industrial & Engineering Chemistry Research, 37, 4036, 1998
- Goldblatt, M. E., Eble, K. S., & Feathers, J. E.,
Zero discharge: what, why, and how.
Chemical Engineering Progress, April, 22, 1993
- Gundersen Truls,
“A process Integration PRIMER”,
International Energy Agency, SINTEF Energy Research 2nd version, 22 November, 2002
- Gundersen Truls,
“A Process Integration Primer”,
International Energy Agency, 3rd and Final version, 9 April,
<http://www.tev.ntnu.no/iea/pi/,2002>
- Hallale N.,
“Burning bright trends in process integration”,
Chemical Engineering Progress, July, pp 30-41, 2001

- Hallale N. & Fraser D. M.,
Capital Cost Targets for Mass Exchange Networks. A Special Case: Water Minimisation,
Chemical Engineering Science, 53 (2), 293-313, 1998
- Hamilton R. & Dawson D.,
Pinch Cleans Up.
The Chemical Engineering, 26 May, 42, 1994
- Hilaly, A. K., & Sikdar, S. K.,
Process simulation tools for pollution prevention.
Chemical Engineering, January, 98, 1996
- Huang, C.-H., Chang, C.-T., Ling, H.-C., & Chang, C.-C.,
A mathematical programming model for water usage and treatment network design.
Industrial & Engineering Chemistry Research, 38, 2666, 1999
- Kuo, W. C. J., & Smith, R.,
Effluent treatment system design.
Chemical Engineering Science, 52(23), 4273, 1997
- Kuo, W.-C. J., & Smith, R.,
Designing for the interactions between water-use and effluent treatment.
Transactions of International Chemical Engineering Part A, 76, 287–301, 1998
- Kutepov A. M., Meshalkin V.P., Nevskii A. V.,
“Modified Water Pinch Method for Designing Resource-Efficient Chemical Engineering Systems”,
Doklady Chemistry, Vol 383, No. 4-6, 2002
- Linnhoff B.,
Pinch Analysis –A State –of-the-Art Overview.
Transactions of the Institution of Chemical Engineers, September, Part A, 75, 503-522, 1993
- Linnhoff B.,
Use Pinch Analysis to Knock Down Capital Costs and Emissions.
Chemical Engineering Progress, August, 32-57, 1994
- Linnhoff B.,
Introduction to Pinch Technology.
Linnhoff March, 1998
- Linnhoff B., Townsend, D. W., Boland D., Hewitt G. F., Thomas B. E. A., Guy A. R. & Marsland R. H.,
A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy.
The Institution of Chemical Engineers, Rugby, England, 1982

- Linnhoff, B., & Hindmarsh, E.,
The pinch design method for heat exchanger networks.
Chemical Engineering Science, 38(5), 745, 1983
- Linnhoff B., Tainsh R. A. & Kumana J. D.,
Intelligent Networking of Process Wastewater Streams in the Chemical Industry.
White Paper. Linnhoff March, 5 August, 1998
- Mann, J. G., & Liu, Y. A.,
Industrial water reuse and wastewater minimization.
New York: McGraw Hill, 1999
- Moore S.,
Pinch Technology: It's not Just for Energy Anymore.
Chemical Engineering, August, 47-48, 1995
- Olesen, S. G., & Polley, S. G.,
A simple methodology for the design of water networks handling single contaminants.
Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part A, 75, 1997
- O'Reilly A. J.,
Waste Water Treatment Process Selection: An Industrial Approach.
Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B, November, 78, 454-464, 2000
- Peters J.,
Process Technology Winner: Water-Monsanto and Linnhoff March,
The Chemical Engineering, 25 May, 54, 1995
- Polley G. T. & Amidpour M.,
Design of Networks with Imposed Match Constraints.
www.pinchtechnology.com, April, 1-12, 2001
- Rosain R. M.,
Reusing Water in CPI Plants.
Chemical Engineering Progress, April, 28-35, 1993
- Rossiter, A. P.,
Waste minimization through process design.
New York: McGraw-Hill, 1995
- Rossiter A. P., Spriggs H. D. & Klee H.,
Apply Process Integration to Waste Minimization.
Chemical Engineering Progress, 30-36, 1993

- Smith R. & Linnhoff B.,
The Design of Separators in the Context of Overall Processes.
Chemical Engineering Research & Design, 66, 195-228, May 1988
- Smith Robin,
Chemical Process design,
McGraw-Hill, 1995
- Smith Robin,
“State of the art in process integration”
Applied Thermal Engineering, 20, pp 1337-1345, 2000
- Smith R. & Petela E. A.,
Waste Minimisation in the Process Industries, Part 1: The Problem.
The Chemical Engineer, 31 October, 506, 24-25, 1991
- Smith R. & Petela E. A.,
Waste Minimisation in the Process Industries, Part 2: Reactors.
The Chemical Engineer, 12 December, 509-510, 17-23, 1991
- Smith R. & Petela E. A.,
Waste Minimisation in the Process Industries, Part 3: Separation and Recycle Systems.
The Chemical Engineer, 13 February, 513, 24-28, 1992
- Smith R. & Petela E. A.,
Waste Minimisation in the Process Industries, Part 4: Process Operations.
The Chemical Engineer, 9 April, 517, 21-23, 1992
- Smith R. & Petela E. A.,
Waste Minimisation in the Process Industries, Part 5: Utility Waste.
The Chemical Engineer, 16 July, 523, 32-35, 1992
- Smith R., Petela E. & Wang Y. P.,
Water, water everywhere...
The Chemical Engineering, 12 May, 21-24, 1994
- Sowa, C. J.,
Explore waste minimization via process simulation.
Chemical Engineering Progress, November, 40, 1994
- Takama, N., Kuriyama, T., Shiroko, K., & Umeda, T.,
Optimal water allocation in a petroleum refinery.
Computers & Chemical Engineering, 4, 251-258, 1980

- Tripathi P.,
Pinch Technology Reduces Wastewater,
Chemical Engineering, November, 87-90, 1996
- Tor-Martin Tveit,
“Simulation, experimental design and mathematical programming for retrofit improvements to large scale thermal energy systems”,
Licentiate Thesis, Helsinki University of Technology, Department of Mechanical Engineering, Energy Engineering and Environmental Protection, 2003
- Wang, Y. P., & Smith, R.,
Wastewater minimization.
Chemical Engineering Science, 49(7), 981, 1994a
- Wang, Y. P., & Smith, R.,
Design of distributed effluent treatment systems.
Chemical Engineering Science, 49(18), 3127, 1994b
- Wang, Y. P., & Smith, R.,
Wastewater Minimization with Flow rate Constraints.
Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part A, 73, 889–904, 1995
- Wang Y. P. & Smith R.,
Time Pinch Analysis.
Transactions of the Institution of Chemical Engineers, November, Part A, 73, 905–914, 1995
- Wood, R. M., Wilcox, R. J., & Grossmann, I. E.,
A note on minimum number of units heat exchanger network synthesis.
Chemical Engineering Communications, 39, 371, 1985
- Reduce - Reuse – Recycle The Waste Hierarchy,
<http://www.dundee.gov.uk/waste/hierarchy.htm>