

199



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

MINIMIZACION DEL CONSUMO DE AGUA EN UN
PROCESO TIPICO DE REFINACION

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A :

ARTURO SANCHEZ VAZQUEZ



MEXICO, D.F.

2001

ENRIQUE
FACULTAD



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE Prof. CELESTINO MONTIEL MALDONADO
VOCAL Prof. PEDRO ROQUERO TEJEDA
SECRETARIO Prof. JOSE FERNANDO BARRAGÁN AROCHE
1er sup. Prof. MARTÍN RIVERA TOLEDO
2do. sup. Prof. ALFONSO DURÁN MORENO

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA

INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO

Y

LABORATORIO DE SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS

ASESOR DE TEMA




ING. CELESTINO MONTIEL MALDONADO

SUPERVISOR TÉCNICO



IQUI MARCO A. OSORIO BONILLA

SUSTENTANTE



ARTURO SANCHEZ VAZQUEZ

DEDICATORIAS

A: MI ABUELITA GUADALUPE
POR HABER SIDO ALGUIEN MUY
IMPORTANTE EN MI VIDA

A: MIS PADRES
POR HABERME APOYADO Y HABERME
BRINDADO SU CONFIANZA Y SU
CARIÑO DURANTE TODOS ESTOS AÑOS

A: MIS PROFESORES
POR HABERME INDICADO EL CAMINO

A: MI TIA GUADALUPE
POR APOYARME A MI Y A MI
FAMILIA EN TODO MOMENTO

A: TODAS AQUELLAS PERSONAS
QUE AYUDARON A QUE YO LLEGARA
HASTA ESTE PUNTO DE MI VIDA.

A: L. C. S. G. P
GRACIAS POR TODO TU APOYO

AGRADECIMIENTOS

AL I.Q.I. MARCO A. OSORIO BONILLA POR HABERME ASESORADO EN LA ELABORACIÓN DEL TRABAJO

AL M. C. CELESTINO MONTIEL MALDONADO POR AYUDARME A CONCLUIR LA TESIS

AL I. M. P. POR HABERME DADO LAS HERRAMIENTAS PARA FINALIZAR EL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.

A LA U. N. A. M. POR HABERME BRINDADO UNA EDUCACIÓN.

INTRODUCCIÓN.....	7
CAPÍTULO I GENERALIDADES	9
1.1 NUEVAS TENDENCIAS Y CAMBIOS EN LA GESTIÓN DEL AGUA EN MÉXICO.....	11
1.2 EL PROBLEMA AMBIENTAL Y LA PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN.....	12
CAPÍTULO II FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	15
2.1 TECNOLOGÍA DE PINCH DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	17
2.2 REPRESENTACIÓN DE UNA OPERACIÓN CONSUMIDORA DE AGUA.....	18
2.3 OPERACIONES CONSUMIDORAS DE AGUA VISTAS COMO UN PROBLEMA DE TRANSFERENCIA DE MASA.....	19
2.4 MÉTODOS GRÁFICOS PARA CASOS DE UN SOLO CONTAMINANTE.....	23
2.5 MINIMIZACIÓN DE AGUA MEDIANTE REÚSO, MANN Y LIU (1999).....	31
2.6 MÉTODOS ALGORÍTMICOS	36
CAPÍTULO III APLICACIONES DE LAS METODOLOGÍAS DE TRANSFERENCIA DE MASA	41
3.1 RECUPERACIÓN DE BENCENO DE EMISIONES GASEOSAS EN LA PRODUCCIÓN DE POLÍMEROS. METODOLOGÍA DE EL-HALWAGI (1997)	42
3.2 METODOLOGÍA DE JAMES G. MANN e Y. A. LIU (1999).....	49
3.3 MÉTODOS ALGORÍTMICOS	53
3.4 METODOLOGÍA PARA EL CASO MULTICONTAMINANTES	57
3.5 MÉTODO ALGORÍTMICO PARA EL CASO MULTICOMPONENTE.....	69
CAPÍTULO IV COMPARACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE TRANSFERENCIA DE MASA	79
4.1 COMPARACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE MANN Y LIU (1999) PARA UN EJEMPLO DE EL-HALWAGI (1997)	80

4.2 COMPARACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE EL-HALWAGI PARA UN EJEMPLO DE MANN Y LIU (1999).	82
CAPITULO V APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A UN ESQUEMA TÍPICO DE REFINACIÓN	86
CONCLUSIONES.....	104
BIBLIOGRAFÍA.....	108
APÉNDICE A.....	111
ANEXO I.	115
ANEXO II.....	120

INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial de los últimos siglos ha sido muy acelerado y ha generado diversas problemáticas que deben ser enfrentadas por los Ingenieros Químicos para encontrar una solución rápida y definitiva, dentro de las problemáticas que han surgido se encuentran dos que han adquirido magnitudes alarmantes y que están poniendo en riesgo la supervivencia de la especie humana, uno es el problema de la contaminación ambiental, y otro es el uso desmedido de los recursos naturales.

Con el fin de disminuir y en la manera de lo posible eliminar estos riesgos, la ingeniería química ha enfocado sus propósitos a colaborar en la solución de estos problemas, proponiendo metodologías para un uso eficiente de los recursos naturales y en particular disminuir el consumo de agua.

El agua, es usada en la industria de proceso en gran cantidad ya sea como agua de proceso o como agua de servicio, y posteriormente en el mejor de los casos el agua utilizada es enviada a un tratamiento, o en muchas industrias es desechada directamente al medio ambiente causando un severo impacto en los seres vivos

En la actualidad muchos países han establecido leyes y regulaciones para la disposición de aguas de desecho industrial lo cual a su vez origina costos adicionales que se cargan a los costos de producción, un ejemplo de lo anterior es la NOM-001-ECOL-1996 establecida en México, que regula las descargas de desechos industriales a mantos acuíferos y cuyo incumplimiento causa severas multas a las industrias.

Uno de los propósitos al que se han evocado algunos ingenieros es encontrar una metodología cuya aplicación nos permita minimizar el consumo de agua mediante la reutilización de la misma dentro de un proceso, lo cual significa, utilizar el agua que sale de un proceso para satisfacer la demanda de agua de otro, lo anterior con el fin de conseguir una disminución en el consumo de agua total del proceso.

Este trabajo tiene como objetivo investigar y adaptar una metodología, que nos permite disminuir el consumo de agua de proceso, como aplicación específica a un esquema típico de refinación tomando como base datos de las plantas: Planta Combinada No. 1, Planta Catalítica, Planta Hidrodesulfuradora de Destilados Intermedios y Planta Hidrodesulfuradora de Naftas, obtenidos de una refinería modelo.

La aplicación de la metodología en el esquema de refinación disminuya el consumo de agua en los procesos señalados ya que un flujo menor de agua será suficiente para satisfacer los requerimientos, logrando de esta forma abatu los costos de tratamiento posteriores que sufre el agua y su consiguiente desecho al medio ambiente.

El presente trabajo, además de mostrar una nueva herramienta que ayuda a enfrentar el problema de consumo de agua, también tiene como finalidad establecer una pauta para que el método sea aplicado en cualquier industria que utilice agua dentro de sus procesos, y así crear una conciencia de ahorro de agua que beneficiará tanto social como económicamente a las empresas.

CAPÍTULO I
GENERALIDADES

La escasez creciente del agua, su uso irracional y explotación es un problema prioritario que la generación presente debe resolver a la brevedad. La relación poco equitativa entre el uso del agua, su evaluación económica y su apreciación ecológica y ambiental nos está conduciendo a una situación difícilmente manejable.

Históricamente al agua se le ha considerado como un don o un bien público casi gratuito. Ello nos lleva a la necesidad urgente de evaluar económicamente, y en sus justos términos, al ambiente. Al fallar el mercado en hacer explícitos los valores y servicios que proveen los recursos naturales, éstos se ofrecen en forma "gratuita" generándose una diferencia entre la valoración privada y la social de los mismos.

En términos generales, en la cuestión del suministro de agua potable y en el manejo de las aguas residuales se ha actuado con una visión de corto alcance. La cuestión ambiental y ecológica, así como de protección de cuencas y ecosistemas, ha sido bastante marginada. La cuestión del agua no debe estudiarse desligando a los demás asuntos y problemas concernientes al medio ambiente y a la disponibilidad de los recursos naturales.

La senda del desarrollo económico seguida en este siglo ha afectado drásticamente la cantidad y calidad de las fuentes de agua. De continuar por este mismo camino, en las próximas décadas habrá una enorme disparidad entre la demanda y la disponibilidad del agua. Existe el riesgo de que se produzca una crisis del agua a escala mundial que se expresaría, por ejemplo, en sequías prolongadas que contribuirían a la degradación de suelos, tierras cultivables y bosques. Incluso a la misma desaparición de los cuerpos de agua. Esto podría producir un déficit importante en la producción de alimentos y energía, afectando severamente la economía y la población de los países.

Un ejemplo de esta situación es lo que ocurre en los mantos acuíferos del Valle de México, explotado para cubrir las necesidades de agua potable de la población de la zona metropolitana de la Ciudad de México. Las principales consecuencias han sido el abatimiento de los niveles de agua, el hundimiento del terreno en una parte importante de la zona, el deterioro de la calidad del líquido, así como un aumento de la vulnerabilidad de los mantos acuíferos por la contaminación.

Otro importante asunto es la degradación de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. Uno de los principales problemas es la descarga directa de aguas contaminadas de origen doméstico, industrial y agrícola en cuerpos de agua, que a su vez son utilizados por la población para cubrir sus necesidades de abastecimiento. Once de las 34 cuencas que abastecen de agua al país están fuertemente contaminadas por descargas de aguas residuales, fundamentalmente, urbanas e industriales. Se estima que el 91% de la carga contaminante se genera en 31 cuencas. Sin embargo, en cuatro de ellas (Ierma, Pánuco, San Juan y Balsas), se reciben aproximadamente la mitad de las aguas residuales de todo el país.

Según datos del Instituto Nacional de Estadística, Geográfica e Informática, de los 145 605 litros por segundo de aguas residuales (urbanas e industriales) que se generan en el país, 41 495 l/s corresponden a la zona metropolitana de la Ciudad de México, 7 135 a la zona metropolitana de Monterrey y 5 658 a la de Guadalajara. Igualmente, la determinación de la carga contaminante de las aguas residuales ha sido definida a partir de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y se

han clasificado los estados de la República en función de la magnitud de sus descargas de origen urbano e industrial. Es así como Veracruz presenta descargas que representan el 16% del total nacional, de los cuales la mayoría son de origen industrial y el resto urbano. Después sigue en niveles de carga contaminante el Distrito Federal con 15%, de los cuales la mayoría son de origen urbano. Luego está Jalisco con 12%, donde la descarga más importante corresponde a la de origen industrial. Los principales giros responsables de las mayores descargas de aguas residuales son la azucarera, con el 39% del total, la química con el 21% y la industria del papel y celulosa con el 6%. Las que corresponden a la industria petroquímica, bebidas, textil, siderurgia, eléctrica y alimentos, representan el 16%.

En síntesis, los problemas de calidad y cantidad del agua motivan el estudio de mejores formas para manejar el recurso y promover su uso racional, ya que es indispensable para cualquier actividad humana. Además, es básico que todos los sectores, y en particular las instituciones gubernamentales y educativas, realicen esfuerzos y asignen recursos que contribuyan a la definición de acciones concretas de corto plazo, que atiendan los problemas descritos y, con ello, se evite llegar a una crisis de cantidad y calidad del agua.

1.1 NUEVAS TENDENCIAS Y CAMBIOS EN LA GESTIÓN DEL AGUA EN MÉXICO

Al finalizar el siglo XX se manifiestan en el mundo diversas tendencias acerca de la gestión del agua. Una primera tendencia que se percibe en el mundo, es el reconocimiento de las cuencas hidrográficas como los territorios más apropiados para conducir los procesos de manejo, aprovechamiento, planeación y administración del agua y, en su sentido más amplio y general, como los territorios más idóneos para llevar a cabo su gestión.

Una segunda es el reconocimiento de que el agua debe ser vista integralmente en sus diversos usos, conciliando en cada cuenca su oferta disponible con las demandas y necesidades. En este sentido, hay consenso en que se debe priorizar el conocimiento y cuantificación de las disponibilidades de las aguas subterráneas y de las superficiales; alentar los usos más eficientes y los métodos ahorradores de agua en la agricultura y en el resto de los sectores, y atender la contaminación de las corrientes y cuerpos receptores porque afectan y compromete gravemente la sustentabilidad del recurso

Una tercera tendencia, es la organización de los gobiernos por cuenca hidrográfica para atender los problemas asociados a la distribución y administración de las aguas. Actualmente existen en todo el mundo foros y redes internacionales de organismos que intercambian experiencias y antecedentes sobre: técnicas de administración de dicho recurso, formulación y ejecución de planes hidráulicos, y formas de valorar y cuantificar los costos asociados a su aprovechamiento.

Dentro de las grandes tendencias que se observan a nivel mundial, cabe destacar el consenso existente de que tanto el agua como los procesos de gestión que le son propios, no pueden estar solo en manos gubernamentales, sino que, por el contrario, requieren de la activa presencia y la participación de los usuarios y de la sociedad.

Con el fin de modernizar, hacer más eficaz su intervención y cumplir los mandatos y facultades que la Constitución y la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento le otorgan en materia de aguas, el gobierno federal ha emprendido la implantación de una estrategia muy amplia y general que tiende a la reforma profunda del sector hidráulico y al cambio de sus formas convencionales de actuación.

Dicha estrategia contempla, entre otras cosas, la creación y consolidación de trece gerencias regionales en donde se desconcentrarán las tareas, funciones y facultades a cargo de la Comisión Nacional del Agua y en donde se atenderán todos los asuntos de competencia federal en el ámbito de sus respectivos territorios. A nivel estatal, la organización regional de la Comisión Nacional del Agua se complementará con oficinas más pequeñas que servirán de enlace con los gobiernos estatales y llevarán los trámites de administración de las aguas nacionales. Igualmente, contempla la federalización de programas, funciones y recursos que hasta los últimos años venían siendo ejecutados o ejercidos de manera centralizada. En el futuro estarán cada vez más en poder de las instancias gubernamentales, estatales y municipales y directamente en manos de los usuarios del agua.

El objetivo de lo anterior es que se contribuya a la formulación y ejecución de programas que mejoren la administración de las aguas nacionales, se desarrolle la infraestructura hidráulica necesaria en las cuencas, y que sirva como incentivo para su conservación y restauración

1.2 EL PROBLEMA AMBIENTAL Y LA PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN

El impacto ambiental es uno de los problemas más importantes a los que la industria química se enfrenta en la actualidad. En los Estados Unidos solamente, se estima que se generan un total de 12 billones de toneladas de desperdicios industriales por año. La enorme magnitud de desechos industriales ha logrado un crecimiento de la conciencia sobre las graves consecuencias de la descarga de desechos en el medio ambiente y esto ha llevado a los procesos industriales a ser más “ambientalistas” y adoptar un papel más conciente referente al cuidado del medio. En las últimas dos décadas, los esfuerzos por prevenir los desechos industriales han cambiado gradualmente de una mentalidad de tratamiento de desechos a una conducta más decidida por disminuir los desechos mediante procesos más eficientes.

En los años 70 la actividad ambiental de los procesos industriales se basaba principalmente en un tratamiento al final del proceso “end-of-the-pipe”; este método consistía en instalar unidades controladoras de contaminación que pudieran reducir la carga o toxicidad de las corrientes a niveles más aceptables. La mayoría de éstas unidades utilizaban técnicas de conversión (ejemplo, incineración o biotratamiento) que transformaban a los contaminantes en sustancias más benignas

En los 80, las industrias que manejaban procesos químicos se interesaron fuertemente en implementar técnicas de reciclaje/reúso, en las cuales los contaminantes son recuperados de una corriente terminal (usando generalmente procesos de separación) para reusarlos o venderlos, esta tendencia creó otra mentalidad en la industria, ya que logró que se considerara a las corrientes de desecho como fuentes valiosas de materia prima que puede traer beneficios económicos a las industrias

En la actualidad, el término “prevención de contaminación”, se refiere a cualquier actividad que esta encaminada a reducir, hasta los límites máximos, la producción de sustancias indeseables que puedan causar algún daño en el ambiente.

Existen cuatro estrategias, encaminadas a la reducción de desechos dentro de los procesos. Estas estrategias se encuentran numeradas en orden de importancia según su utilidad para disminuir los desechos generados en una industria:

1.- *Reducción de la fuente* incluye cualquier acción dentro de la planta para reducir la cantidad o toxicidad del contaminante en la fuente. Algunos ejemplos incluyen modificaciones en los equipos, diseño y cambios operacionales en los procesos, reformulación o rediseño de productos, sustitución de materiales fuertes, y uso de reacciones químicas más benignas para el habiente.

2 - *Reciclaje/Reúso* envuelve el uso de corrientes tratadas dentro de un proceso. Típicamente se utilizan tecnologías de separación para retirar sustancias “claves” en un sistema de reciclaje/reúso, estas sustancias claves son materiales valiosos como solventes, metales, sustancias inorgánicas y agua.

3 - *Tratamientos terminales (end-of-pipe)*, se refiere a la aplicación de procesos químicos, biológicos y físicos para reducir la toxicidad o volumen de contaminantes en los flujos de salida. Algunos ejemplos de tratamiento incluyen sistemas biológicos, precipitación química, floculación, coagulación e incineración.

4 - *Confinamiento* envuelve a las actividades postproceso que tienen como fin la ubicación de materiales peligrosos bajo condiciones seguras.

En forma particular, el presente trabajo se enfoca en el *Reciclaje/Reúso* del agua como un medio eficaz para disminuir la producción de desechos industriales. Lo anterior se lleva a cabo mediante el establecimiento de una metodología relativamente reciente que tiene como base la transferencia de masa que se da entre las corrientes de un proceso. Dicha metodología tiene sus orígenes en el “*PINCH DE TRANSFERENCIA DE CALOR*” (Linnhoff 1978, 1983) y sigue un procedimiento semejante al que propone ésta técnica de optimización.

El “*PINCH DE TRANSFERENCIA DE MASA*” (Mann, Liu 1999, Smith 1994, El-Halwagi 1997) que es como llamaremos a la técnica que se desarrollará en el presente trabajo, coincide con su similitud de transferencia de calor (Linnhoff 1983) en que se busca un punto en donde el contacto entre dos curvas (curvas compuestas) sea menor y por consiguiente se obtiene un punto de transferencia máximo que nos permite la reutilización de una corriente, si es en el caso de pinch de transferencia de calor, una corriente de proceso que puede ser utilizada para calentar o enfriar otra, ó en el caso de el pinch de transferencia de masa, la reutilización de una corriente de agua proveniente de un proceso para alimentar a otro.

Otra característica similar es que las condiciones de equilibrio de las corrientes son las que van a establecer la posibilidad de reúso de las mismas, esto es, en el caso del pinch de transferencia de calor, lo esencial es la carga térmica que tiene cada corriente y es lo que permite su utilización para calentar o enfriar otra corriente, a su vez, en el caso del pinch de transferencia de masa, la

concentración de una corriente de agua es lo que permitirá su reutilización dentro de un proceso determinado.

A pesar de que la metodología es aplicada a un esquema de refinación, sus aplicaciones pueden extenderse a cualquier tipo de industria cuyos procesos utilicen agua, ya que el objetivo final del desarrollo de ésta nueva metodología es encontrar una herramienta que ayude a los ingenieros a disminuir el consumo de agua en los procesos industriales y por consiguiente disminuir los gastos de operación.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE MASA

Una herramienta desarrollada recientemente utilizando los fundamentos de la tecnología pinch de transferencia de calor es la *INTEGRACIÓN DE REDES DE INTERCAMBIO DE MASA* (Mann, Liu 1999, Smith 1994, El-Halwagi 1997). Dicha herramienta nos permite incrementar la prevención de contaminación, recobramiento de recursos y la reducción de desperdicios. El-Halwagi (1997) en su libro más reciente: *Pollution Prevention through Process Integration: Systematic Design Tools*, define a la “Integración de Redes de Intercambio de Masa” como: “Una metodología sistemática que permite visualizar el flujo de masa dentro de un proceso, lo cual nos permite optimizar la generación y rutas de sustancias de importancia a través de dicho proceso”.

En una forma simple, un problema de “integración de redes de intercambio de masa”, consiste en la transferencia de masa que se da dentro en un proceso industrial, entre una corriente rica (a la que se le desea disminuir su concentración) y una corriente pobre (a la que se desea incrementar su concentración), de tal manera que cada corriente alcanza una concentración deseada a la salida.

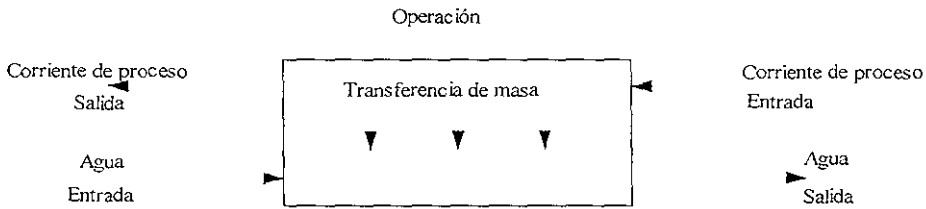


Fig 2.1

Para llevar a cabo el intercambio de masa se necesita “un Agente de Separación de Masa” (ASM) que no es más que una sustancia que se utiliza para retirar otra sustancia de un flujo de proceso determinado ya sea por cuestiones ambientales o económicas, algunas operaciones de intercambio de masa incluyen:

- Absorción, en donde un solvente líquido es usado para remover ciertos compuestos de un gas basándose en su solubilidad. Algunos ejemplos de absorción son, desulfuración de un flujo de gas utilizando soluciones alcalinas o etanolaminas, recobrar sustancias orgánicas volátiles utilizando aceites ligeros y remoción de amoníaco utilizando agua.
- Adsorción, que utiliza la habilidad de adsorbencia de los sólidos para adsorber componentes específicos de una solución líquida o gaseosa. Algunos ejemplos son usar carbon activado para remover mezclas de benceno/tolueno/xileno de aguas subterráneas, la separación de cetonas de desechos acuosos en una refinería de petróleo, y recobrar solventes orgánicos de gases gastados de la manufacturación de polímeros

- Extracción, se emplea un solvente líquido para remover ciertos compuestos de otro líquido usando las características de solubilidad de los solutos, por ejemplo, aceite de lavado puede ser usado para remover fenol y bifenoles policlorados de desechos acuosos de plantas de combustible sintético, o hidrocarburos clorados de aguas de desecho.
- Intercambio iónico, se utilizan resinas con propiedades de catión o anión, para remplazar sustancias aniónicas no deseadas en una solución líquida con iones no peligrosos. Por ejemplo, resinas de intercambio catiónico pueden tener iones positivos móviles y no peligrosos (sodio, hidrógeno) que se añaden a grupos ácidos inmóviles (sulfónico o carboxílico). De forma similar, resinas de intercambio aniónico pueden tener iones negativos no móviles y no peligrosos (hidróxido o cloruro) que se añaden a iones básicos inmóviles (aminas). Estas resinas pueden ser utilizadas para eliminar varias sustancias en aguas de desecho como son: metales disueltos, sulfuros, cianuros, aminas, fenoles, etc.
- Agotamiento, es la desorción de compuestos relativamente volátiles de corrientes líquidas o sólidas usando algún gas como medio de desorción. Como ejemplo se tienen, recuperar compuestos orgánicos volátiles de desechos acuosos utilizando aire, remoción de amoníaco de agua de desecho de plantas de fertilizantes usando vapor, y la regeneración de carbón activado usando vapor o hidrógeno.

2.1 TECNOLOGÍA DE PINCH DE TRANSFERENCIA DE MASA

Como se dijo anteriormente, una extensión de la tecnología “*PINCH*” desarrollada para redes de intercambio de calor, se aplica para procesos donde se lleva a cabo un intercambio de masa entre dos corrientes (que tienen en común por lo menos un tipo de sustancia o contaminante), una llamada “rica” (mayor presencia de un compuesto) y otra “pobre” (menor presencia de el compuesto que se encuentra en la corriente rica). La finalidad de la tecnología es encontrar el flujo mínimo de una corriente (pobre), que logre retirar una cierta cantidad de masa de otra corriente (rica), ya sea para alcanzar los requerimientos de pureza impuestos por las normas ecológicas, para recuperar compuestos que pueden ser reutilizados o para disminuir los consumos de ciertos servicios dentro de un proceso.

En forma específica, en este trabajo se tratará como corriente pobre a un flujo de agua, y como corriente rica un flujo de proceso que tiene una cantidad de contaminantes mayor. Debido al gradiente de concentraciones que se presenta en el momento en que las dos corrientes entran en contacto, el agua retira cierta cantidad de masa de la corriente de proceso adquiriendo a la salida una concentración mayor, por lo tanto se necesita encontrar un punto en donde la concentración retirada sea máxima y por ende, este asociada con un flujo que permita que dicha transferencia de masa sea posible, a este punto se le conoce como “*PINCH DE TRANSFERENCIA DE MASA*” ó “*WATER PINCH*”. Como se puede apreciar éste pinch es muy parecido al obtenido en el análisis de transferencia de calor ya que también busca un punto de referencia que nos diga la factibilidad de reuso de corrientes, que es el fin último que buscan las dos tecnologías. En el siguiente capítulo se explicará en forma más precisa éste nuevo concepto y se ilustrará con varios ejemplos.

Así pues, lo que se busca es encontrar los flujos de agua necesarios para satisfacer los requerimientos de un proceso, así como analizar si el flujo de agua proveniente de un proceso

tiene una concentración que permita su reutilización en otro sin afectar el desarrollo de éste último.

Como resultado de la aplicación de la tecnología “Water-pinch” los ingenieros cuentan con una herramienta de diseño de redes de intercambio de masa que les permite tener un conocimiento claro de los siguientes aspectos.

- Los máximos consumos de agua y el mínimo de desechos que requiere un proceso
- Cuáles son los parámetros que limitan el diseño de una nueva red de consumo de agua o el mejoramiento de una red existente.
- Cuál es el tratamiento mínimo que se le debe dar a una corriente.
- Cómo se puede diseñar un nuevo sistema de tratamiento de corrientes, o mejorar un sistema existente, para alcanzar un rango mínimo de tratamiento.
- Cómo se puede modificar un proceso para maximizar el reúso de agua y minimizar la generación de agua de desperdicio.

Para establecer los parámetros anteriores la tecnología water-pinch esta dividida en tres etapas:

1. *Análisis*: Identificando, a priori, el mínimo consumo de agua fresca y la máxima generación de agua de desperdicio en una operación que utiliza agua (análisis water-pinch).
2. *Síntesis*. Diseñar una red de consumo de agua que permita alcanzar los objetivos de agua fresca y agua de desecho por medio del reúso de agua, regeneración y recicló.

2.2 REPRESENTACIÓN DE UNA OPERACIÓN CONSUMIDORA DE AGUA

En la tecnología “Water-pinch” se define una operación consumidora de agua como una fuente de contaminación que requiere agua. Contaminantes, como se aclarará mas adelante, incluyen componentes físicos como son sólidos suspendidos o sustancias químicas, así como otras propiedades como son: pH, conductividad, etc.

El objetivo principal en un análisis “Water-pinch” es considerar a todas las operaciones consumidoras de agua simultáneamente, a pesar de tratarse de procesos diferentes, así, un simple problema puede involucrar una serie de operaciones que no necesariamente deben ser iguales entre sí, además, existen otros factores como son: límites de solubilidad, reactividad, que pueden limitar el reúso del agua

Cuando se considera el mínimo requerimiento de agua fresca y operaciones de reúso de agua de varias operaciones simultáneas, se debe aplicar un modelo común a cada operación (este modelo se explica con mas detalle en el capítulo siguiente). En forma simple, el modelo representa a la

operación como un contacto a contracorriente entre un flujo de proceso rico en contaminantes y un flujo de agua poco contaminado como se muestra en la figura siguiente:

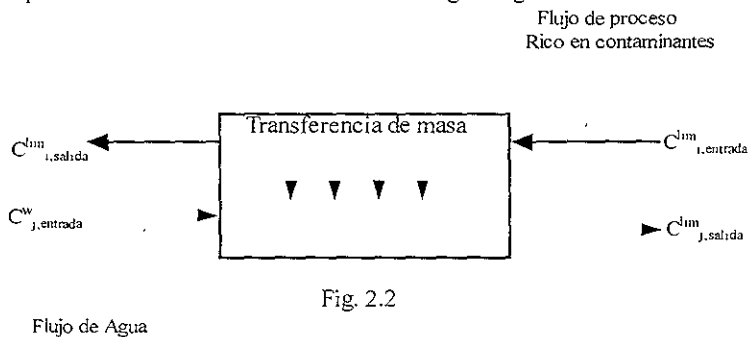


Fig. 2.2

Las condiciones para el reúso del agua son definidas por la corriente de proceso rica en contaminantes, esto es, la corriente de agua debe tener una concentración de contaminantes a la entrada del proceso menor o igual que la concentración de salida de la corriente rica, por lo tanto, la concentración a la entrada y a la salida de la corriente de proceso representa una restricción para entrada y salida del flujo de agua. La restricción de la concentración del contaminante a la entrada o a la salida de una operación que consume agua, va acorde a las restricción que presenta el equilibrio a la salida y a la entrada.

2.3 OPERACIONES CONSUMIDORAS DE AGUA VISTAS COMO UN PROBLEMA DE TRANSFERENCIA DE MASA

Como se dijo anteriormente, un método conveniente para analizar una operación industrial que consume agua es representar la operación como una transferencia de masa de una corriente de proceso rica en contaminantes a una corriente de agua. Los contaminantes pueden ser: sólidos suspendidos, orgánicos, inorgánicos, etc., cuya concentración en el flujo de agua limitan su reúso en otra operación. En este caso, las dos corrientes están en contacto en un arreglo a contracorriente. Como ejemplo tomemos una desaladora de crudo en un proceso de refinación de petróleo; típicamente una desaladora consiste en poner en contacto un flujo de proceso (petróleo) y un flujo de agua, con el fin de remover el exceso de sales que lleva el petróleo, como se muestra en la siguiente figura:

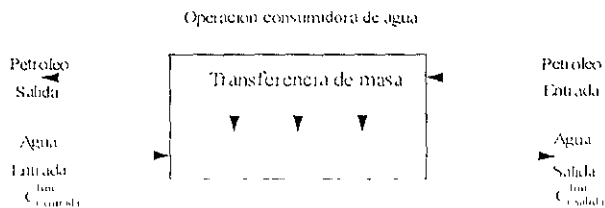


Fig. 2.3

El contaminante, la sal, es transferido de una fase rica en el contaminante (petróleo) a la corriente de agua. En la figura se representan los límites de la concentración del contaminante que puede llevar el agua a la entrada y a la salida del proceso. Solamente se requiere que el flujo de agua entre a la operación a una concentración de contaminante menor que la concentración a la salida de la corriente de proceso ($C_{i,n}^{lim}$) y que el agua deje la operación a una concentración menor que la concentración de entrada de la corriente de proceso ($C_{i,out}^{lim}$).

En muchos casos, una operación consumidora de agua no consiste de un flujo de agua en contacto a una corriente de proceso rica en contaminantes en una unidad a contracorriente. En la mayoría de los casos, podemos representar los límites de concentración en el agua a la entrada y a la salida de la operación que la consume con una "aparente" o "imaginaria" corriente de proceso rica en contaminantes, en otras palabras, una corriente de proceso que represente los límites de concentración para el reúso de agua. Por ejemplo, la siguiente figura, ilustra un sistema de enfriamiento que tiene como contaminante sólidos suspendidos.

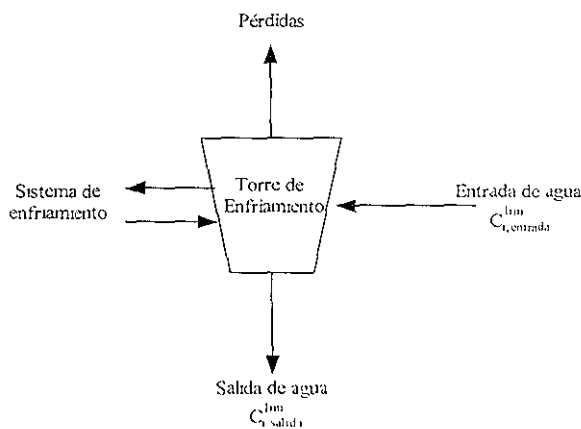
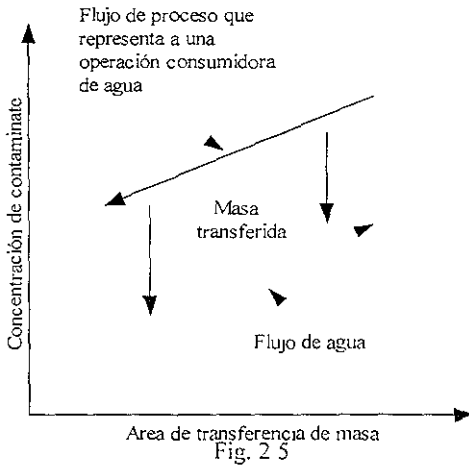


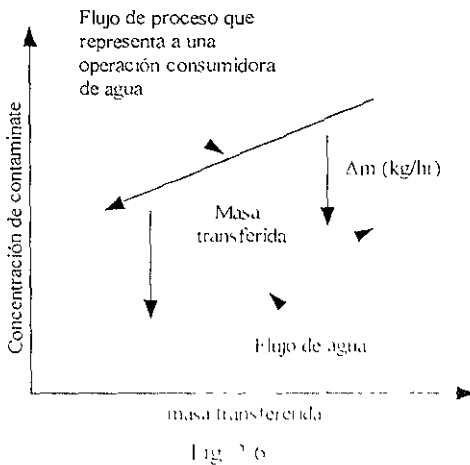
Fig. 2.4

En la figura podemos apreciar que la operación que consume agua consiste en un sistema de enfriamiento. De esta forma, no se puede apreciar un verdadero flujo de proceso rico en contaminantes del cual cierta masa de contaminante es transmitido a la corriente de agua, de hecho, ninguna masa es transmitida desde la corriente rica a la corriente de agua. El incremento de la concentración del contaminante se debe a una evaporación en el flujo de agua dentro de la unidad de enfriamiento incrementando la concentración del contaminante. Para realizar el análisis representamos los límites de concentración del contaminante por medio de una corriente de proceso rica en contaminantes aparente. La masa de contaminante transferida al flujo de agua representa el incremento de la concentración del contaminante en la unidad debido a la evaporación. Las concentraciones límite de entrada ($C_{i,n}^{lim}$) y salida ($C_{i,out}^{lim}$) del flujo de agua son representados por las concentraciones de salida y entrada, respectivamente, del flujo de proceso. La concentración del contaminante real a la entrada y salida de la unidad, debe ser menor que estos límites de concentración.

La siguiente figura ilustra el modelo de transferencia de masa para un contaminante simple para una operación consumidora de agua, donde el eje vertical (y) representa la concentración del contaminante (en ppm o mg/L) y el eje horizontal (x) representa el área relativa de contacto para la transferencia de masa. La transferencia de masa toma lugar desde el flujo de proceso rico en contaminantes hacia el flujo de agua, y el espacio de concentración vertical representa las fuerzas controlantes para ésta operación. Consecuentemente, como los dos flujos se encuentran en contacto a lo largo de todo el proceso, la concentración del contaminante en el flujo de proceso debe ser mayor que en el flujo de agua para que la transferencia de masa ocurra.



Por conveniencia, reemplazamos el área de contacto para la transferencia de masa, que puede ser difícil de obtener en la práctica, con la cantidad de masa transferida (kg/hr) como se muestra en la siguiente figura, que es equivalente a la anterior.



Para obtener los datos de proceso que nos permitan lograr el reúso de agua dentro de una operación debemos definir los siguientes términos: *flujos entrantes* son aquellos flujos para los cuales esperamos usar agua proveniente de otro proceso, *flujos de salida* como aquellos que generalmente van a tratamiento de aguas, y *contaminantes* como sustancias que pueden ser: sólidos suspendidos, materia orgánica, hidrocarburos, etc., que limitan el reúso del agua dentro de una operación.

Para analizar una operación consumidora de agua necesitamos identificar las limitantes que presenta la operación y, basándonos en esto, determinar el flujo límite de agua para esa operación.

Una limitante es cualquier cosa que impide el reúso de una corriente de agua. Las prohibiciones básicas para una operación i son:

1. Nivel de contaminante en el flujo de entrada, $C_{i,entrada}^{lim}$
2. Nivel del contaminante en el flujo de salida, $C_{i,salida}^{lim}$
3. La masa total de contaminante a ser transferida, $\Delta m_{i,tot}$.

El flujo límite de agua es entonces el flujo de agua necesario para alcanzar los requerimientos de transferencia de masa del contaminante, $\Delta m_{i,tot}$ dadas las concentraciones límites a la entrada y a la salida, $C_{i,entrada}^{lim}$ y $C_{i,salida}^{lim}$. Este flujo se volverá significativo al justificar las limitantes y lograr maximizar el reúso de agua.

Existen dos tendencias para utilizar el pinch de transferencia de masa: la primera trata la transferencia de masa desde el punto de vista de la recuperación de sustancias nocivas o de sustancias, que por su valor económico, es necesario recuperar de las corrientes de desecho para su posterior reutilización, establecida por MAHMOUND M. EL-HALAWAGI (1997). La segunda es la establecida por Y.P. WANG y R. SMITH (1994) y desarrollada posteriormente por JAMES G. MANN e Y. A. LIU (1999), los cuales consideran la transferencia de masa que se da entre una corriente de proceso y una corriente de agua, como un factor que ayuda o limita la reutilización del agua en otro proceso diferente. A continuación se muestran las metodologías para cada caso, en primer lugar se muestran ambas metodologías para el caso de un solo contaminante y posteriormente para el caso de multicomponentes, la metodología se explicará mediante un ejemplo en el capítulo III

2.4 MÉTODOS GRÁFICOS PARA CASOS DE UN SOLO CONTAMINANTE

Los problemas de Síntesis de Redes de Intercambio de Masa (SRIM) pueden ser visto como sigue. dado un número N_R de corrientes de desecho (fuentes ricas) y un número N_S de Agentes de Separación de Masa (ASM) (fuentes pobres), se desea sintetizar una red de intercambio de masa, eficiente y de bajo costo que pueda transferir alguna sustancia, de preferencia sustancias indeseables, de las corrientes de desecho a los ASM, tomando en cuenta los flujos de cada corriente de desecho, G_i , su composición a la entrada y^s_i , y su concentración deseada a la salida y^r_i , donde la composición de entrada y de salida, x^s_j y x^r_j para cada ASM son datos conocidos.

El flujo necesario para el ASM logre un intercambio de masa óptimo con la corriente de desecho es desconocido y debe ser determinado para lograr minimizar los costos que implican la red de tratamiento. La siguiente figura representa en forma esquemática lo dicho anteriormente:

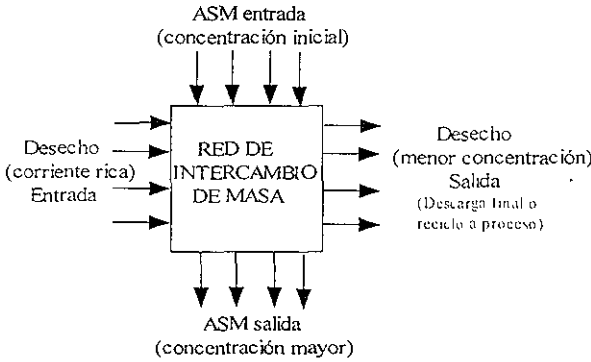


Fig. 2.7

Las corrientes pobres pueden ser clasificadas en ASM dentro del proceso, N_{SP} , o en ASM externos al proceso, N_{SE} , (donde $N_{SP} + N_{SE} = N_r$). Los ASM ya existentes en planta pueden ser usados para remover sustancias indeseables a muy bajo costo. El flujo de cada corriente de proceso de intercambio de masa que puede ser utilizado es definido por su disponibilidad en la planta, por ejemplo:

$$L_j < L'_j \quad j = 1, 2, \dots, N_{SP}$$

Donde L'_j es el flujo del j -ésimo ASM que esta disponible en la planta. Por el otro lado, los ASM externos pueden ser adquiridos en el mercado. Sus flujos son determinados de acuerdo a las estimaciones económicas de la red de intercambio de masa. Típicamente, las corrientes de desecho son dispuestas o enviadas a drenaje para su posterior tratamiento o disposición. En caso de las descargas finales, la composición máxima de las sustancias indeseables en cada corriente de desecho corresponde a las regulaciones ambientales.

La composición máxima de las sustancias indeseables para cada ASM es asignado por el diseñador basandose en las circunstancias específicas de la aplicación. La naturaleza de esas circunstancias puede ser física (por ejemplo, solubilidad máxima del contaminante en el ASM), técnica (excesiva corrosión, viscosidad o ensuciamiento), ambientales (cumpli con las

regulaciones ambientales), seguridad (permanecer en los límites de flamabilidad) o económicos (optimizar el costo las regeneraciones subsecuentes de los ASM).

De lo anterior se puede concluir, que para la reducción de desechos procedentes de un proceso, la síntesis de redes de intercambio de masa intenta obtener soluciones efectivas y de bajo costo entregando al diseñador una respuesta clara a las siguientes preguntas:

¿Cuál operación de intercambio de masa debe ser utilizada, absorción, desorción, etc.?

¿Cuál ASM debe ser escogido (que adsorbente o disolvente)?

¿Cuál es el flujo óptimo para cada ASM?

¿Cómo el ASM puede ser relacionado con las corrientes de desecho?

¿Cuál es la configuración óptima del sistema (¿qué arreglo pueden tener los intercambios de masa?, ¿Hay alguna corriente que este agotando o mezclando?)?.

Tomando en cuenta que las posibles combinaciones de las respuestas, para establecer una red de intercambio de masa, es bastante amplia, el diseñador tiene a la mano otra herramienta que le permite reconocer cual combinación es la más eficaz para el tipo de problema que esta analizando.

4.1 METODOLOGÍA POR OBJETIVOS

La metodología por objetivo se basa en la identificación previa del comportamiento del contaminante o sustancia que se desea remover de la corriente de desecho para evitar afectar la configuración de la red final.

Para el establecimiento final de una red de intercambio de masa se deben de tener en cuenta dos aspectos:

1. *Costo mínimo de los ASM.* Se deben integrar los aspectos termodinámicos del problema con los datos de costos de los ASM, lo cual permite identificar el costo mínimo de los ASM y el flujo mínimo requerido de los mismos, para resolver el problema de intercambio de masa, esto puede lograrse sin que se encuentre diseñada la red final.

Ya que el costo de los ASM es un factor predominante en el proceso, se debe tener como objetivo minimizar el costo de operación de las redes de intercambio de masa, de tal forma que cualquier diseño que lleve a disminuir los costos de los ASM debe estar referido también a un mínimo costo de operación (MCO)

2. *Número mínimo de unidades de intercambio de masa.* Si se reduce el número de unidades de intercambio de masa, indirectamente se reducen los costos de la red, ya que por lo regular, el costo de cada intercambiador de masa es una función exponencial del tamaño de la unidad. Nótese que en la práctica no es útil minimizar el número de separadores si no se reducen los costos por mantenimiento, por instalación e instrumentación.

Normalmente el número mínimo de unidades esta relacionado con el total de corrientes por la siguiente expresión:

$$U = N_R + N_S - N_i$$

Donde N_i es el número de subproblemas de intercambio de masa independientes en los cuáles el problema de intercambio de masa original puede ser subdividido, en la mayoría de los casos, solo hay un problema de intercambio de masa independiente.

Un concepto muy útil en la síntesis de redes de intercambio de masa es el concepto de “escalas correspondientes”, la cual es una herramienta para incorporar los lineamientos de la termodinámica al intercambio de masa estableciendo correspondencias uno a uno entre la composición de todas las corrientes para las cuales la transferencia de masa es termodinámicamente posible, a esto lo llamaremos “mínima diferencia de composición posible”.

Para demostrar el concepto anterior consideraremos un intercambiador de masa en el cuál la relación de equilibrio gobierna la transferencia del contaminante de la corriente de desecho, i , al ASM, j , mediante la siguiente expresión:

$$y_i = m_j x_j^* + b_j \tag{2.1}$$

La cual indica, que para una corriente de desecho de composición y_i , la composición máxima posible del contaminante en el ASM es x_j^* ,

Si empleamos una diferencia de composición mínima, ϵ_i , podemos dibujar una “línea práctica posible” que es paralela a la línea de equilibrio pero alejada de ella una distancia ϵ_i , como se muestra en la siguiente figura:

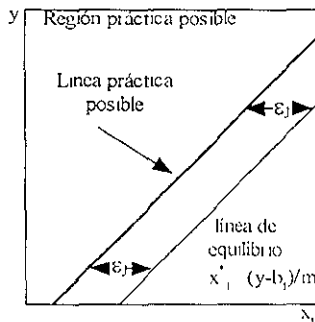


Fig. 2.8

De lo anterior, si un par de puntos (y_i , x_j) se encuentran en la línea práctica posible dos aseveraciones pueden ser hechas: para una y_i dada, el valor x_j corresponde a la composición máxima de contaminante que puede ser retirada por el ASM, e inversamente, para un valor de y_i dado, el valor de x_j corresponde a la composición mínima permitida del contaminante en la corriente de desecho que se necesita para transferir el contaminante de la corriente de desecho al ASM.

Es importante deducir la expresión matemática que relaciona a y_i y a x_i en la línea práctica factible; para una y , dada, los valores de x_j pueden obtenerse al evaluar x_j^* , que esta en equilibrio con y , y substrayendo la ε_j :

$$x_j = x_j^* - \varepsilon_j \quad (2.2)$$

$$x_j^* = x_j + \varepsilon_j \quad (2.3)$$

Sustituyendo la ecuación 2.10 en la 2.11 se obtiene:

$$y_i = m_i(x_i + \varepsilon_j) + b_i \quad (2.4)$$

rescribiéndola:

$$x_j = \frac{y_i - b_i}{m_i} - \varepsilon_i \quad (2.5)$$

Las ecuaciones (2.4) y (2.5) pueden ser utilizadas para establecer una correspondencia uno a uno entre todas las escalas de composiciones para las que el intercambio de masa es factible. Dado que varias aplicaciones ambientales involucran sistemas diluidos, uno puede asumir que estos sistemas se comportan en forma ideal. Entonces, la transferencia del contaminante es indiferente a la existencia de otras sustancias en la corriente de desecho, es decir, aún cuando dos corrientes de desecho contienen sustancias que no son idénticas, pero presentan la misma composición de un contaminante en particular, la composición de equilibrio del contaminante en el ASM deberá ser el mismo para ambas corrientes de desecho. Entonces una escala simple de composición, y , puede ser empleada para representar la concentración del contaminante en cualquier corriente de desecho, así, la ecuación (2.12) ó (2.13) puede ser empleada para generar N , escalas de ASM.

Así, para un grupo de escalas de composición $\{y, x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_N\}$ es termodinámicamente y prácticamente factible la transferencia del contaminante de cualquier corriente de desecho de composición y , a cualquier ASM que tenga una composición menor que la x_j obtenida de la ecuación (2.13).

2.4.2 DIAGRAMA PINCH

Para minimizar los costos que provoca el uso de ASM, es necesario hacer el máximo uso de los ASM que se encuentran dentro del proceso, antes de considerar la aplicación de ASM externos. Para valorar si la aplicación de un ASM externo es necesaria para remover un contaminante de una corriente de desecho, lo más importante es tomar en cuenta las limitaciones termodinámicas que implica el intercambio de masa, para este fin, se puede utilizar un método gráfico que nos permita tener una aproximación de los requerimientos del sistema, en este caso una operación industrial, conocido como "Diagrama Pinch" (El-Halwagi and Manousiouthakis, 1989). El paso inicial al construir un diagrama pinch consiste en crear una representación global de todas las corrientes tanto ricas como pobres que participan en la operación, ésta representación se hace trazando la grafica de la masa intercambiada por cada corriente contra su composición

Para el caso de las corrientes ricas, cada una es representada como una flecha cuya cola corresponde a la composición de alimentación y su cabeza a la composición de salida. La pendiente de cada flecha es igual al flujo de la corriente. La distancia vertical entre la cola y la cabeza de cada flecha representa la masa del contaminante que ha perdido la corriente rica, de acuerdo con la siguiente expresión:

Masa de contaminante perdida de la *i*'ésima corriente rica

$$MR_i = G_i(y_i^a - y_i^j), \quad i = 1, 2, \dots, N_R$$

Cabe señalar que la escala de composición es solo relativa. Cualquier corriente se puede mover abajo o hacia arriba mientras conserve la misma distancia entre la cabeza y la cola de la flecha y manteniendo la misma composición de entrada y salida. Una manera conveniente de acomodar cada flecha es colocando una corriente encima de otra, comenzando con la corriente con la menor composición de salida como se muestra en la siguiente figura:

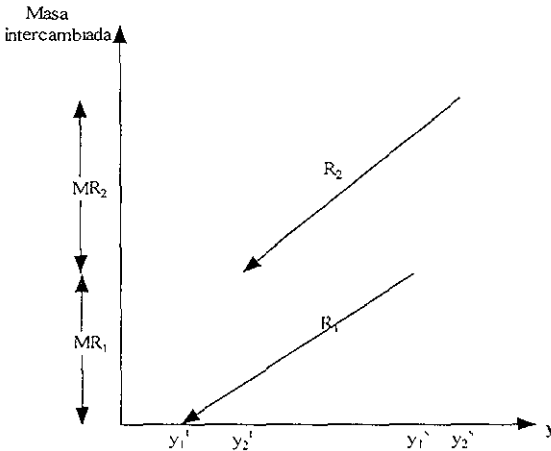


Fig 2.9

Habiendo representado a las corrientes ricas en forma individual, ahora construiremos la curva compuesta rica. Una curva compuesta rica representa en forma acumulativa la masa de contaminante perdida por todas las corrientes ricas, y puede ser obtenida fácilmente usando la regla de la "Diagonal" que consiste en sumar las corrientes (flechas) que se encuentran en el mismo intervalo, así, la curva compuesta se obtiene al aplicar la regla sobre todas las corrientes que comparten un mismo intervalo en la gráfica, la siguiente figura ilustra el concepto para dos corrientes ricas:

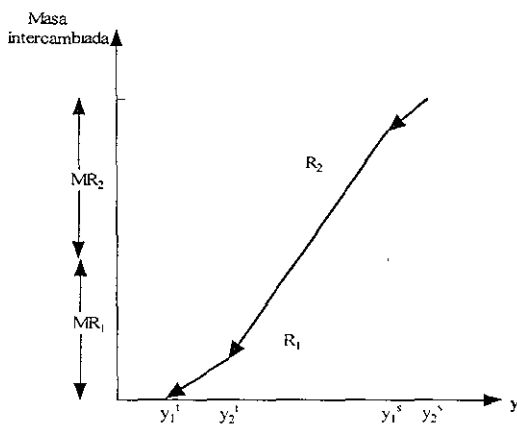


Fig. 2.10

A continuación se muestran los pasos para obtener la curva compuesta pobre. Primero se establecen N_{SP} escalas de composición (una por cada ASM) que se encuentra en una correspondencia uno a uno con la escala de la curva compuesta rica de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$x_i = y_i - \frac{b_i}{m_i} - \varepsilon_i$$

La masa del contaminante que puede ser ganada por cada ASM se traza la grafica contra la escala de composición de cada ASM. Cada ASM se representa como una flecha cuya cola es la composición de entrada (x'') y se extiende hasta una composición deseada a la salida (x') que esta indicada por la cabeza de la flecha:

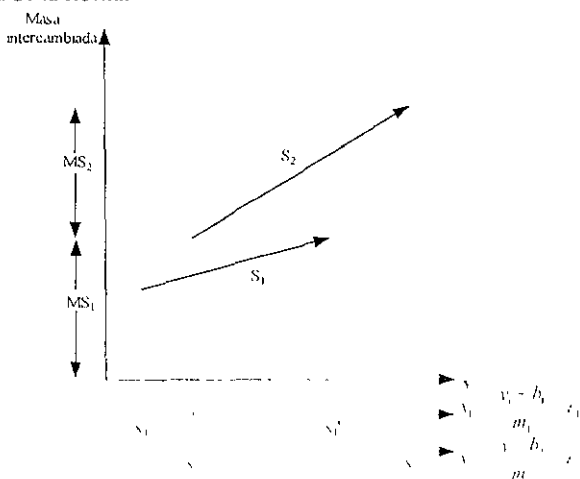


Fig. 2.11

La distancia vertical entre la cabeza y la cola de la flecha esta dada por la siguiente expresión:

Masa del contaminante que puede ser ganada por el *j*'esimo ASM

$$MS_j = L_j^c(x_j^t - x_j^c) \quad j = 1, 2, \dots, N_{SP}$$

Una vez más, la escala vertical es solamente relativa y cualquier corriente puede moverse hacia arriba o hacia abajo en el diagrama. Una forma conveniente de colocar cada flecha es superponiendo las corrientes de los ASM uno encima de otro, empezando con aquel que tiene una alimentación con una concentración menor. Después se obtiene una corriente compuesta que representa la masa acumulada del contaminante que es ganada por todos los ASM y se obtiene usando la regla de la diagonal como se hizo con la corriente rica:

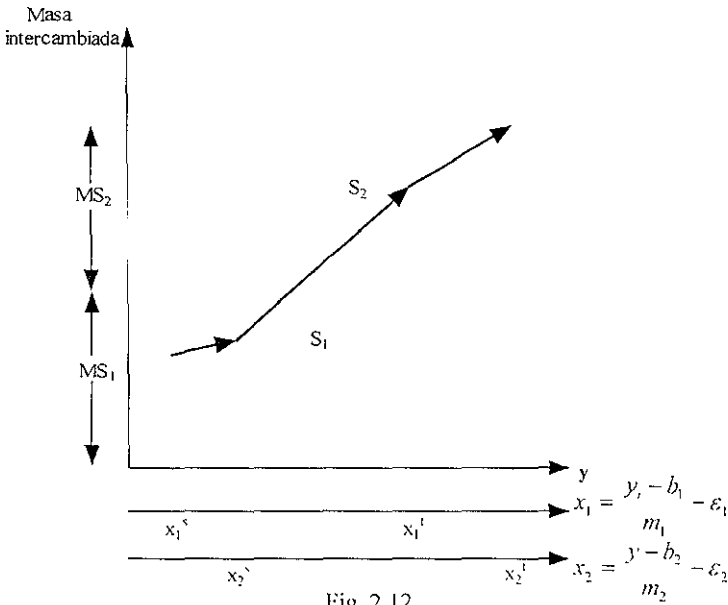


Fig 2.12

Como paso siguiente, ambas curvas compuestas son trazadas en el mismo diagrama, la curva pobre puede moverse libremente en forma vertical hasta que toque en un punto a la corriente rica, este punto se conoce como "Pinch de transferencia de masa":

En el diagrama, los requerimientos termodinámicos necesarios para el intercambio de masa se garantizan cuando la curva compuesta pobre esta arriba de la curva compuesta rica, esto es equivalente a asegurar que en cualquier nivel de intercambio de masa (que corresponde a la línea horizontal), la composición de la corriente compuesta pobre esta localizada a la izquierda de la curva compuesta rica, manteniendo de esta forma la factibilidad termodinámica. Como se dijo anteriormente, la curva compuesta pobre puede ser deslizada hacia abajo o hacia arriba hasta que toque a la curva compuesta rica. En el "Diagrama Pinch", la separación vertical entre las dos

curvas compuestas representan la cantidad máxima del contaminante que puede ser transferido de las corrientes de desecho a los ASM, y lo llamamos "Intercambio Integral de Masa". La distancia vertical de la curva compuesta pobre que se encuentra arriba de la parte inicial de la curva compuesta rica la llamamos "Exceso de ASM" y corresponde a la capacidad de los ASM para remover contaminantes que no puede ser usada por razones termodinámicas. De acuerdo con las preferencias del diseñador o de las circunstancias específicas del proceso cada exceso puede ser eliminado del servicio mediante la disminución del flujo y/o la concentración de salida de uno o más de los ASM. Finalmente, la distancia vertical de la corriente de desecho compuesta que se encuentra debajo del final de la corriente pobre compuesta corresponde a la masa de contaminante que debe ser removido por ASM externos.

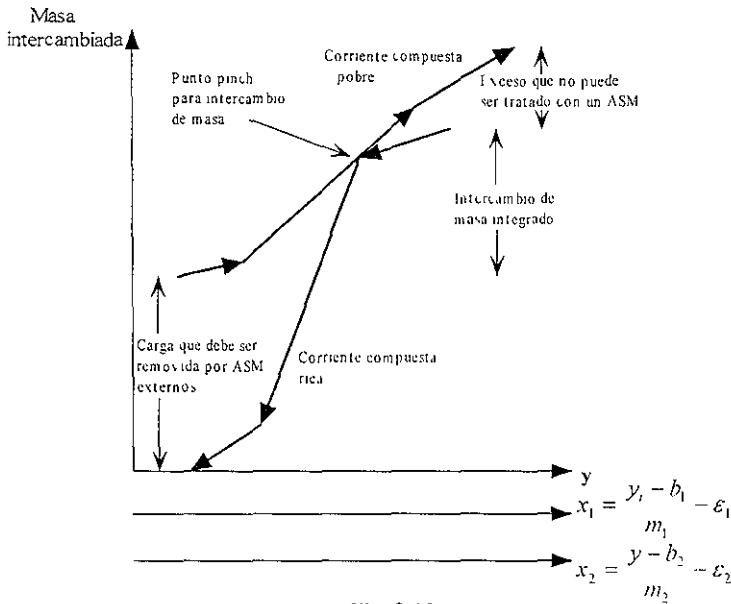


Fig. 2.13

Como se aprecia en la figura anterior, el pinch descompone el problema en dos regiones: una pobre y una rica, la parte rica comprende a todas las corrientes o partes de corrientes que tienen una composición mayor a la del pinch, de forma similar, la parte pobre incluye todas las corrientes o parte de las corrientes con una composición menor a la del pinch. Arriba del pinch, el intercambio entre las corrientes pobres y ricas se da de manera eficiente y no se necesitan ASM externos. Por otro lado, por debajo del pinch, se necesitan ASM externos. También de la figura se puede apreciar que cualquier masa transferida que cruce el pinch ocasionará que la corriente pobre se mueva hacia arriba y consecuentemente, se utilizarán ASM externos en exceso de los requerimientos mínimos, así pues, para minimizar el costo de ASM externos se debe evitar que haya intercambios de masa que crucen el pinch.

2.5 MINIMIZACIÓN DE AGUA MEDIANTE REÚSO, MANN Y LIU (1999)

El primer paso en el desarrollo de un sistema de reúso de agua óptimo para un proceso es analizar el sistema sin ningún reúso de la misma e identificar el flujo mínimo de agua fresca necesario para alimentar a cada operación consumidora de agua fresca. Podemos identificar el flujo mínimo de agua fresca para cada operación en el sistema utilizando el “perfil límite de agua”. El perfil límite de agua es simplemente una gráfica de concentración de contaminante contra masa retirada para un conjunto de operaciones que nos permite apreciar los requerimientos de agua de cada operación que participa en el proceso.

En la siguiente figura se muestra el perfil límite de agua (línea sólida 1) y una línea de alimentación de agua fresca arbitraria (línea punteada 2) para tres operaciones cualesquiera:

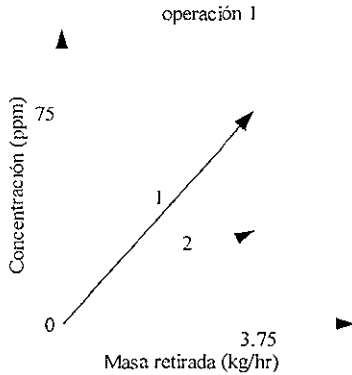


Fig. 2.14

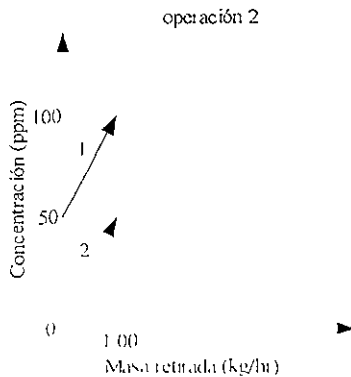


Fig. 2.15

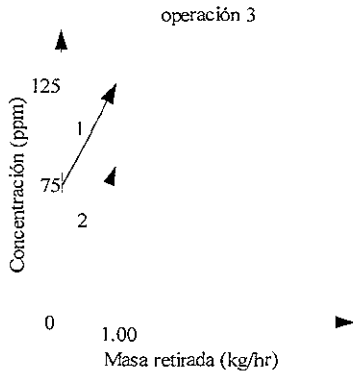


Fig. 2.16

El espacio vertical entre el perfil límite de agua y la línea de alimentación de agua para una operación representa las fuerzas termodinámicas que permiten la transferencia de masa de un contaminante dentro de la unidad. En las siguientes figuras se muestra, la línea de suministro de agua fresca (marcada como la línea punteada 3) para cada una de las operaciones anteriores, cada corriente de agua fresca comienza con una concentración de contaminante igual a cero y finaliza a la concentración límite de salida marcada por cada operación.

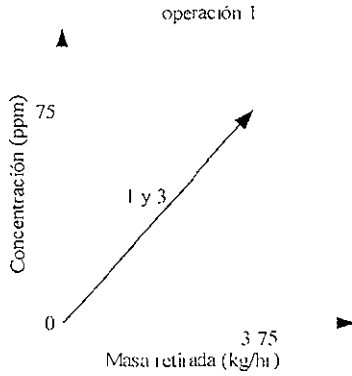


Fig. 2.17

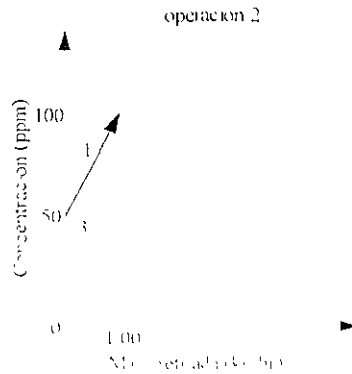


Fig. 2.18

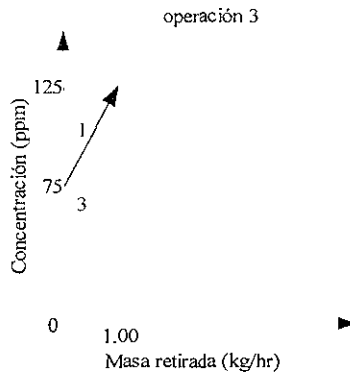


Fig. 2.19

Para cada operación representada por las gráficas anteriores la línea de suministro de agua y el perfil límite de agua se encuentran a la concentración límite de salida $C_{li\ salida}^{lim}$. La intersección no representa una transferencia de masa igual a cero, sino que indica que las fuerzas potenciales que permiten la transferencia de masa se encuentran en una transferencia mínima.

La operación 1 tiene una concentración límite de alimentación de cero, ya que el flujo de agua fresca entra a $C_{li\ entrada}^{agua} = 0$, la línea de alimentación de agua coincide exactamente con el perfil límite de agua, y el requerimiento de agua fresca es igual al flujo límite de la operación 1.

Para las operaciones 2 y 3, la línea de suministro de agua se encuentra debajo del perfil límite de agua ya que $C_{li\ entrada}^{agua} > 0$, el flujo de agua requerido es menor que el flujo límite, lo anterior se debe a que la pendiente de la línea de suministro de agua es mayor que la del perfil límite de agua.

En la siguiente figura se muestra en forma general, la relación que existe entre perfil límite de agua y la línea de alimentación de agua para la operación i :

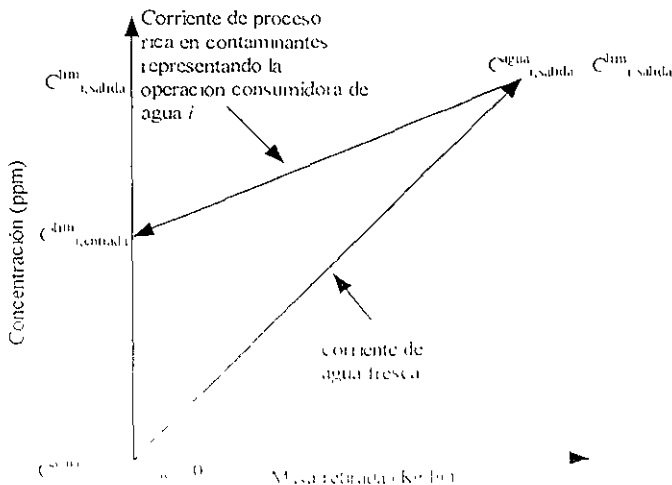


Fig. 2.20

En la figura, $C_{i, alimentación}^{agua}$ y $C_{i, salida}^{agua}$ es la concentración del contaminante en el agua fresca a la alimentación y la concentración en la corriente de agua que deja la operación i , respectivamente.

Existe una relación inversa entre el flujo de agua para la operación i , f_i (ton/hr), y la pendiente de la línea de alimentación de agua:

$$pendiente = \frac{\Delta C_i (ppm)}{\Delta m_{i, tot} (kg/hr)} \tag{2.6}$$

$$f_i (ton/hr) = \frac{\Delta m_{i, tot} (kg/hr)}{\Delta C_i (ppm)} \times 10^3 = \frac{1}{pendiente} \times 10^3 \tag{2.7}$$

$$f_i (ton/hr) = \left[C_{i, salida}^{agua} - C_{i, entrada}^{agua} \right] (ppm) \times 10^3 \tag{2.8}$$

En las ecuaciones (2.7) y (2.8) se incluye un factor de conversión de unidad de 10^3 . Para el caso del flujo mínimo de agua fresca, donde $C_{i, alimentación}^{agua} = 0$, y $C_{i, salida}^{agua} = C_{i, salida}^{lim}$, por lo que la ecuación (2.8) se convierte en:

$$f_{i, min} (ton/hr) = \frac{\Delta m_{i, tot} (kg/hr)}{C_{i, salida}^{lim} (ppm)} \times 10^3 \tag{2.9}$$

2.5.1 FLUJO TOTAL DE AGUA FRESCA

Una vez que se encontró el flujo mínimo de agua para cada operación, el flujo mínimo de agua total para el problema de un solo contaminante sin reúso de agua, es simplemente la suma de los flujos de agua fresca mínimos requeridos por cada operación:

$$f_{i, min}^{lm} (ton/hr) = \sum_i \frac{\Delta m_{i, tot} (kg/hr)}{C_{i, salida}^{lim} (ppm)} \times 10^3 \tag{2.10}$$

Para determinar la concentración de salida promedio del contaminante en la corriente de agua para todo el problema se utiliza la siguiente fórmula.

$$C_{salida}^{agua} (ppm) = \frac{\sum_i f_{i, min} (ton/hr) C_{i, salida} (ppm)}{f_{min} (ton/hr)} \tag{2.11}$$

Nótese que si $C_{i, alimentación}^{agua} = 0$ podemos reemplazar $f_{i, min} C_{i, salida}$ de la ecuación (2.11) por $\Delta m_{i, tot}$, lo que resulta

$$C_{salida}^{agua} (ppm) = \frac{\sum_i \Delta m_{i, tot} (kg/hr)}{f_{min} (ton/hr)} \times 10^3 \tag{2.12}$$

Ahora que se establecieron los requerimientos de agua fresca para un sistema sin reúso de agua (tratando cada operación por separado) se demostrara que al analizar todas las operaciones simultáneamente con el fin de reutilizar el agua (en lugar de alimentar agua fresca al inicio de cada operación), se puede reducir el flujo de la misma al mínimo.

Para sacar el flujo de agua límite (f_i^{lim}) para cada operación se utiliza la siguiente formula:

$$f_i^{lim} (ton/hr) = \frac{\Delta m_m (kg/hr)}{[C_{out}^{lim} - C_m^{lim}] (ppm)} \times 10^3 \tag{2.13}$$

El siguiente paso de esta metodología es establecer una forma para vislumbrar los requerimientos de agua de todas las operaciones que participan en el proceso, para llevar a cabo lo anterior es necesario representar todas las operaciones consumidoras de agua en una gráfica donde se indique la concentración de la misma y la cantidad de masa que es retirada por la corriente de agua. La concentración es el factor de viabilidad para que el agua proveniente de una operación sea utilizada en otra, y la masa retirada, es otro factor que nos indica los requerimientos del proceso que deben ser satisfechos con la nueva corriente de agua:

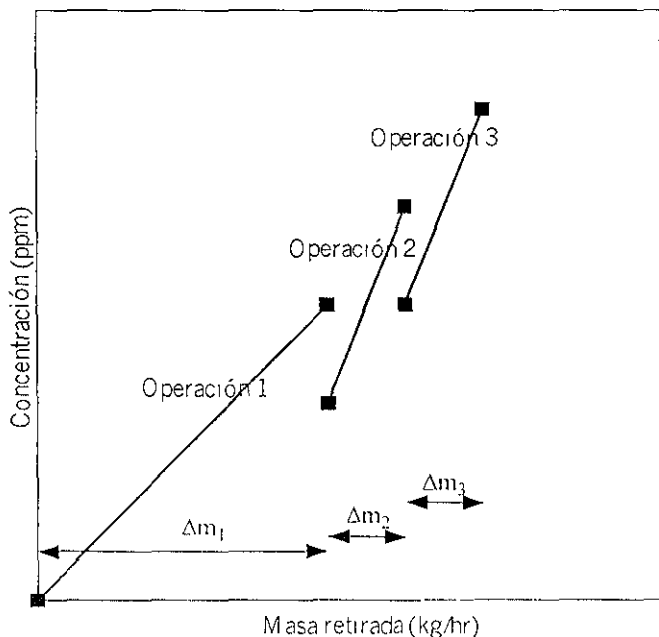


Fig. 2.21

Es necesario crear una representación global de los consumos de agua en el proceso, de esta forma se aplica el mismo criterio que en la metodología anterior y se crea una "curva compuesta" con el fin de tener una mejor perspectiva para la reutilización de el agua

A su vez, se agrega una “línea de suministro de agua”, que tiene como origen una concentración igual a cero, lo anterior se da, ya que el requerimiento para la primera operación o la operación que necesita de una calidad de agua mayor debe ser satisfecha para no tener problemas posteriores en el análisis, el punto donde se tocan las dos líneas se conoce como “PINCH DE AGUA FRESCA” y representa la máxima concentración que puede ser transmitida entre las corrientes de proceso y la corriente de agua.

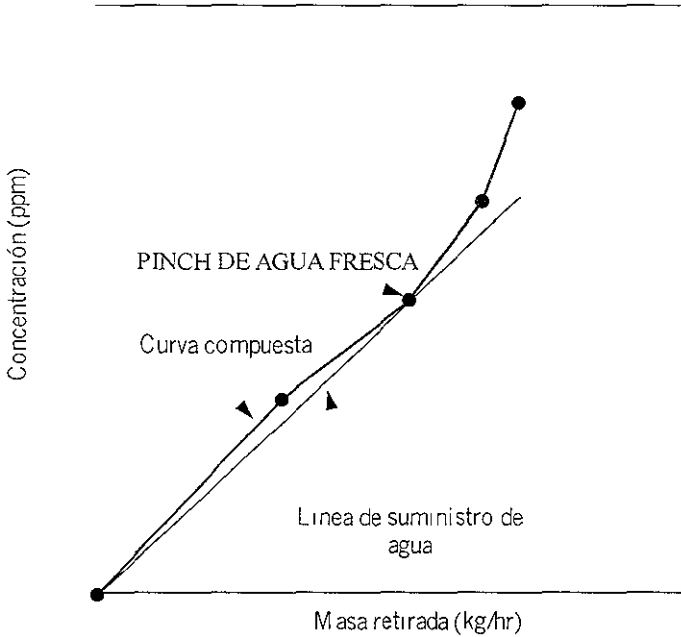


Fig. 2.22

En el siguiente capítulo se analizará mas detalladamente esta metodología mediante un ejemplo, así como la utilización de la misma para casos multicomponentes y se desarrollaran los pasos para el análisis de problemas mediante métodos algorítmicos tanto para la metodología de EL-HALWAGI (1997) como para la propuesta por JAMES G. MANN (1999), que para fines prácticos es mejor analizarlas con ayuda de ejemplos

2.6 MÉTODOS ALGORÍTMICOS

Hasta este punto, todos los ejemplos que hemos tratado los hemos analizado mediante gráficas, de tal forma que los datos obtenidos de éstos, en algunos casos pueden tener errores, así que debemos desarrollar una metodología que nos ayude a optimizar mas aún los resultados finales obtenidos del metodo grafico

Consideremos la siguiente figura que nos muestra un intervalo de concentración a la frontera:

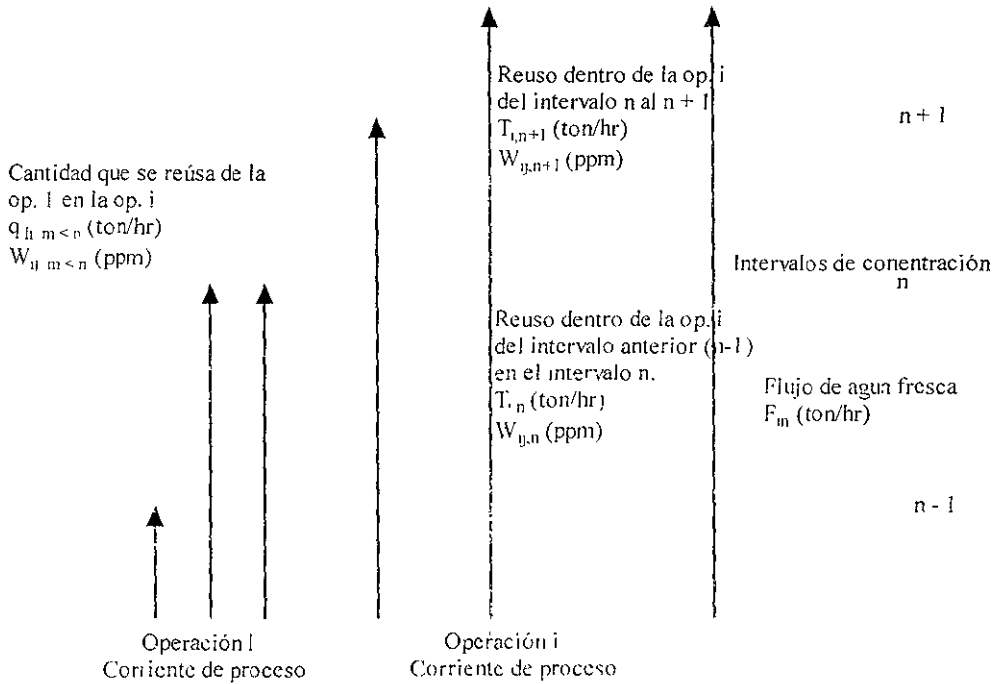


Fig. 2.23

Podemos notar tres tipos de operaciones que existen en este intervalo, las operaciones que empiezan en, terminan o cruzan el intervalo de concentración. En la figura, $T_{i,n}$ y $T_{i,n+1}$ representan los flujos de agua (ton/hr) disponibles para reuso dentro de la operación i en el intervalo de concentración n y $n+1$ respectivamente. $W_{j,i,n}$ y $W_{j,i,n+1}$ son las concentraciones (ppm) del contaminante j en la operación i que se encuentra en la corriente de agua disponible para su reuso en la operación i con flujos iguales a $T_{i,n}$ y $T_{i,n+1}$ respectivamente. F_m es el flujo (ton/hr) de agua fresca que se alimenta a la operación i en el intervalo de concentración n , y $q_{l,m < n}$ es el flujo (ton/hr) de agua de la operación l en el intervalo de concentración n que es suministrado por (o reusado por) la operación l en el intervalo de concentración m menor o igual a n , y $W_{j,l,m < n}$ es la concentración correspondiente del contaminante j en la corriente con flujo igual a $q_{l,m < n}$. Para alcanzar el máximo reuso de agua primero debemos evaluar los flujos requeridos por cada operación en el intervalo de concentración n . Si el agua que entra en la operación tiene la misma concentración del contaminante límite, podemos alimentar a la operación con este flujo, f_i . Así, si todos los contaminantes que entran a la operación tienen una concentración menor a la concentración límite establecida, la transferencia de masa se da con un flujo pequeño. Definimos la fracción $\theta_{i,n}$ como la relación del flujo actual a la operación i en el intervalo de concentración n , y a $f_{i,n}$ como el flujo límite de la operación i .

$$\theta_{i,n} = \frac{f_{i,n}^*}{f_i} \tag{2.14}$$

Por lo tanto en flujo de agua para la operación i es:

$$f_{i,n}^* = \theta_{i,n} f_i \tag{2.15}$$

Ahora consideraremos escoger una fuente de agua que satisfaga este flujo. Nuestra primera elección es usar el agua que deja la operación i del intervalo de concentración previo que tiene un flujo $T_{i,n}$ con una concentración $W_{y,n}$. La segunda alternativa con la que se cuenta es reusar el agua proveniente de la operación l en la operación i con un flujo $q_{l,m \leq n}$, que finalizó en el intervalo de concentración m ($m \leq n$). Esta agua esta disponible a una concentración de $\bar{W}_{y,m \leq n}$. Y nuestra última opción, es satisfacer los requerimientos con agua fresca con un flujo $F_{i,n}$. La suma de estas tres fuentes de agua da el requerimiento total de agua para la operación i:

$$f_{i,n}^* = T_{i,n} + q_{l,m \leq n} + F_{i,n} = \theta_{i,n} f_i \tag{2.16}$$

A continuación determinaremos la relación $\theta_{i,n}$ examinando la concentración verdadera para cada contaminante en este intervalo de concentración y en el que sigue cuando se comparan aquellos calculados durante el intercambio de concentraciones de entrada y salida (método gráfico). Se identifica al contaminante j que requiere la mayor fracción $\theta_{i,n}$ del flujo límite f_i como:

$$\theta_{i,n} = \max_j \left[\frac{C_{y,n+1} - C_{ij,n}}{C_{y,n+1} - W_{y,n}} \right] \tag{2.17}$$

Aquí, $W_{y,n}$ es la concentración promedio de las tres fuentes de agua propuestas arriba y se calcula:

$$\bar{W}_{y,n} = \frac{T_{i,n} W_{y,n} + \sum_l q_{l,m \leq n} W_{l,m \leq n}}{T_{i,n} + \sum_l q_{l,m \leq n} + F_{i,n}} \tag{2.18}$$

Nótese que el producto del flujo de agua fresca $F_{i,n}$ y su concentración (0 ppm) es cero por lo cual no aparece en el numerador.

Ahora, tomemos el caso de reusar el agua que sale de la operación l en la operación i, en el caso de que el agua pueda ser reutilizada en varias operaciones debemos determinar en cual operación utilizar la fuente existente de agua y en cual se utilizará agua fresca. Para maximizar el reúso de agua, usaremos el agua que presente la menor concentración de contaminante primero

Las ecuaciones 2.13 a 2.26 se resuelven para obtener el flujo mínimo de agua fresca requerida por cada operación en el intervalo

Calculamos el flujo mínimo de agua fresca requerido por cada operación comenzando con el intervalo de concentración menor ($n = 1$). La ecuación 2.24 y 2.25 se pueden reducir a las ecuaciones 2.27 y 2.28. para el primer intervalo de concentración ya que el agua fresca debe satisfacer completamente el flujo mínimo requerido por cada operación.

$$f_{i,j}^* = F_{i,j} = \theta_{i,j} \tag{2.19}$$

$$\theta_{i,j} = \max_j \left[\frac{C_{y,2} - C_{y,1}}{C_{y,2}} \right] \tag{2.20}$$

Las concentraciones y flujos de agua que dejan cada operación y entran al siguiente intervalo se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$W_{y,n+1} = \bar{W}_{y,n} + \frac{f_i(C_{y,2} - C_{y,1})}{T_{i,n+1}} \tag{2.21}$$

$$T_{i,n+1} = F_{i,n} + T_{i,n} + \sum_j q_{i,m \leq n} \tag{2.22}$$

Una vez obtenidos los datos, podemos pasar al siguiente intervalo de concentración, primero determinamos qué operación termina en este nuevo intervalo. La primera operación que termina en este nuevo intervalo de concentración puede ser reusada en la operación i con un flujo $q_{i,m \leq n}$. Esta fuente de agua proveniente de otra operación se combina con el flujo de agua disponible para reúso del intervalo de concentración anterior, $T_{i,n}$, y el flujo de agua que comienza en o atraviesa la frontera del pinch. La metodología se puede dividir en tres diferentes pasos que a continuación se presentan para su mejor entendimiento:

Paso 1 Se calculan los requerimientos de agua fresca, las concentraciones de salida y los flujos de salida para cada operación que comienza en el primer intervalo de concentración ($n = 1$), utilizando la ecuación (2.19) y (2.20). Se identifica cual contaminante tiene la mayor fracción en el flujo para cada operación mediante la ecuación (2.20)

$$\theta_{i,j} = \max_j \left[\frac{C_{y,2} - C_{y,1}}{C_{y,2}} \right]$$

Después de identificar el contaminante límite en cada operación se calculan los requerimientos de agua fresca para cada operación mediante la ecuación:

$$F_{i,j} = \theta_{i,j} T_{i,j} \tag{2.23}$$

Después calculamos el cambio de concentración en el agua que pasa por cada operación mediante la siguiente ecuación

$$W_{y,2} = W_{y,1} + \frac{f_i(C_{y,2} - C_{i,j})}{T_{i,2}}$$

Paso 2. Evaluar los requerimientos de agua fresca, las concentraciones de salida y los flujos de salida para cada operación en el siguiente intervalo de concentración. Cualquier operación que termine en este intervalo de concentración es elegible para ser reusado en otra operación existente en este mismo intervalo de concentración. Se identifican los flujos, $q_{h, m \leq n}$, y concentraciones, $W_{h, m \leq n}$, para esas operaciones. Para cada operación, se resuelven las ecuaciones (2.15), (2.16) y (2.17) simultáneamente para encontrar el requerimiento de agua fresca:

$$f_{i,n}^* = T_{i,n} + q_{hi} + F_{i,n} = \theta_{i,n} f_i$$

$$\theta_{i,n} = \max_j \left[\frac{C_{y,n+1} - C_{ij,n}}{C_{y,n+1} - W_{y,n}} \right]$$

$$W_{y,n} = \frac{T_{i,n} W_{y,n} + \sum_l q_{h, m \leq n} W_{h, m \leq n}}{T_{i,n} + \sum_l q_{h, m \leq n} + F_{i,n}}$$

Se calcula entonces el flujo y concentración del agua disponible para reúso en el intervalo de concentración siguiente mediante las ecuaciones (2.20) y (2.21):

$$T_{i,n+1} = F_{i,n} + T_{i,n} + \sum_l q_{h, m \leq n}$$

$$W_{y,n+1} = W_{y,n} + \frac{f_i(C_{y,2} - C_{i,j})}{T_{i,n+1}}$$

Paso 3 Se repite el paso 2 hasta que se haya calculado el flujo y concentración de cada operación que alcance el intervalo donde se encuentra el pinch

CAPITULO III

APLICACIONES DE LAS METODOLOGÍAS DE TRANSFERENCIA DE MASA

3.1 RECUPERACIÓN DE BENCENO DE EMISIONES GASEOSAS EN LA PRODUCCIÓN DE POLIMEROS, METODOLOGÍA DE EL-HALWAGI (1997)

Se tiene una producción de polímeros que tiene como residuo una emisión gaseosa que contiene Benceno, el propósito es establecer si los métodos de extracción S1 y S2 son factibles.

Corriente Rica	Descripción	Flujo G_i , kg mol/s	Composición a la alimentación (fracción mol) y_i^s	Composición deseada (fracción mol) y_i^t
R_1	Salida de gas de separación de productos	0.2	0.0020	0.0001

Corriente Pobre	Descripción	Flujo L_i^c , kg mol/s	Composición a la alimentación (fracción mol) y_i^s	Composición deseada (fracción mol) y_i^t
S_1	Aditivos	0.08	0.003	0.006
S_2	Sol Catalítica	0.05	0.002	0.004

Las condiciones de equilibrio están dadas por:

$$y_1 = 0.25x_1 \quad y_2 = 0.50x_2, \text{ la región de viabilidad práctica } \epsilon = 0.001$$

Una vez que se tienen los datos se calcula la masa intercambiada para cada corriente, tanto rica como pobre, utilizando las siguientes ecuaciones:

Para la corriente rica: $MRR_i = G_i(y_i^s - y_i^t)$ (3.1)

Donde: MRR = masa retirada de la corriente rica

G = flujo en kgmol/seg.

y^s = fracción peso del contaminante a la entrada.

y^t = fracción peso del contaminante a la salida.

Para la corriente pobre: $MRP_i = L_i^c(x_i^t - x_i^s)$ (3.2)

Donde MRP = masa retirada por la corriente pobre.

L = flujo en kgmol/seg

x^s = fracción peso del contaminante a la entrada.

x^t = fracción peso del contaminante a la salida

Con lo anterior se obtienen la masa retirada para la corriente rica y las corrientes pobres

Corriente Rica	Descripción	Flujo G_r , kg mol/s	Composición a la alimentación y_i^s (fracción mol)	Composición deseada y_i^t (fracción mol)	Δm kgmol
R ₁	Salida de gas de separación de productos	0.2	0.0020	0.0001	0.00038

Corriente Pobre	Descripción	Flujo L_1^c , kg mol/s	Composición a la alimentación X_i^s (fracción mol)	Composición deseada X_i^t (fracción mol)	Δm kgmol
S ₁	Aditivos	0.08	0.003	0.006	0.00024
S ₂	Sol. Catalítica	0.05	0.002	0.004	0.0001

Para la corriente Rica, solamente se utilizan para la grafica la masa intercambiada Δm (en el eje de las abscisas) y las fracciones de entrada y salida (en el eje de las ordenadas), entonces los pares de puntos quedan de la siguiente forma:

$$P1 [0.0020 , 0.00038] \quad P2 [0.0001 , 0.0]$$

La coordenada 0.0 significa que en ese punto, la masa intercambiada es nula. Creando la curva compuesta para la corriente Rica:

masa intercambiada

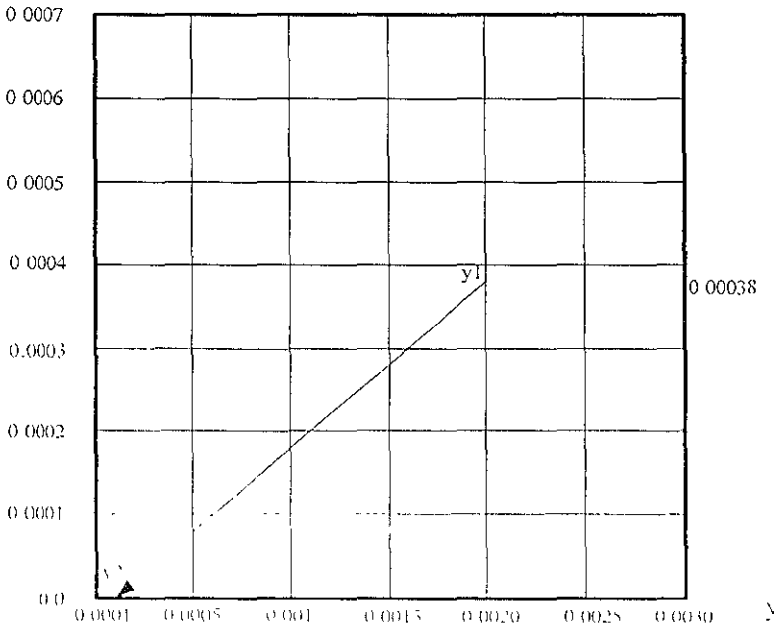


Fig. 3.1

Como se observa en la gráfica, la corriente rica va de una fracción mayor de contaminante (0.0020) a una menor (0.0001) y para que esa disminución se lleve a cabo se necesita retirar ó intercambiar un total de 0.00038 kg/s de la sustancia.

Para la corriente pobre, el cálculo es más complejo, primero se tiene que notar que los puntos o fracciones peso de entrada y salida (x_1^s y x_1^t) deben ser referidos a la corriente rica y a las condiciones de equilibrio planteadas, por lo tanto son considerados dos ejes horizontales, uno que corresponde a los valores dados al inicio de la composición de las corrientes que llamaremos x y el otro que es formado por las condiciones de equilibrio que llamaremos y.

Para la corriente pobre S1 se tienen los siguientes puntos:

$$x^s = 0.003, x^t = 0.006, \Delta m = 0.0024 \text{ y } \varepsilon = 0.001$$

Para referir los valores de x a sus equivalentes en las coordenadas y, se utiliza la siguiente formula:

$$y = (x_1 + \varepsilon) * m + b \tag{3.3}$$

Donde ε = es la diferencia mínima permitida entre S1 y S2

m= constante de equilibrio

b= constante propia del material

Sustituyendo para y^s :

$$y_1^s = (0.003 + 0.001) * 0.25 + 0.0$$

$$y_1^s = 0.001$$

Siguiendo la misma metodología, se obtienen las demás y^s 's.

$$y_1^t = 0.00175$$

$$y_2^s = 0.0015$$

$$y_2^t = 0.0025$$

Una vez obtenidas las y^s 's tenemos en total 4 juegos de puntos:

$$y_1 = \{ 0.0010, 0.0 \} , y_1^t = \{ 0.00175, 0.00024 \}$$

$$y_2 = \{ 0.0015, 0.00034 \} , y_2^t = \{ 0.0025, 0.0034 \}$$

Obsérvese que se toma como referencia de inicio para trazar la gráfica de la corriente pobre S2 el punto final sobre el eje de masa intercambiada de S1, por esto el segundo punto de $y_2^i = 0.0034$ resulta de añadir los 0.001 kg/s de masa retirada de la corriente pobre S2 a los 0.0024 (punto de referencia) de la corriente pobre S1.

Dibujando las dos corrientes pobres en un diagrama:

masa intercambiada

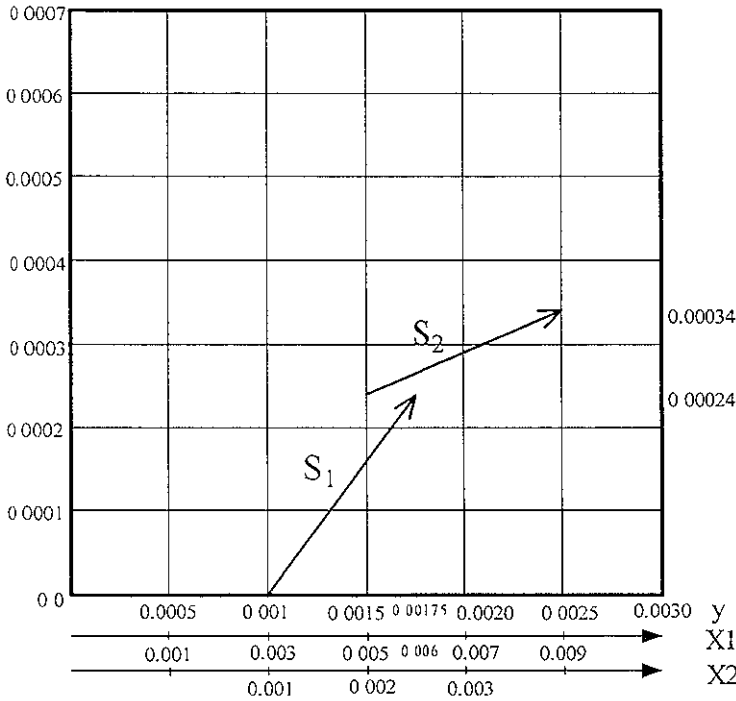


Fig. 3 2

Como se puede observar en la gráfica, las corrientes pobres van de una concentración menor a una mayor, ya que su fin es retirar masa de la corriente rica

Lo que procede a continuación es crear una curva compuesta para las corrientes pobres, lo cual consiste en formar una sola curva que sea representativa de la masa intercambiada total que se da en ambas corriente, para esto se considera la llamada "regla diagonal" que consiste en unir los puntos sobre la vertical donde una corriente corta a otra, creando así una sola curva.

Este procedimiento es aplicable tanto para las corrientes ricas o pobres, no importa el número de corrientes que se manejen, en este caso, como solo se manejan una corriente rica y dos pobres el método se aplica solo a las corrientes pobres.

Creando la curva compuesta de la corriente pobre a partir de las dos corrientes

masa intercambiada

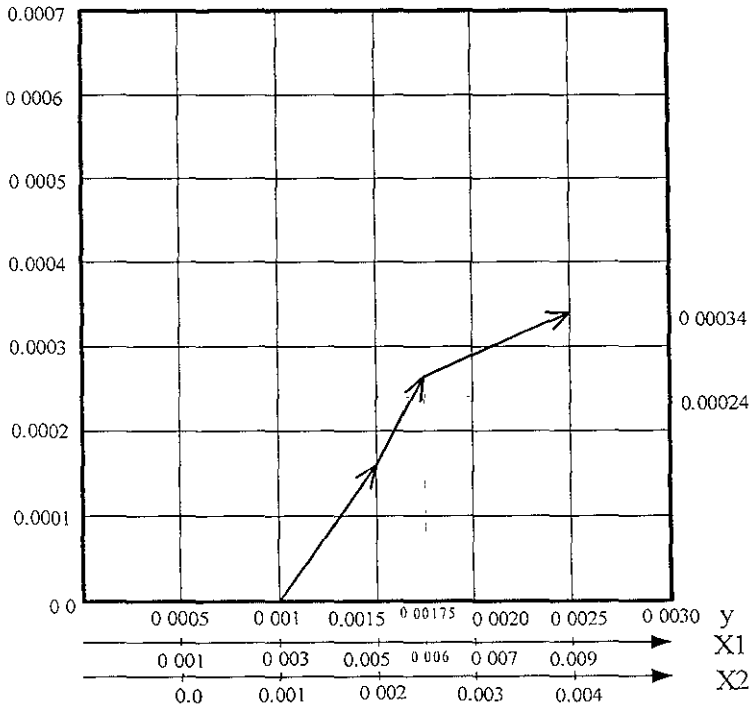


Fig. 3.3

Una vez obtenidas las dos curvas compuestas (rica y pobre), se dibujan en un solo diagrama, ahora la curva compuesta pobre se debe deslizar hacia arriba para forzarla a tocar en un punto a la curva compuesta, importante: este deslizamiento se debe efectuar en el mismo eje vertical.

Dicho deslizamiento tiene como fin encontrar la cantidad de masa que puede ser retirada por la corriente pobre, además de mostrar en forma esquemática el problema total para tener un mejor punto de vista y así tomar decisiones de manera objetiva sobre los cambios que se pueden efectuar en beneficio del proceso en general

A continuación se presenta la gráfica donde se encuentran las corrientes pobres y la rica, mostrando de manera esquemática el desplazamiento

masa intercambiada

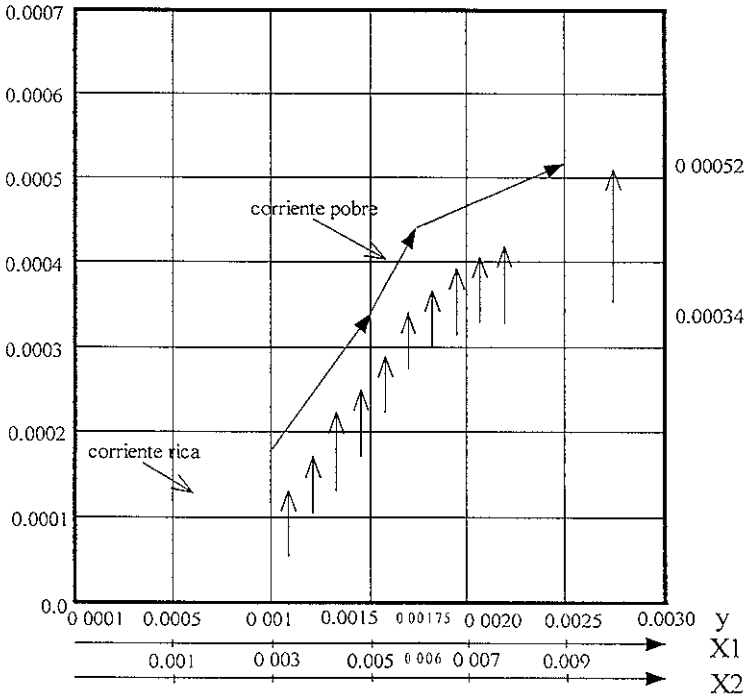


Fig. 3.4

Como se puede observar en la gráfica, el punto mas alto de la corriente pobre (0.00034), al desplazarse se movió 0.0002 unidades llegando a los 0.00052 kg/s de masa removida, este valor es de suma importancia, ya que nos dice que tanta materia es retirada por la corriente pobre en general. al punto donde se tocan la curva de la corriente pobre y la curva de la corriente rica es llamado "PINCH", y se entiende como el punto mínimo desde donde la corriente pobre retira materia de la corriente rica, en otras palabras, la materia que se encuentre debajo del "pinch" deberá ser removida por agentes externos (he aquí la similitud con el pinch de transferencia de calor) y a su vez, la cantidad de masa que se encuentra por encima de donde finaliza la corriente rica y que ya no puede ser removida por la corriente pobre (pues no existe intercambio de materia en este punto) es considerado como un exceso que no puede ser tratado por transferencia de masa.

En la siguiente gráfica se muestran estos puntos, así como otros adicionales:

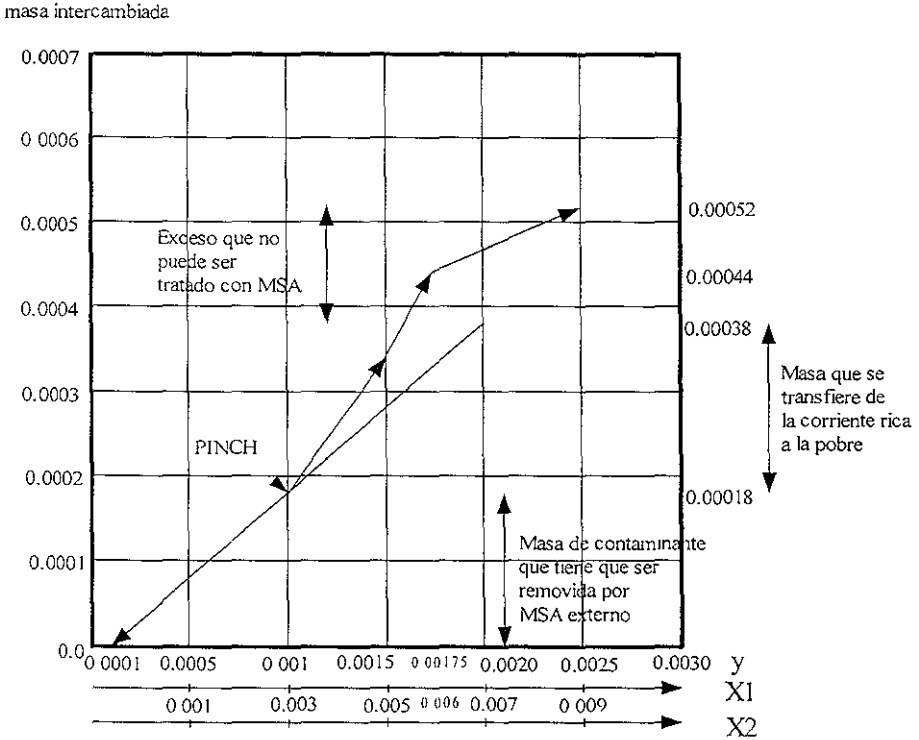


Fig. 3.5

Como se puede observar el “pinch” se encuentra a 0.00018 kgmol benceno/s, y éste delimita el área en donde los ASM interno actúa. El valor de 0.00038 kgmol benceno/s indica la frontera donde los ASM internos actúan, arriba del se tiene un exceso que no puede ser tratado, como se dijo anteriormente, debido a que las condiciones termodinámicas (fuerzas controlantes) no lo permiten.

Como el fin de este método es optimizar, el exceso que aparece debe evitarse, y para esto se puede apreciar que la corriente pobre S2 es innecesaria, ya que la corriente S1 logra retirar la cantidad de materia suficiente (y aún así existe un pequeño exceso) que se requiere para llegar a las condiciones necesarias para la corriente rica. Con respecto a lo que se encuentra debajo del “pinch”, solamente se pueden utilizar medios externos para retirar la masa ya que el “pinch” no es afectado al quitar a la corriente pobre S².

A continuación se presenta la gráfica final para este ejemplo

masa intercambiada

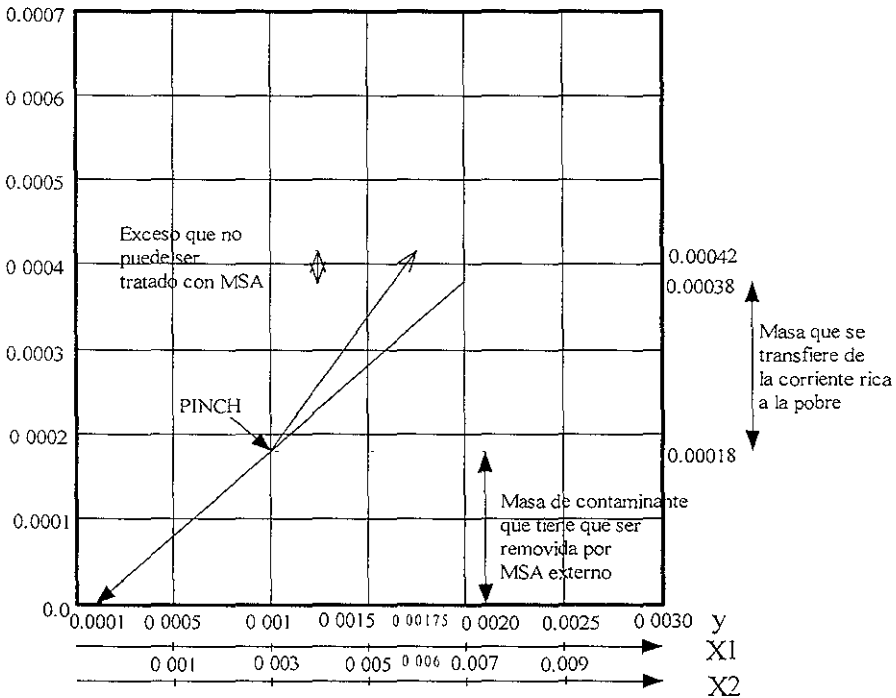


Fig 3.6

3.2 METODOLOGÍA DE JAMES G. MANN e Y. A. LIU (1999)

A continuación se presenta el método gráfico de MANN Y LIU (1999), tomando como base los datos de la siguiente tabla, al igual que con el método de Mahmoud M. El-Halwagi (1997), se requiere hacer una curva compuesta que esté formada por las concentraciones y la masa retirada (Δm), solamente que en este caso lo que retira la masa no es un método de separación sino una corriente de agua que es de proceso y lo que se busca es reutilizar dicha agua para satisfacer las exigencias de otros procesos tomando en cuenta los valores límites de impurezas que debe contener el agua para ser utilizada en cada corriente, es decir, este método gráfico se basa en el reúso de las corrientes para disminuir el consumo de agua fresca.

Operación	Masa retirada Δm_{tot} (kg/hr)	concentración a la entrada c_{in}^m (ppm)	concentración a la salida c_{out}^m (ppm)	f^m (ton/hr)
1	3.75	0	75	50
2	1.00	50	100	20
3	1.00	75	125	20

A continuación se presentan las gráficas de las 3 operaciones dibujadas en un mismo diagrama:

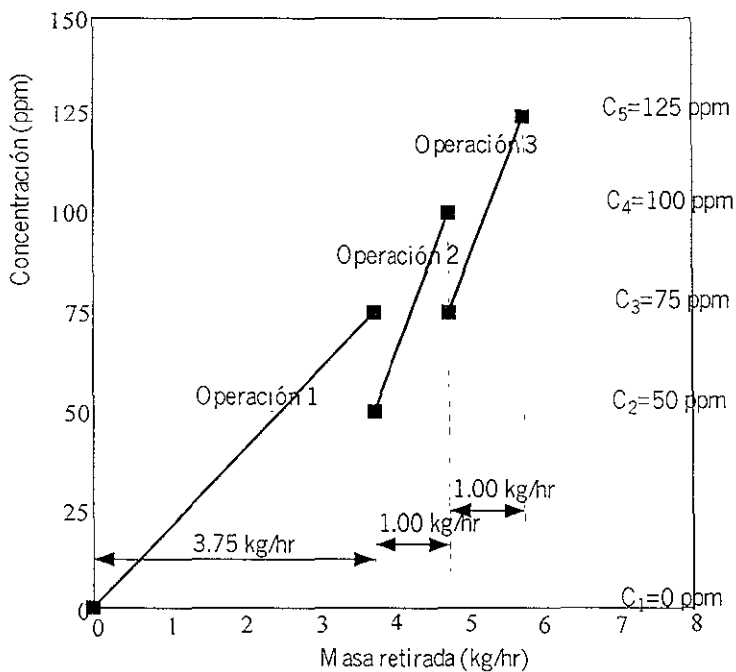


Fig. 3.7

Como se observa en la gráfica las corrientes se colocan una después de otra, tomando como origen vertical, el último punto de la operación anterior y de concentración menor a mayor, esto se hace para que en la gráfica se muestren las operaciones según la pureza de entrada de agua que necesiten

Se hace un arreglo para crear una sola curva compuesta que represente en forma general, las necesidades de agua para cada proceso, para formar dicha curva se aplica (como en el ejemplo de El-Halwagi 1997) la regla "diagonal", en este caso la única variación que existe es que se toma en lugar de los cortes verticales sobre cada recta, los cortes horizontales, y se unen los segmentos, a continuación se muestra paso a paso la formación de la curva compuesta para este ejemplo:

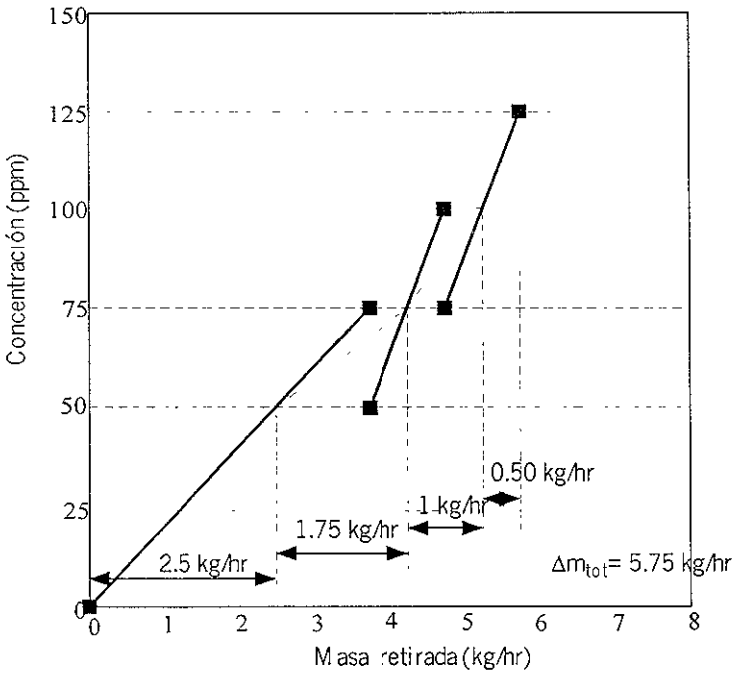


Fig. 3.8

Generando la curva compuesta final:

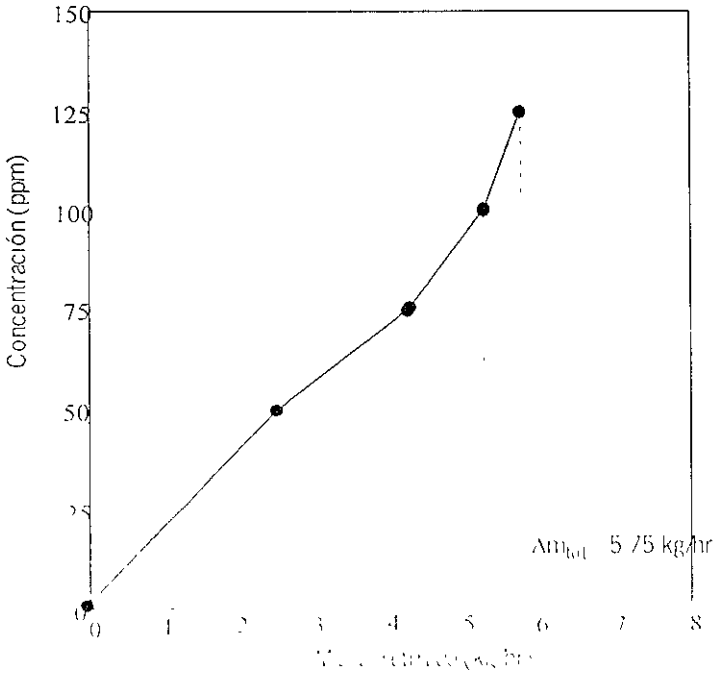


Fig. 3.9

Incluyendo la alimentación de agua fresca, para generar el “pinch de agua fresca” y la concentración máxima del contaminante a la salida, para generar la alimentación de agua fresca se parte de un origen (que en este caso es el 0, ya que se considera que el agua no contiene ningún contaminante), y se rota la línea hasta que toque un punto de la curva compuesta (pinch de agua fresca). Por arriba del “pinch”, no se necesita agua fresca, y el inverso de la pendiente nos da el flujo mínimo de agua para satisfacer los requerimientos de todas las operaciones:

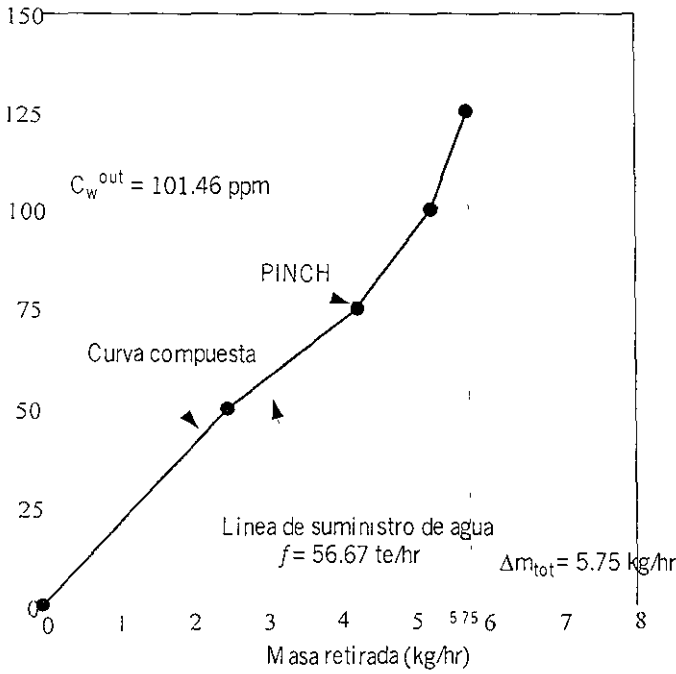


Fig 3.10

Para comprobar que la metodología en verdad disminuye el flujo de agua necesario, se calcula el flujo necesario para las 3 operaciones sin utilizar el reúso de agua:

$$f_{min} (ton/hr) = \sum_i \frac{\Delta m_{i, out} (kg/hr)}{C_{i, out}^{lim} (ppm)} \times 10^3 \quad (34)$$

$$\left[\frac{3.75}{75} + \frac{1}{100} + \frac{1}{125} \right] \times 10^3 = 68$$

Notese que el total del flujo necesario sin reúso no es más que la suma de los flujos que necesita cada operación

Para calcular una concentración del contaminante a la salida del flujo de agua para todo el problema, se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_{out}^w (ppm) = \frac{\sum_i f_{i,min} (ton/hr) C_{i,out} (ppm)}{f_{min} (te/hr)} \quad (3.5)$$

$$= \frac{(50)(75) + (10)(100) + (8)(125)}{68} = 84.65 \text{ ppm}$$

Comparando los resultados obtenidos sin el reúso de agua ($f = 68 \text{ ton/h}$ y $C_{out} = 84.65 \text{ ppm}$), con los obtenidos aplicando la metodología ($f = 56.67 \text{ ton/hr}$ y $C_{out} = 101.46 \text{ ppm}$), obtenemos que, el reusar el agua en las diferentes operaciones causa una disminución del flujo del 16.7 % y un aumento del 19.86 % en masa retirada, lo cual reditúa en una disminución en los costos de operación ya que se puede utilizar un menor flujo de agua para abastecer a todo el sistema del agua requerida.

Si se observa la masa retirada (concentración a la salida del contaminante en el flujo de agua), se podría decir que el gasto para tratar el agua puede ser igual o mayor, ya que la concentración es mayor y esto nos conduciría a un gasto que nulifique el obtenido por la disminución del flujo de agua limpia, considerando esto podemos decir que el hecho de haber disminuido el flujo y aumentado la concentración son variables que se compensan entre sí, así que el gasto de tratamiento debe ser casi el mismo, por lo que se confirma que sí existe una disminución en el costo del proceso

3.3 METODOS ALGORÍTMICOS

3.3.1 DIAGRAMA DE INTERVALO DE CONCENTRACIÓN (CID), METODOLOGÍA DE EL-HALWAGI (1997)

Se tienen los datos de la siguiente tabla:

Corriente Rica	Flujo G_n , kg /s	Composición a la alimentación (fracción mol) y_i^v	Composición deseada (fracción mol) y_i^l
R_1	0.9	0.0700	0.0003
R_2	0.1	0.0510	0.0001

Corriente pobre	Flujo L_i^C , kg mol/s	Composición a la alimentación (fracción mol) y_i^s	Composición deseada (fracción mol) y_i^t
S_1	2.3	0.0006	0.0310
S_2	∞	0.0002	0.0035

Las condiciones de equilibrio están dadas por:

$$y_1 = 1.45x_1 \quad y_2 = 0.26x_2$$

La región de viabilidad práctica $\varepsilon = 0.0001$

La tabla CID para el ejemplo se muestra en la siguiente página, en el diagrama se encuentran cinco columnas: la primera es la masa removida en cada intervalo llamado exceso, la 2 y 3 son las entradas y salidas tomando en cuenta las corrientes ricas y solamente la corriente pobre S_1 , nótese que hay intervalos donde existen valores negativos, eso significa que se tiene una deficiencia y se elimina adicionando a la entrada un flujo mayor (el flujo adicional inicial esta marcado como 0 en la columna 2) que corresponde al mayor valor negativo (- 0.00283 kg/s), este punto es el llamado PINCH y en el diagrama se encuentra entre los intervalos 3 y 4. Las columnas 4 y 5 muestran la ubicación del valor 0 (pinch) en los intervalos y muestran cómo varían los flujos al tener una entrada adicional (0.00283 kg/s).

Obsérvese la similitud que existe con el método de transferencia de calor, donde es necesario añadir equipos de calentamiento o de enfriamiento externos para compensar las faltas o requerimientos de energía.

Como se dijo anteriormente con el método gráfico, el CID nos ayuda a visualizar dos áreas: una arriba del pinch en la cual se da un intercambio de masa con corrientes ricas y pobres que se encuentren arriba del pinch, y otra debajo del mismo en donde el intercambio se da únicamente con corrientes que se encuentran debajo del pinch, al igual que en el caso de transferencia de calor, las interacciones entre corrientes ricas y pobres que crucen el pinch no son permitidas.

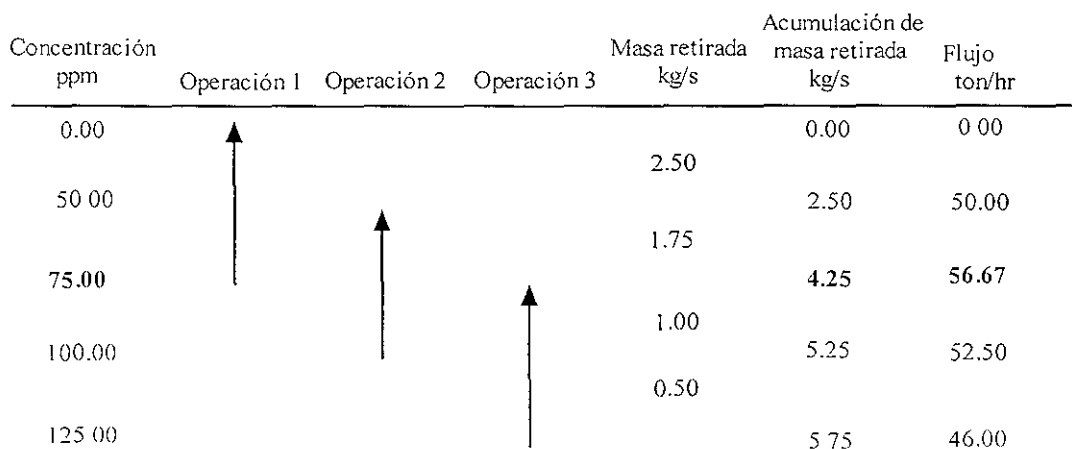
Corriente Rica		Corriente Pobre		Excedente kg/s	Masa Acumulada disponible		Masa Acumulada Modificada disponible		
		$N_{1,1}$	$N_{1,2}$		Entrada kg/s	Salida kg/s	Entrada kg/s	Salida kg/s	
	R1	0.0482	0.2692						
	R2	0.0351	0.1961	0.01710	0.000	0.01710	0.00283	0.01994	
	R3	0.0310	0.1734	0.00590	0.01710	0.02300	0.01994	0.02584	
	R4	0.0006	0.0035	-0.02584	0.02300	-0.00283	0.02584	0.0000	← PINCH
	S1	0.0001	0.001053	0.00072	-0.00283	-0.00212	0.0000	0.00072	
	S2	0.0000	0.0002846	0.00002	-0.00212	-0.00210	0.00072	0.00074	
		0.0000	0.0002						

3.3.2 DIAGRAMA DE INTERVALO DE CONCENTRACIÓN, METODOLOGÍA DE MANN Y LIU (1999)

En esta metodología también se emplea un "Diagrama de intervalos de concentración" o "CID", tomando los datos del ejemplo gráfico para estos mismos autores, lo resolveremos en forma algorítmica:

Operación	Masa retirada Δm_{tot} (kg/hr)	Concentración a la entrada C_m^{lim} (ppm)	Composición a la salida C_{out}^{lim} (ppm)	f_m^{lim} (ton/hr)
1	3.75	0	75	50
2	1.00	50	100	20
3	1.00	75	125	20

A continuación se presenta el CID, para este ejemplo:



Las flechas indican el intervalo de concentración de cada operación, la cola de la flecha se encuentra en la concentración a la que sale la corriente de agua y la cabeza se encuentra en la máxima concentración permisible a la que debe entrar la corriente de agua.

A continuación se muestran las ecuaciones que se utilizaron para el cálculo de las columnas

Para la masa retirada

$$m \text{ (kg/hr)} = \frac{(C_{in} - C_{out}) \text{ (ppm)}}{10} \sum f_m^{lim} \text{ (ton/hr)} \tag{3.6}$$

Ejemplo para la operación 2:

$$m_1 = \frac{[75 - 50](ppm)}{10^3} [50 + 20] = 1.75 \text{ kg/hr}$$

Para la acumulación de masa retirada únicamente se suman los intervalos:

Ejemplo para la operación 2:

$$\text{Acumulación de masa retirada} = 2.5 + 1.75 = 4.25 \text{ kg/hr}$$

Para el flujo se utiliza la siguiente fórmula:

$$f_k (\text{ton/hr}) = \frac{\Delta m_k (\text{kg/hr})}{C_k^* (\text{ppm})} \times 10^3 \quad (3.7)$$

Ejemplo para la corriente 2:

$$f_k = \frac{4.25}{75} \times 10^3 = 56.67 \text{ ton/hr}$$

El pinch para esta metodología se localiza en el punto donde se encuentra el valor de flujo mayor, en este caso es a los 56.67 ton/hr con una composición de 75 ppm. este punto, equivale a la mínima cantidad de agua que se necesita para satisfacer las exigencias de los tres procesos como se vio en el método gráfico.

Este método al ser matemático presenta una menor probabilidad de error a diferencia del método gráfico, en el cual los errores de apreciación y de escala son muy comunes.

Cabe señalar que las dos metodologías que se mostraron aquí y que se basan de un diagrama para el estudio de la transferencia de masa entre dos corrientes, solamente puede ser empleado cuando no se tienen varios componentes que participen en la transferencia de masa, esto es, únicamente pueden ser utilizados para casos que manejen componentes sencillos ya para el estudio de casos de multicomponentes es mejor la utilización de gráficas, ya que, como se mostrará enseguida, son la herramienta más eficaz para el análisis.

3.4 METODOLOGÍA PARA EL CASO MULTICONTAMINANTES

Para el caso de multicontaminantes solamente se analizará la metodología manejada por Mann y Liu (1999), ya que El-Halwagi (1997) no plantea ningún caso multicontaminante.

3.4.1 METODOLOGÍA PARA EL CASO MULTICONTAINANTES DESARROLLADA POR MAN Y LIU (1999)

La metodología establecida por JAMES MAN E Y. LIU (1999) para multicontaminantes es muy similar a su metodología para uno solo, el objetivo es buscar que las concentraciones de los contaminantes sean las correctas para poder usar el agua de una operación en otra, para lograrlo se necesita “jugar” con las corrientes, al final se obtiene una curva compuesta que mediante una línea de alimentación de agua nos da el pinch y el flujo óptimo para el proceso.

A continuación se muestra un ejemplo para dos contaminantes, sin tomar en cuenta reflujo ni regeneración:

En la siguiente tabla se muestran los datos para dos operaciones que contienen dos contaminantes A y B:

Operación	Contaminante	Masa retirada Δm_{tot} (kg/hr)	Concentración a la entrada C_{in}^{lim} (ppm)	Composición a la salida C_{out}^{lim} (ppm)	f_1^{lim} (ton/hr)
1	A	3	0	100	30
	B	2.4	0	80	
2	A	4	50	150	40
	B	5.6	20	160	

Para examinar los efectos que puede ocasionar un contaminante adicional en el reúso del agua, comenzaremos por encontrar el mínimo flujo de agua fresca “pinch” basándonos únicamente en el contaminante A, sin tomar en cuenta al contaminante B.

A continuación se muestra un diagrama de intervalos de concentración CID (ver métodos algorítmicos) para éste caso

Concentración Δ ppm	Operación 1 (30 te/hr)	Operación 2 (40 te/hr)	Masa retirada kg/s	Acumulación de masa retirada kg/s	Flujo ton/hr
0.00	↑			0.00	0.00
50.00			1.50	1.50	30.00
100.00		↑	3.50	5.00	50.00
150.00			2.00	7.00	16.67

Como se puede observar en el diagrama, el “pinch” se encuentra a 100 ppm de A y se requiere un flujo mínimo de agua de 50 ton/hr, llamaremos a este flujo de agua fresca *aparente 1* ya que no se considera ningún efecto causado por el contaminante B. A continuación se presenta la curva compuesta para el contaminante A:

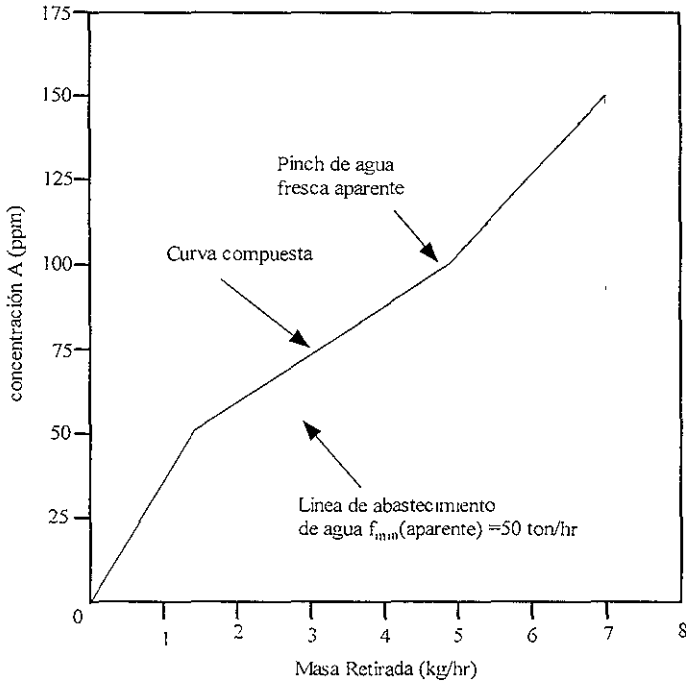


Fig. 3.11

Ya sea del diagrama o de la curva compuesta, podemos determinar que ambas operaciones tienen un pinch a las 100 ppm de A, por lo que consideramos que el agua que deja la operación 1, a una concentración de 100 ppm de A es viable para ser utilizada en la operación 2 a la misma concentración. Lo mismo se hace para el contaminante B, a continuación se presentan el diagrama tomando en cuenta solo el contaminante B:

Concentración B ppm	Operación 1 (30 ton/hr)	Operación 2 (40 ton/hr)	Masa retirada B kg/s	Acumulación de masa retirada kg/s	Flujo ton/hr
0.00	↑		0.60	0.00	0.00
50.00		↑	1.20	0.60	30.00
100.00			3.20	1.80	60.00
150.00			8.00	8.00	150.00

Como se observa en el diagrama, el pinch de agua fresca se encuentra en 60 ton/hr y a los 80 ppm, lo que significa que la corriente de salida de la operación uno que se encuentra a 80 ppm, puede ser reutilizada en la operación 2, ya que cumple con las exigencias de concentración, a continuación se presenta la curva compuesta para el caso del contaminante B:

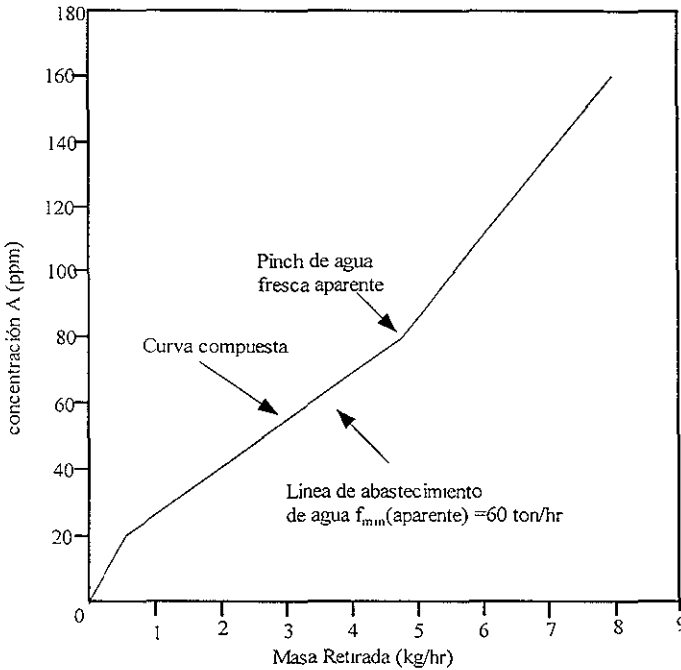


Fig. 3.12

El flujo mínimo aparente para la transferencia de B (60 ton/hr) es mayor que el flujo mínimo aparente para el contaminante A (50 ton/hr). En algunos casos es erróneo suponer que el mayor de los flujos puede ser suficiente para transferir ambos contaminantes, por lo cual, se necesita establecer una metodología que tome en cuenta la forma en que se transportan tanto el contaminante A como el B así como la influencia que ejercen sobre la factibilidad del reúso del agua de la operación 1 a la operación 2.

Para determinar a qué niveles de concentración el contaminante B limita el reúso del agua, se construye el perfil límite de agua para cada operación, trazando la gráfica de la concentración del contaminante A a la entrada y a la salida contra el total de masa transferida. Cabe señalar que se asume que la transferencia del contaminante B se supone es proporcional a la transferencia del contaminante A, en otras palabras, si el 80 % del total de la masa retirada del contaminante A en una operación que use agua fue transferida a una corriente de agua, el 80 % del total de la masa retirada de todos los otros contaminantes también fue transferida, a lo anterior lo llamaremos "transferencia proporcional de masas".

Es importante aclarar, que para simplificar la metodología, la escala de las abscisas está referida al contaminante A, así la concentración de A y B esta presentada en corchetes para cada operación, por ejemplo, [50,40] representa 50 ppm de A y 40 ppm de B, por lo que en el valor de las abscisas se leerá que en ese punto se tiene un valor de 40 ppm que corresponde a la concentración del contaminante A.

LÍNEA DE SUMINISTRO DE AGUA

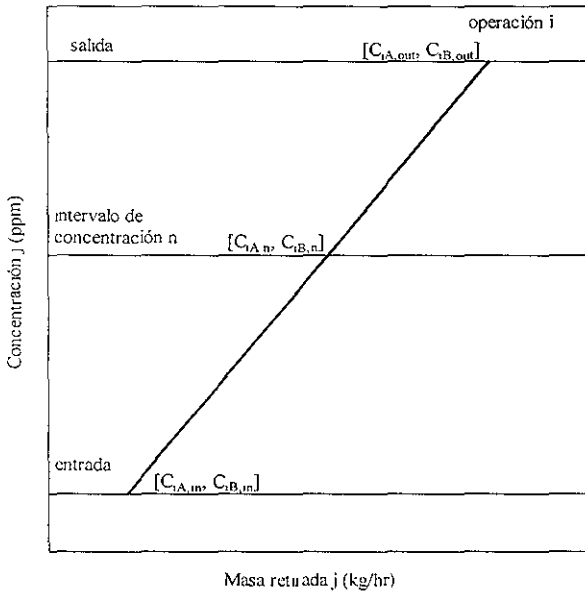


Fig. 3.13

Para dos contaminantes, A y B, la línea de suministro de agua que se mostró anteriormente da la siguiente relación de transferencia de masa proporcional:

$$\begin{aligned} C_{iA,n} - C_{iA,m} &= C_{iB,n} - C_{iB,m} \\ C_{iA,out} - C_{iA,m} &= C_{iB,out} - C_{iB,m} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Donde $C_{j,m}$, $C_{j,n}$ y $C_{j,out}$ son la concentración del contaminante j a la entrada, en el n ésimo intervalo límite de concentración y a la salida de la operación i , respectivamente. Aplicando esta ecuación para verificar la concentración de los contaminantes A y B en los intervalos de concentración 2 y 3 para las operaciones 1 y 2 (marcadas como a y b en el diagrama). Para la operación 1 en el intervalo de concentración 2 (etiquetado como punto a) con los siguientes datos:

$$\begin{aligned} C_{iA,m} &= 0 \text{ ppm} & C_{iA,n} &= 50 \text{ ppm} & C_{iA,out} &= 100 \text{ ppm} \\ C_{iB,m} &= 0 \text{ ppm} & C_{iB,n} &= \text{'' ppm} & C_{iB,out} &= 80 \text{ ppm} \end{aligned}$$

Aplicando la ecuación se tiene:

$$\frac{[50 - 0](ppm)}{[100 - 0](ppm)} = \frac{C_{1B,2} - 0 ppm}{[80 - 0](ppm)}$$

$$C_{1B,2} = 40 ppm$$

De la misma forma, para la ecuación 2 en el intervalo de concentración 3 (etiquetado como punto b) con los siguientes datos:

$$C_{2A,in} = 50 ppm \quad C_{2A,3} = 100 ppm \quad C_{2A,out} = 150 ppm$$

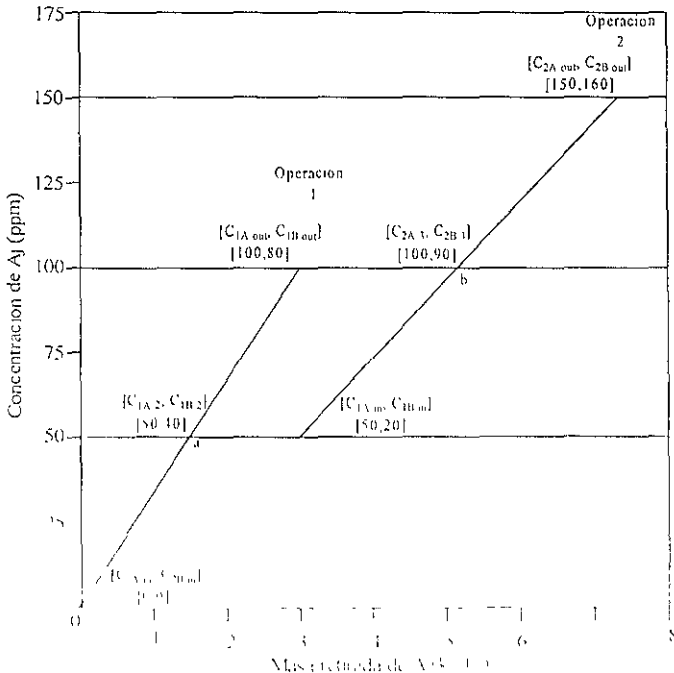
$$C_{2B,in} = 20 ppm \quad C_{2B,3} = ? ppm \quad C_{2B,out} = 160 ppm$$

Aplicando la ecuación se tiene:

$$\frac{[100 - 50](ppm)}{[150 - 50](ppm)} = \frac{C_{2B,3} - 20 ppm}{[160 - 20](ppm)}$$

$$C_{2B,3} = 90 ppm$$

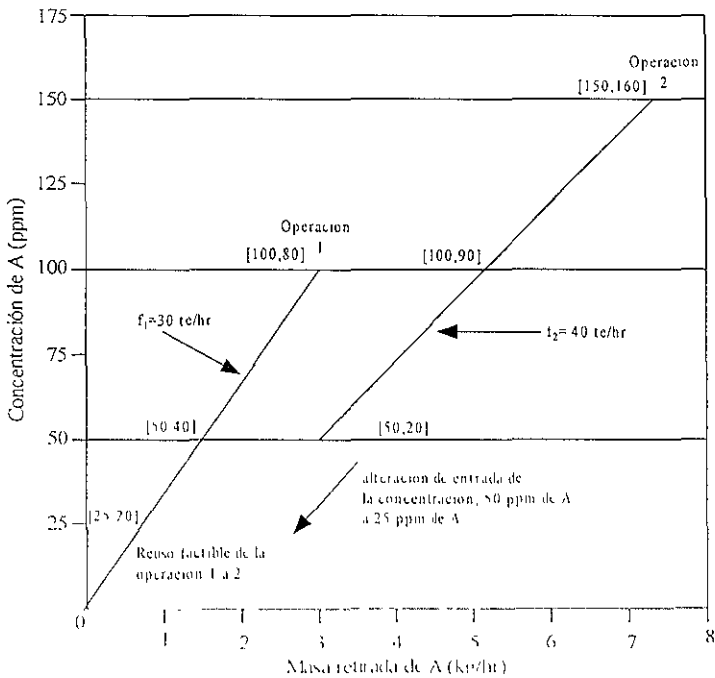
A continuación se muestra la gráfica para las operaciones 1 y 2 con los intervalos de concentración correspondiente:



Cuando buscamos el flujo mínimo asociado a la transferencia de un solo contaminante, asumimos que el agua que deja una operación a cada intervalo de concentración es reusable en cualquier operación que ocurra en el siguiente intervalo, así, reutilizando la cantidad máxima posible de agua que sale de la operación minimizamos los requerimientos de agua fresca. Para aplicar el concepto anterior a problemas que contienen más de un contaminante, debemos asegurar que el reúso del agua que sale de una operación sea factible con respecto a los contaminante que se encuentran presentes, para lograr esto, todas las operaciones se trazan con respecto a una operación de referencia, de la misma forma, todos los contaminantes son referidos a uno solo que llamaremos "contaminante clave".

Tomando la gráfica anterior, podemos ver que el agua en la operación 1, después de haber alcanzado una concentración de 50 ppm de A, también alcanzó una concentración de 40 ppm de B, esto no permite que el agua sea reutilizada en la operación 2 que requiere una concentración de entrada menor a 20 ppm de B. Para usar el agua de la operación 1 en la 2 debemos mover la concentración de entrada del contaminante A en la operación 2 a un punto que corresponda a una concentración de 20 ppm de B en la operación 1.

A continuación se presenta esta alteración en la operación 2:



En la gráfica se puede apreciar que la concentración del contaminante A en la operación 1, a la cual la concentración del contaminante B ha alcanzado 20 ppm, es 25 ppm de A. No solamente se cambió la concentración de entrada del contaminante A en la operación 2, sino que también la concentración de salida en ese intervalo fue aumentada en la misma proporción pero manteniendo el flujo de la operación (f_2) constante, a continuación se muestra la gráfica que representa estos cambios:

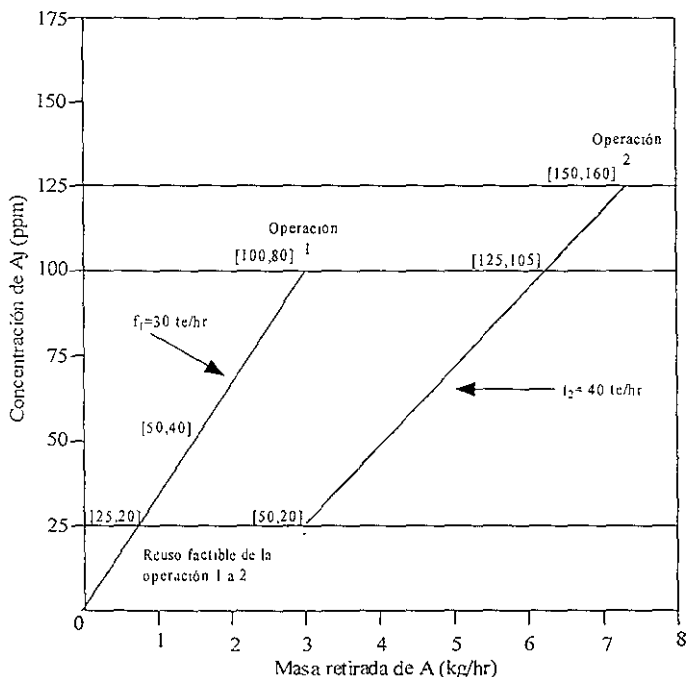


Fig. 3.16

Después del cambio realizado, podemos ver que ningún otro contaminante impide el reúso del agua, así, se asegura que todas las concentraciones están en los intervalos correctos y por lo tanto el agua proveniente de la operación 1, puede ser reutilizada en la operación 2.

Ahora se investiga la posibilidad de reutilizar el agua de la salida de la operación 1 dentro de la operación 2, aquí, el agua que sale de la operación 1 puede ser reusada en la operación 2 ya que la concentración de salida de 100 ppm de A y 80 ppm de B es menor que las 125 ppm de A y las 105 ppm de B que salen del 3 segmento de concentración de la operación 2, así, se puede usar el agua que sale de la operación 1 en un punto de la operación 2 que tenga una concentración de contaminante menor que [125,105], donde la concentración de los contaminantes A o B sea límite

El contaminante A, llega a su punto límite, cuando la verdadera concentración del contaminante llega a las 100 ppm a la salida del segundo intervalo (principio del tercero) en el proceso 1, en cambio, el contaminante B llega a su valor límite, si su valor en el tercer intervalo en la operación 2, es igual a las 80 ppm que es la concentración a la que sale de la operación 1. A continuación se altera la concentración a la salida del intervalo 3 de la operación 2 para que alguno de los dos contaminantes llegue a su valor límite, primero se encontrará el punto sobre la operación 2 donde el valor de A llega a su punto límite con respecto a la operación 1 (100 ppm), para encontrar el punto sobre la operación 2 equivalente para B, se utiliza la misma ecuación de equilibrio que se usó para encontrar los valores de B anteriormente:

$$\frac{C_{iA,n} - C_{iA,in}}{C_{iA,out} - C_{iA,m}} = \frac{C_{iB,n} - C_{iB,m}}{C_{iB,out} - C_{iB,m}}$$

$$\begin{aligned} [100 - 50](ppm) &= C_{2B,3} - 20 ppm \\ [150 - 50](ppm) &= [160 - 20](ppm) \end{aligned}$$

$$C_{2B,3} = 90 ppm$$

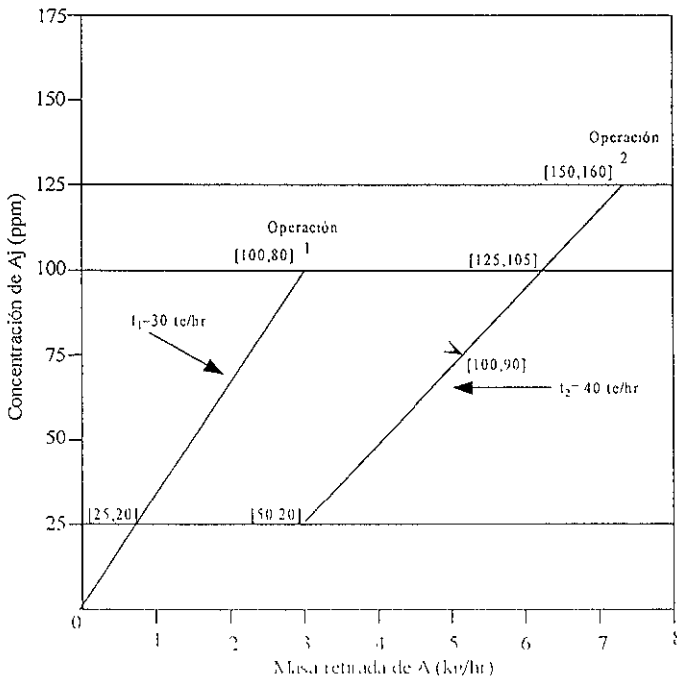


Fig. 3.17

Como la operación 2 ha sufrido cambios se tiene que volver a poner en referencia al eje vertical (concentración de A), con esto se busca encontrar un valor $C_{2,out}^*$ para el cual el contaminante A es límite, para esto se tiene la siguiente información: $C_{1A,3} = C_{2A,3} = 100$ ppm, en el tercer intervalo de concentración, que con la ecuación:

$$\frac{C_{2,n}^* - C_{2,in}^*}{C_{2,out}^* - C_{2,in}^*} = \frac{C_{2A,n} - C_{2A,in}}{C_{2A,out} - C_{2A,in}}$$

Y substituyendo la siguiente información: $C_{2,n}^* = 100$ ppm, $C_{2,in}^* = 25$ ppm, $C_{2A,n} = 100$ ppm, $C_{2A,out} = 150$ ppm y $C_{2A,in} = 50$ ppm, se tiene:

$$\frac{[100 - 25](ppm)}{[C_{2,out}^* - 25](ppm)} = \frac{[100 - 50](ppm)}{[150 - 50](ppm)}$$

$$C_{2,out}^* = 175 \text{ ppm}$$

Una vez que se encontró esta nueva composición a la salida de 175 ppm, cuando A llega a su valor límite, se mueve la gráfica hacia ese nuevo punto. Ya que la composición anterior era de 150 ppm, llamaremos a este nuevo punto "concentración relativa" y la denotaremos con " * ", que indica que la concentración del contaminante A es una escala relativa, así, si la operación 2 va de 150 a 50 ppm, que es la concentración actual del contaminante A, va de 175 a 25 ppm en la escala relativa de concentración del contaminante A*.

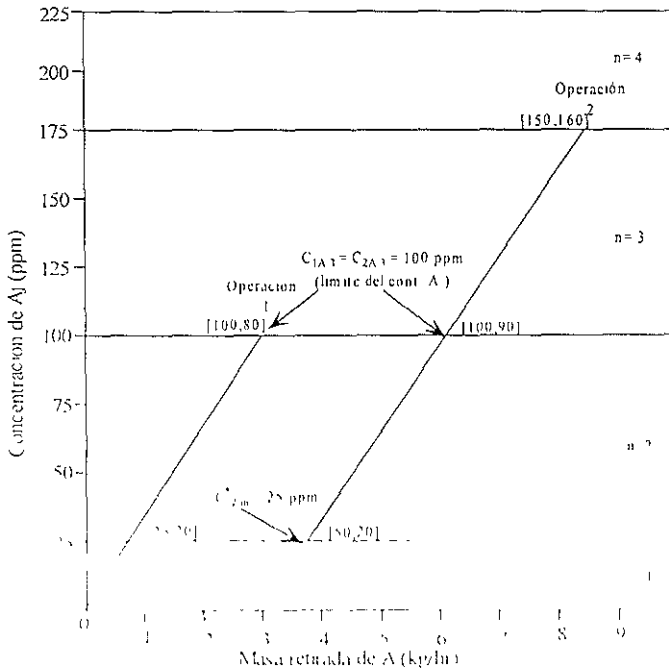


Fig. 3.18

La metodología aplicada para el caso del valor límite de A, también puede ser aplicada para B, donde el valor límite de B sería 80 ppm, que está establecido a la salida de la operación 1, y es menor a la concentración del tercer intervalo de la operación 2, 90 ppm. Así, se busca obtener una $C_{2,out}^*$, que sería la concentración de salida de la operación dos con respecto al eje vertical, y asumiendo que el contaminante B llega a su valor límite, esto es: $C_{1B,3} = C_{2B,3} = 80$ ppm. Aplicando la siguiente ecuación al contaminante B para la operación 2 en el tercer intervalo de concentración:

$$\frac{C_{2,n}^* - C_{2,in}^*}{C_{2,out}^* - C_{2,in}^*} = \frac{C_{2B,n} - C_{2B,in}}{C_{2B,out} - C_{2B,in}}$$

Sabiendo que $C_{2,n}^* = 100$ ppm, $C_{2,in}^* = 25$ ppm, $C_{2B,n} = 80$ ppm, $C_{2B,in} = 20$ ppm, $C_{2B,out} = 160$ ppm, sustituyendo los datos y resolviendo para la ecuación anterior:

$$\frac{[100 - 25](ppm)}{C_{2,out}^* - 25(ppm)} = \frac{[80 - 20](ppm)}{[160 - 20](ppm)}$$

$$C_{2,out}^* = 200 \text{ ppm}$$

Este resultado nos dice que cuando el contaminante B llega a ser el límite, debemos mover la salida de la operación 2 a una concentración de 200 ppm de B en el eje vertical, una vez más éste movimiento de la concentración nos da una concentración relativa (200 ppm de B), ya que la concentración de salida actual es $C_{2B,out} = 160$ ppm, como es indicado en la siguiente figura:

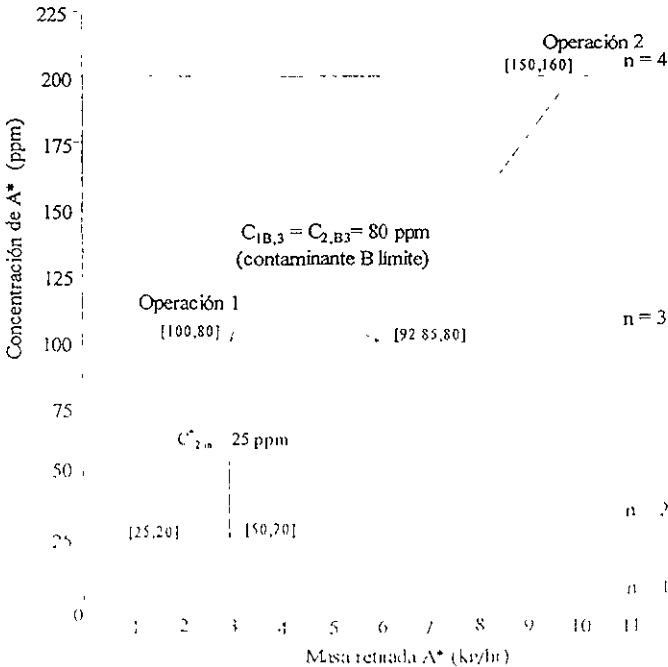


Fig. 3.19

Comparando los resultados obtenidos para A límite y B límite, concluimos que el mejor resultado se da cuando se toma al contaminante A como contaminante límite, esto se debe a que por regla general, siempre se requiere que a la salida de una red de reúso de agua la concentración de contaminantes sea la más pequeña posible ($175 \text{ ppm} < 200 \text{ ppm A}^*$), esto es para facilitar el reúso del agua en otra operación.

A continuación se muestra la curva compuesta final (tomando como contaminante límite A) así como el diagrama CID:

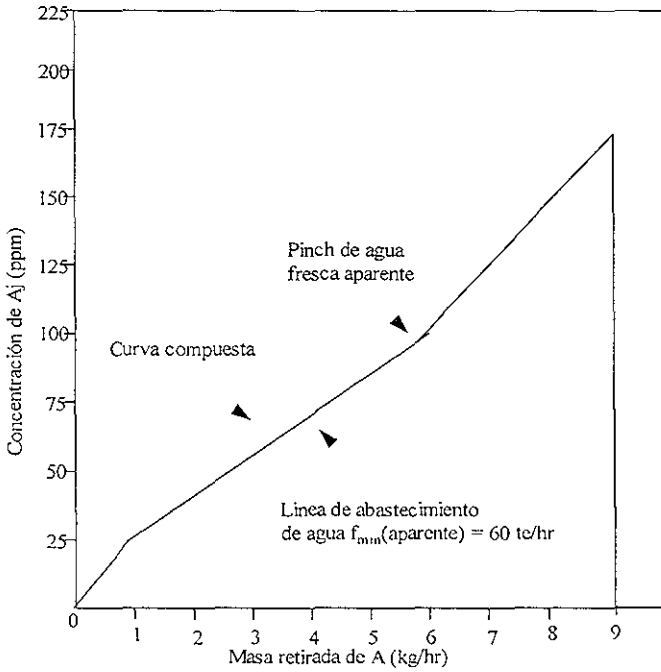


Fig 3.20

Concentración B ppm	Operación 1 (30 ton/hr)	Operación 2 (40 ton/hr)	Masa retirada A* kg/s	Acumulación de masa retirada kg/s	Flujo ton/hr
0.00	↑		0.75	0.00	0.00
25.00			5.25	0.75	30.00
100.00		↑	3.00	6.00	60.00
175.00				9.00	51.43

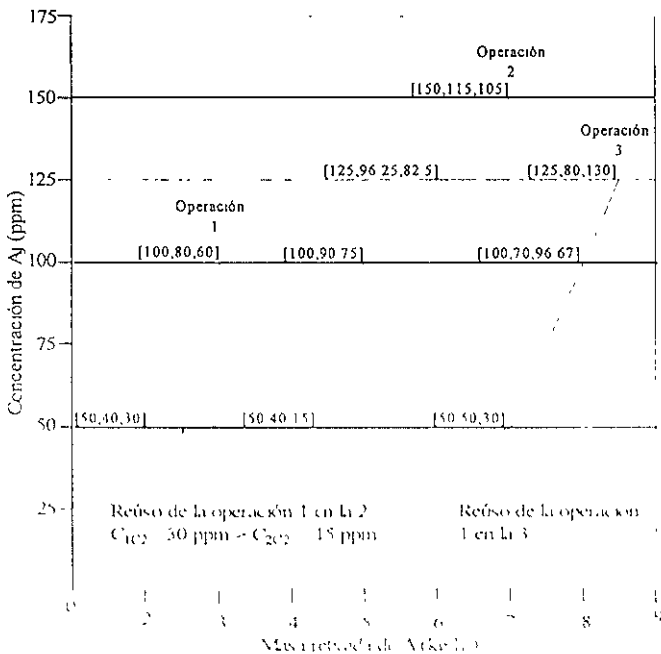
Como se puede ver en el diagrama CID, el flujo mínimo es de 60 ton/hr, este valor coincide con el valor obtenido al sólo considerar al contaminante B, esto es sólo una casualidad ya que es erróneo pensar que al analizar por separado a cada uno de los componentes de un problema, se pueda dar como resultado válido el flujo mayor que se obtenga, es indispensable investigar la factibilidad del reúso del agua que sale de una operación para que sea utilizada en otra, y esto conlleva a cambiar las concentraciones de entrada y de salida (como se hizo anteriormente) de una o varias operaciones (siempre dejando una de referencia) en una gráfica de perfiles límites de agua.

3.5 MÉTODO ALGORÍTMICO PARA EL CASO MULTICOMPONENTE

Tomemos como referencia los datos de la siguiente tabla:

Operación i	Contaminante j	$\Delta m_{i,j,m}$ (kg/hr)	$C_{i,j,m}$ (ppm)	$C_{i,j,out}$ (ppm)	f_i^{lim} (ton/hr)
1	A	3.0	0	100	30
	B	2.4	0	80	
	C	1.8	0	60	
2	A	4.0	50	150	40
	B	3.0	40	115	
	C	3.6	15	105	
3	A	1.5	50	125	20
	B	0.6	50	80	
	C	2.0	30	130	

A continuación se muestran los pasos para obtener el perfil límite de agua utilizando la metodología que indican MANN y LIU (1999), considerando al contaminante A como contaminante base y al contaminante B como contaminante limitante:



Cabe recordar que las concentraciones en los diferentes intervalos de concentración se obtuvieron siguiendo la siguiente fórmula:

$$\frac{C_{1A,n} - C_{1A,m}}{C_{1A,out} - C_{1A,m}} = \frac{C_{1B,n} - C_{1B,m}}{C_{1B,out} - C_{1B,m}} = \frac{C_{1C,n} - C_{1C,m}}{C_{1C,out} - C_{1C,m}}$$

Que no es más que un caso particular de la ecuación:

$$\begin{aligned} C_{iA,n} - C_{iA,m} &= C_{iB,n} - C_{iB,m} \\ C_{iA,out} - C_{iA,m} &= C_{iB,out} - C_{iB,m} \end{aligned}$$

Que se vio cuando se explicó en el caso para multicontaminantes.

Como el propósito es minimizar los gastos de agua mediante la mejor posibilidad de reúso de la misma, se debe buscar la concentración máxima que un proceso permite para el suministro de agua, en éste caso, el proceso 2 en el segundo intervalo de concentración (50,40,15) no permite la reutilización de agua proveniente del proceso 1 en el mismo intervalo (50,40,30), debido a que el contaminante C, presenta una mayor concentración, a continuación se presenta el arreglo que soluciona éste problema:

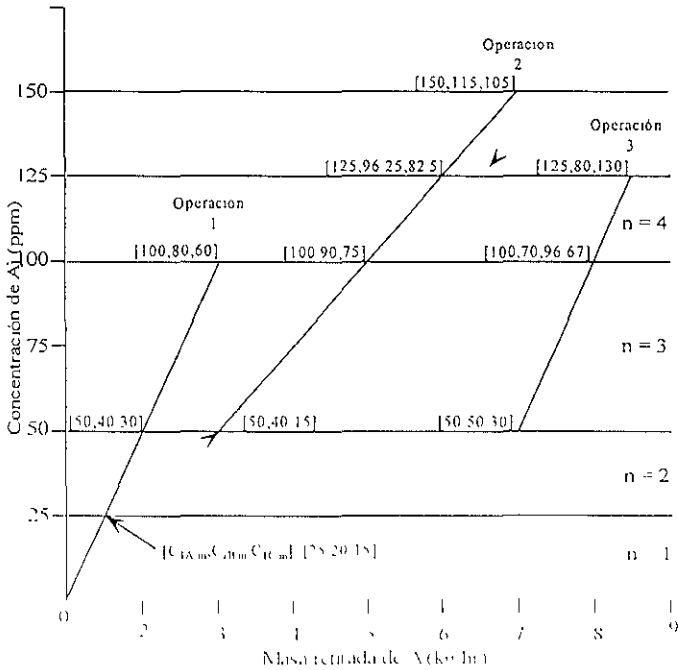


Fig. 3.22

La operación 1 termina en el cuarto intervalo de concentración y debemos investigar la posibilidad de reúso del agua proveniente de dicha operación en las operaciones 2 y 3, debido a que el agua que deja la operación 3 tiene una concentración de B igual a 80 ppm, que es idéntica a la concentración de B en la operación 1, no es recomendable la reutilización de 1 en 3, ya que se puede considerar que terminan en el mismo intervalo de concentración, ver figura siguiente:

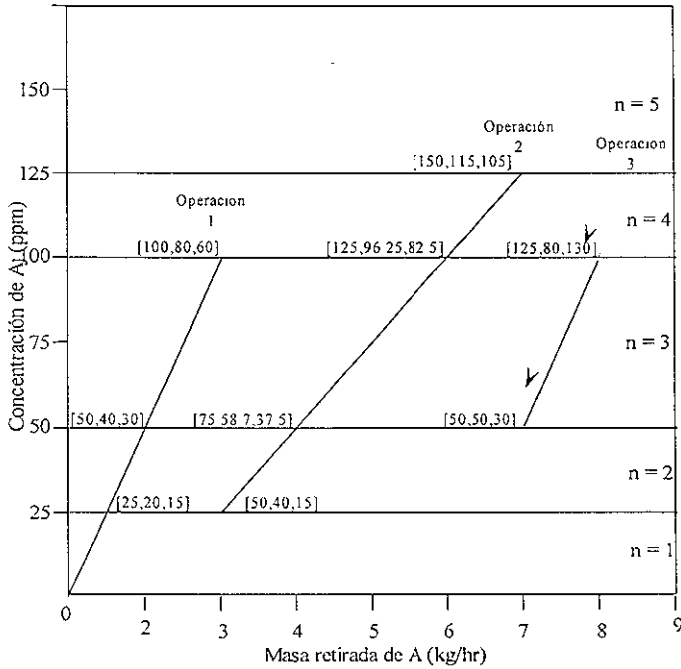


Fig. 3.23

Además el reúso de la operación 3 en la 1 o en la 2 tampoco es factible, ya que las concentraciones a la salida son mayores en la operación 3 lo cual evita su reutilización, así como el reúso de la operación 2 en la 3 por las mismas causas.

Sólo nos queda la reutilización de la operación 1 en la operación 2, debido a que la operación 2 tiene una concentración de salida mayor que la concentración de salida de la operación 1 es posible el reúso de ésta última en la primera pero debemos encontrar un punto en la gráfica donde las concentraciones de la operación 2 sean iguales o menores que las concentraciones de salida de la operación 1 (100 ppm A, 80 ppm B, 60 ppm C), en la siguiente gráfica se muestran los valores en dicho punto para la operación 2

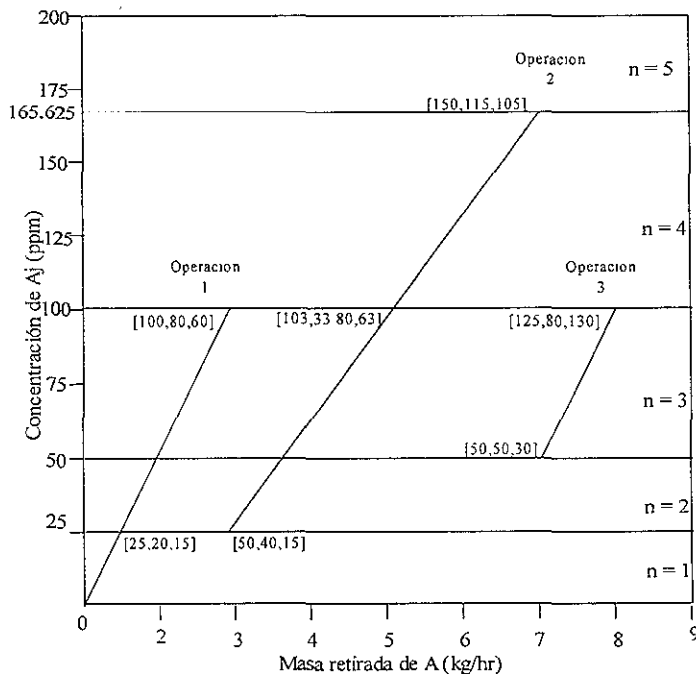


Fig. 3.24

Una vez obtenidos todos los puntos en la gráfica se hace el diagrama CID para obtener el flujo mínimo de agua, recuérdese que todo lo anterior se hizo con la premisa de que el contaminante base era A y el contaminante limitante era B.

Concentración A ppm	Operación 1 (30 ton/hr)	Operación 2 (40 ton/hr)	Operación 3 (20 ton/hr)	Masa retirada A kg/s	Acumulación de masa retirada kg/s	Flujo ton/hr
0.0	↑			0.75	0.00	0.00
25		↑		1.75	0.75	30.00
50			↑	4.50	2.50	50.00
100				2.63	7.00	70.00
165.625					9.63	98.11

El diagrama CID, nos muestra que se necesitan 70 ton/h de agua para satisfacer todas las necesidades de agua de los tres procesos, ahora, emplearemos los tres pasos del método matemático para minimizar aún más el consumo de agua.

Paso 1. La operación 1 es la única que existe en el primer intervalo de concentración, se calcula θ_{11} con la ecuación (2.16).

$$\theta_{11} = \max\left(\frac{25-0}{25}, \frac{20-0}{20}, \frac{15-0}{15}\right)$$

$$\theta_{11} = \max(1,1,1)$$

$$\theta_{11} = 1$$

Se puede calcular el flujo requerido de agua fresca por la operación 1 en el primer intervalo de concentración y el flujo del agua de reúso en el siguiente intervalo utilizando la ecuación (2.22):

$$F_{11} = T_{12} = 1 \cdot 30 \text{ ton/hr} = 30 \text{ ton/hr}$$

La concentración del agua de reúso para el segundo intervalo de concentración se obtiene de la ecuación (2.20):

$$W_{1A2} = 0 + \frac{30 \text{ ton/hr}(25 \text{ ppm} - 0 \text{ ppm})}{30 \text{ ton/hr}} = 25 \text{ ppm}$$

$$W_{1B2} = 0 + \frac{30 \text{ ton/hr}(20 \text{ ppm} - 0 \text{ ppm})}{30 \text{ ton/hr}} = 20 \text{ ppm}$$

$$W_{1C2} = 0 + \frac{30 \text{ ton/hr}(15 \text{ ppm} - 0 \text{ ppm})}{30 \text{ ton/hr}} = 15 \text{ ppm}$$

Paso 2. Ninguna operación termina en el segundo intervalo de concentración, así que se puede eliminar $q_{h,m,n}$ se resuelven las ecuaciones (2.15), (2.16) y (2.17) para obtener los requerimientos de la operación 1 en el segundo intervalo de concentración:

$$30 \text{ ton/hr} + F_{12} = \theta_{12} * 30 \text{ ton/hr}$$

$$\theta_{12} = \max\left[\frac{50-25}{50-W_{1A2}}, \frac{40-20}{40-W_{1B2}}, \frac{30-15}{30-W_{1C2}}\right]$$

$$W_{1A2} = \frac{30\text{ton/hr} * 25\text{ppm}}{30\text{ton/hr} + F_{1,2}}$$

$$W_{1B2} = \frac{30\text{ton/hr} * 20\text{ppm}}{30\text{ton/hr} + F_{1,2}}$$

$$W_{1C2} = \frac{30\text{ton/hr} * 15\text{ppm}}{30\text{ton/hr} + F_{1,2}}$$

Se tiene un sistema de 5 incógnitas con 5 ecuaciones, resolviendo de manera analítica se tiene:

$$F_{1,2} = 0 \text{ ton/hr}$$

$$\theta_{12} = 1$$

$$W_{1A2} = 25 \text{ ppm}$$

$$W_{1B2} = 20 \text{ ppm}$$

$$W_{1C2} = 15 \text{ ppm}$$

Actualizamos la concentración y flujo disponible en el tercer intervalo de concentración con las ecuaciones (2.20) y (2.21):

$$T_{13} = 1 * 30 \text{ ton/hr} = 30 \text{ ton/hr}$$

$$W_{1A3} = 25\text{ppm} + \frac{30\text{ton/hr}(50\text{ppm} - 25\text{ppm})}{30\text{ton/hr}} = 50\text{ppm}$$

$$W_{1B3} = 20\text{ppm} + \frac{30\text{ton/hr}(40\text{ppm} - 20\text{ppm})}{30\text{ton/hr}} = 40\text{ppm}$$

$$W_{1C3} = 15\text{ppm} + \frac{30\text{ton/hr}(30\text{ppm} - 15\text{ppm})}{30\text{ton/hr}} = 30\text{ppm}$$

Ninguna operación termina en el tercer intervalo de concentración, así que se puede eliminar $q_{n,m < n}$ se resuelven las ecuaciones (2.15), (2.16) y (2.17) para obtener los requerimientos de la operación l en el tercer intervalo de concentración.

$$30\text{ton/hr} + F_{1,3} = \theta_{1,3} * 30\text{ton/hr}$$

$$\theta_{1,3} = \max \left[\begin{array}{ccc} 100 & 50 & 80 - 40 & 60 - 30 \\ 100 - H_{1,1} & 80 - H_{1B,1} & 60 - H_{1C,1} \end{array} \right]$$

$$W_{1A3} = \frac{30 \text{ ton/hr} * 50 \text{ ppm}}{30 \text{ ton/hr} + F_{1,3}}$$

$$W_{1B3} = \frac{30 \text{ ton/hr} * 40 \text{ ppm}}{30 \text{ ton/hr} + F_{1,3}}$$

$$W_{1C3} = \frac{30 \text{ ton/hr} * 30 \text{ ppm}}{30 \text{ ton/hr} + F_{1,3}}$$

Se tiene un sistema de 5 incógnitas con 5 ecuaciones, resolviendo de manera analítica se tiene:

$$F_{1,3} = 0 \text{ ton/hr}$$

$$\theta_{13} = 1$$

$$W_{1A3} = 50 \text{ ppm}$$

$$W_{1B3} = 40 \text{ ppm}$$

$$W_{1C3} = 30 \text{ ppm}$$

Actualizamos la concentración y flujo disponible en el cuarto intervalo de concentración con las ecuaciones (2.20) y (2.21):

$$T_{14} = 1 * 30 \text{ ton/hr} = 30 \text{ ton/hr}$$

$$W_{1A4} = 50 \text{ ppm} + \frac{30 \text{ ton/hr}(100 \text{ ppm} - 50 \text{ ppm})}{30 \text{ ton/hr}} = 100 \text{ ppm}$$

$$W_{1B4} = 40 \text{ ppm} + \frac{30 \text{ ton/hr}(80 \text{ ppm} - 40 \text{ ppm})}{30 \text{ ton/hr}} = 80 \text{ ppm}$$

$$W_{1C4} = 30 \text{ ppm} + \frac{30 \text{ ton/hr}(60 \text{ ppm} - 30 \text{ ppm})}{30 \text{ ton/hr}} = 60 \text{ ppm}$$

Para la operación 2:

La operación 2 comienza en el segundo intervalo de concentración:

$$\theta_{2,2} = \max \left(\frac{67.78 - 50}{67.78}, \frac{53.33 - 40}{53.33}, \frac{30 - 15}{30} \right)$$

$$\theta_{2,2} = \max(0.2623, 0.2499, 0.5)$$

$$\theta_{2,2} = 0.5$$

Se puede calcular el flujo requerido de agua fresca por la operación 2 en el segundo intervalo de concentración y el flujo del agua de reuso en el siguiente intervalo utilizando la ecuación (2.22)

$$F_{22} = 0.5 \cdot 40 \text{ ton/hr} = 20 \text{ ton/hr}$$

$$T_{23} = 30 \text{ ton/hr} + 0 \text{ ton/hr}$$

La concentración del agua de reúso para el segundo intervalo de concentración se obtiene de la ecuación (2.20):

$$W_{2A3} = 0 + \frac{40 \text{ ton/hr}(67.78 \text{ ppm} - 50 \text{ ppm})}{20 \text{ ton/hr}} = 35.56 \text{ ppm}$$

$$W_{2B3} = 0 + \frac{40 \text{ ton/hr}(53.83 \text{ ppm} - 40 \text{ ppm})}{20 \text{ ton/hr}} = 26.66 \text{ ppm}$$

$$W_{2C3} = 0 + \frac{40 \text{ ton/hr}(30 \text{ ppm} - 15 \text{ ppm})}{20 \text{ ton/hr}} = 30 \text{ ppm}$$

Ninguna operación termina en el tercer intervalo de concentración, así que se puede eliminar $q_{l,m \leq n}$ se resuelven las ecuaciones (2.15), (2.16) y (2.17) para obtener los requerimientos de la operación l en el tercer intervalo de concentración:

$$20 \text{ ton/hr} + F_{2,3} = \theta_{2,3} \cdot 40 \text{ te/hr}$$

$$\theta_{2,3} = \max \left[\begin{matrix} 103.33 - 67.78 & 80 - 53.33 & 63 - 30 \\ 103.33 - W_{2A,3} & 80 - W_{2B,3} & 63 - W_{2C,3} \end{matrix} \right]$$

$$W_{2A3} = \frac{20 \text{ ton/hr} \cdot 35.56 \text{ ppm}}{20 \text{ ton/hr} + F_{2,3}}$$

$$W_{2B3} = \frac{20 \text{ ton/hr} \cdot 26.66 \text{ ppm}}{20 \text{ ton/hr} + F_{2,3}}$$

$$W_{2C3} = \frac{20 \text{ ton/hr} \cdot 30 \text{ ppm}}{20 \text{ ton/hr} + F_{2,3}}$$

Se tiene un sistema de 5 incógnitas con 5 ecuaciones, resolviendo de manera analítica se tiene:

$$F_{2,3} = 10.476 \text{ ton/hr}$$

$$\theta_{2,3} = 0.762$$

$$W_{2A,3} = 23.336 \text{ ppm}$$

$$W_{2B,3} = 17.196 \text{ ppm}$$

$$W_{2C,3} = 19.687 \text{ ppm}$$

Actualizamos la concentración y flujo disponible en el cuarto intervalo de concentración con las ecuaciones (2.20) y (2.21):

$$T_{24} = 0.762 * 40 \text{ ton/hr} = 30.476 \text{ ton/hr}$$

$$W_{2A4} = 23.336 \text{ ppm} + \frac{40 \text{ ton/hr} (103.33 \text{ ppm} - 67.78 \text{ ppm})}{30.476 \text{ ton/hr}} = 69.996 \text{ ppm}$$

$$W_{2B4} = 17.496 \text{ ppm} + \frac{40 \text{ ton/hr} (80 \text{ ppm} - 53.33 \text{ ppm})}{30.476 \text{ ton/hr}} = 52.5 \text{ ppm}$$

$$W_{2C4} = 19.687 \text{ ppm} + \frac{40 \text{ ton/hr} (63 \text{ ppm} - 30 \text{ ppm})}{30.476 \text{ ton/hr}} = 63 \text{ ppm}$$

Ninguna operación termina en el tercer intervalo de concentración, así que se puede eliminar $q_{li,msn}$ se resuelven las ecuaciones (2.15), (2.16) y (2.17) para obtener los requerimientos de la operación 1 en el tercer intervalo de concentración, se toma la consideración de que $F_{24} = 0$ ton/hr:

En el intervalo 4 termina la operación 1, se calcula el flujo que esta disponible para la operación 2 por lo tanto la $q_{li,msn}$ no se puede eliminar por lo tanto se tienen cinco incógnitas con cinco ecuaciones que pueden resolverse de forma analítica.

$$30.476 \text{ ton/hr} + q_{24} = \theta_{2,4} * 40 \text{ ton/hr}$$

$$\theta_{2,4} = \max \left[\begin{array}{l} 150 - 103.33 \quad 115 - 80 \quad 105 - 63 \\ 150 - W_{2A,4} \quad 115 - W_{2B,4} \quad 105 - W_{2C,4} \end{array} \right]$$

$$W_{2A4} = \frac{30.476 \text{ ton/hr} * 69.996 \text{ ppm} + q_{24} * 100 \text{ ton/hr}}{30.476 \text{ ton/hr} + q_{24}}$$

$$W_{2B4} = \frac{30.476 \text{ ton/hr} * 52.2 \text{ ppm} + q_{24} * 80 \text{ ton/hr}}{20 \text{ te/hr} + q_{24}}$$

$$W_{2C4} = \frac{30.476 \text{ ton/hr} * 63 \text{ ppm} + q_{24} * 60 \text{ ton/hr}}{20 \text{ ton/hr} + q_{24}}$$

$$q_{2,4} = 11.701 \text{ ton/hr}$$

$$\theta_{2,4} = 1.054$$

$$W_{2A,4} = 78.319 \text{ ppm}$$

$$W_{2B,4} = 60.129 \text{ ppm}$$

$$W_{2C,4} = 62.168 \text{ ppm}$$

Actualizamos la concentración y flujo disponible en el quinto intervalo de concentración con las ecuaciones (2.20) y (2.21)

$$T_{25} = 11.701 + 30.476 \text{ ton/hr} = 42.177 \text{ ton/hr}$$

$$W_{2A5} = 78.319 \text{ ppm} + \frac{40 \text{ ton/hr}(150 \text{ ppm} - 103.33 \text{ ppm})}{42.177 \text{ ton/hr}} = 122.581 \text{ ppm}$$

$$W_{2B5} = 60.129 \text{ ppm} + \frac{40 \text{ ton/hr}(115 \text{ ppm} - 80 \text{ ppm})}{42.177 \text{ ton/hr}} = 93.323 \text{ ppm}$$

$$W_{2C5} = 62.168 \text{ ppm} + \frac{40 \text{ ton/hr}(105 \text{ ppm} - 63 \text{ ppm})}{42.177 \text{ ton/hr}} = 102 \text{ ppm}$$

Para la operación 3, comienza en el tercer intervalo de concentración:

$$\theta_{33} = \max \left(\begin{matrix} 125 - 50 & 80 - 50 & 130 - 30 \\ 125 & 80 & 130 \end{matrix} \right)$$

$$\theta_{33} = \max(0.6, 0.375, 0.769)$$

$$\theta_{33} = 0.769$$

Se puede calcular el flujo requerido de agua fresca por la operación 3 en el tercer intervalo de concentración y el flujo del agua de reúso en el siguiente intervalo utilizando la ecuación (2.22):

$$F_{33} = T_{34} = 0.769 * 20 \text{ ton/hr} = 15.385 \text{ ton/hr}$$

La concentración del agua de reúso para el cuarto intervalo de concentración se obtiene de la ecuación (2.20):

$$W_{3A4} = 0 + \frac{20 \text{ ton/hr}(125 \text{ ppm} - 50 \text{ ppm})}{15.385 \text{ ton/hr}} = 46.215 \text{ ppm}$$

$$W_{3B4} = 0 + \frac{20 \text{ ton/hr}(80 \text{ ppm} - 50 \text{ ppm})}{15.385 \text{ ton/hr}} = 34.671 \text{ ppm}$$

$$W_{3C4} = 0 + \frac{20 \text{ ton/hr}(130 \text{ ppm} - 30 \text{ ppm})}{15.385 \text{ ton/hr}} = 42.9 \text{ ppm}$$

Al final se suman los flujos de cada operación para obtener el nuevo valor de la alimentación total que satisface las necesidades de agua fresca de los tres procesos

$$F_{tot} = 30 \text{ ton/hr} + 20 \text{ ton/hr} + 15 \text{ ton/hr} = 65 \text{ ton/hr}$$

Como se puede observar se logró disminuir de 70 ton/hr a 65 ton/hr usando la metodología propuesta, lo que significa una disminución considerable en la alimentación de agua fresca

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

CAPITULO IV

COMPARACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE TRANSFERENCIA DE MASA

Una vez que se tiene un panorama más amplio de las metodologías, ahora se hace una comparación entre estas, para hacer la comparación se tomo un ejemplo tanto de MANN Y LIU (1999) como de EL-HALWAGI (1997) y se resolvió siguiendo los pasos del otro autor, esto es, se tomo un problema de EL-HALWAGI (1997) y se resolvió con la metodología de MANN Y LIU (1999) y viceversa.

El objetivo de esta comparación es poder estimar que pese a que las metodologías usan procedimientos un poco “diferentes” los resultados son similares, primero se hace la comparación para un ejemplo de EL-HALWAGI (1997) con la metodología de MANN Y LIU (1999).

4.1 COMPARACION DE LA METODOLOGÍA DE MANN Y LIU (1999) PARA UN EJEMPLO DE EL-HALWAGI (1997)

Se presentan los siguientes datos obtenidos de un ejemplo establecido por EL-HALWAGI (1997):

Corriente Rica	Flujo R_i^c , kg mol/s	Composición a la alimentación (fracción peso) Y_j^*	Composición deseada (fracción peso) Y_j'	Δm kgmol
R_1	2	0.050	0.01	0.16
R_2	1	0.030	0.006	0.024

Como se vio anteriormente, EL-HALWAGI (1997) considera a las corrientes ricas como aquellas que tienen la presencia de algún contaminante que se desea remover y a las corrientes pobres a los Agentes Separadores de Masa (ASM) cuyo fin es remover el contaminante deseado, ahora, viendo el problema desde otra perspectiva, la corriente rica es una corriente de proceso que suponemos necesita agua, esta agua, al entrar en contacto con el proceso, captura cierta cantidad de materia de éste (masa removida), al salir de la primera operación, el agua tiene cierta concentración que le permite o no ser reutilizada en la siguiente operación, las concentraciones a la entrada y salida de cada operación (R_1 y R_2) se tiene como datos, pero se deben de cambiar de fracción peso a ppm, para ser congruentes con las unidades que maneja MANN Y LIU (1999), a su vez el flujo debe cambiarse a ton/hr, a continuación se muestra un ejemplo de cálculo para cada caso:

Para el cambio de fracción peso a ppm:

Se tiene un flujo de 2 kg/s, el cual contiene un 5 % de contaminante, entonces se tiene, $2 \text{ kg/s} \cdot 0.05 = 0.1 \text{ kg}$ de contaminante y por diferencia se tienen 1.9 kg de la otra sustancia

Se sabe que $\text{ppm} = \frac{\text{mg}}{\text{l}}$, y considerando que la densidad de la otra sustancia es 1 kg/l, haciendo las conversiones necesarias se tiene

$$\left[0 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \cdot \left[\frac{1000 \text{g}}{1 \text{kg}} \right] \cdot \left[\frac{1000 \text{mg}}{1 \text{g}} \right] \cdot \left[\frac{1}{2 \text{L}} \right] = 50000 \text{ ppm}$$

Convirtiendo el flujo de kg/s a ton/hr:

$$\left[\frac{2\text{kg}}{\text{s}} \right] * \left[\frac{1\text{ton}}{1000\text{kg}} \right] * \left[\frac{3600\text{s}}{1\text{hr}} \right] = 3.6\text{ton/hr}$$

En la siguiente tabla se muestran los datos corregidos:

Corriente Rica	Flujo R_1^C , ton/h	Composición a la alimentación (ppm)	Composición deseada (ppm)	Δm kg/mol
R_1	3.6	30000	6000	84.41
R_2	7.2	50000	10000	288

Nótese que las composiciones están al revés, ya que la concentración de entrada debe ser menor que la de salida, esto se debe a que la corriente capta contaminantes durante el proceso, acomodando la tabla se tiene:

Corriente Pobre	Flujo R_1^C , ton/h	Composición a la alimentación ppm	Composición deseada ppm	Δm kg/hr
R_1	3.6	6000	30000	84.41
R_2	7.2	10000	50000	288

A continuación se muestra la curva compuesta para este caso:

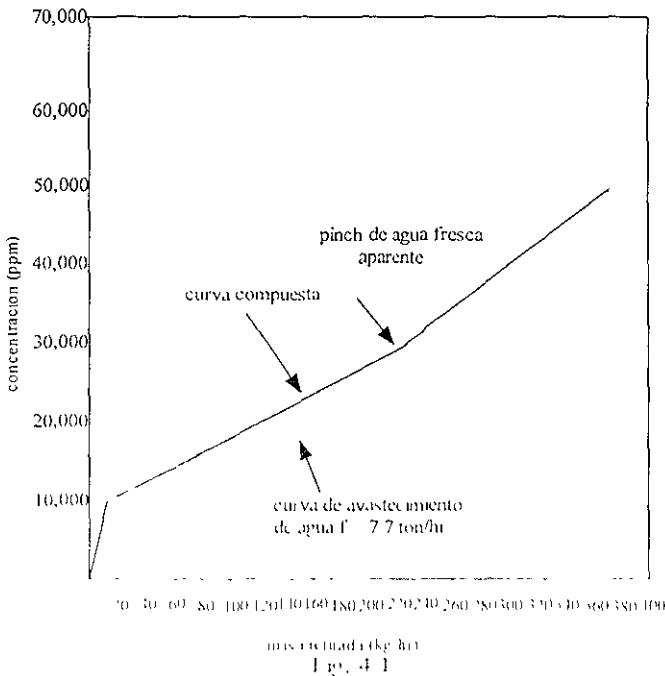


Fig. 4.1

El resultado obtenido para el flujo mínimo de agua, tiene un error del 7 % con respecto al resultado obtenido por EL-HALWAGI (1997) que es de 7.2 ton/hr, que considerando que no se tomaron los datos de equilibrio que venían en el ejemplo base y que se hicieron varias consideraciones al respecto, se puede concluir que el resultado obtenido no nos aleja mucho de nuestro objetivo que era el de optimizar el flujo e agua.

4.2 COMPARACION DE LA METODOLOGÍA DE EL-HALWAGI PARA UN EJEMPLO DE MANN Y LIU (1999)

A continuación se presenta un ejemplo de MANN y LIU (1999), resuelto con la metodología de EL-HALWAGI (1997), para este ejemplo se tienen los siguientes datos:

Operación	Comp. de Entrada C^m (ppm)	Comp. de Salida C^{out} (ppm)	f^{im} (ton/hr)
R ₁	0	75	50
R ₂	50	100	20
R ₃	75	125	20

Estas operaciones son consideradas como corrientes ricas, cambiando las unidades a las requeridas por la metodología de EL-HALWAGI (1997), fracción peso, flujo en kg/s. Los pasos a seguir para el cambio de unidades se dan a continuación.

Convirtiendo el flujo de kg/s a ton/hr:

$$\left[\frac{50 \text{ ton}}{h} \right] * \left[\frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \right] * \left[\frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}} \right] = 13.89 \text{ kg/s}$$

Para pasar de ppm a fracción peso, suponiendo que la densidad del flujo es 1:

$$75 \text{ ppm} = \left[\frac{75 \text{ mg}}{L} \right] * \left[\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \right] * \left[\frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} \right] * \left[\frac{13.89 \text{ L}}{s} \right] * \left[\frac{1}{13.89 \text{ kg}} \right] = 0.000075$$

A continuación se presenta la tabla con los cambios.

Operación	f^{im} (kg/s)	Comp. De Entrada y^i	Comp. De Salida y^j
R ₁	13.89	0.0000749	0
R ₂	5.56	0.0001	0.00005
R ₃	5.56	0.000125	0.000075

Se añade la masa retirada (Δm) en la tabla, utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta m_{R1} = C_1 (v^1 - v_1^1)$$

Operación	f^{im} (kg/s)	Comp. De Entrada y^s	Comp. de Salida y^t	Masa retirada Δm_{tot}
R ₁	13.89	0.0000749	0	0.00104
R ₂	5.56	0.0001	0.00005	0.000278
R ₃	5.56	0.000125	0.000075	0.000278

Para la corriente pobre (corriente de agua). La corriente pobre se considera que es el agua, ya que es ésta la que va a “retirar” las impurezas de las otras corrientes, para obtenerla se utilizaron los resultados de la corriente de abastecimiento de agua que obtuvo MANN y LIU (1999) en este ejemplo. Como los resultados están reportados en unidades diferentes (concentración = ppm, flujo = ton/hr), se hacen los cambios necesarios utilizando la metodología que se explico anteriormente, a continuación se muestran los datos para esta corriente:

Operación	f^{im} (kg/s)	Comp. de Entrada x^s	Comp. de Salida x^t
S ₁	15.74	0	0.00010145

Con los siguientes datos de equilibrio:

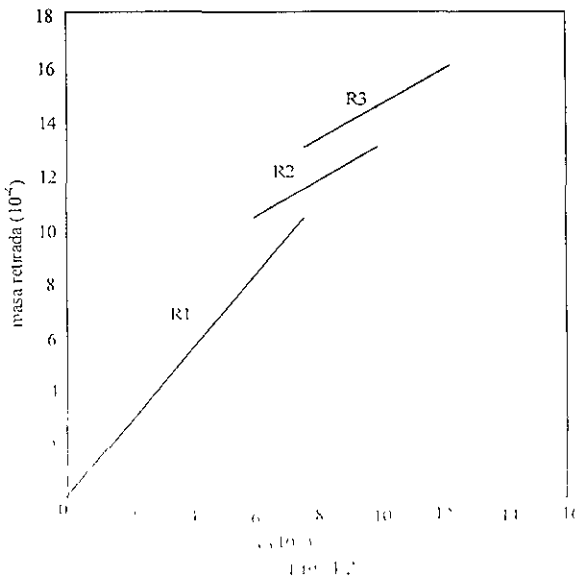
$$y = 0.057 * x \quad y \epsilon = 0.0001$$

Utilizando la ecuación $\Delta m_{s1} = G_1 (x_1^t - x_1^s)$, para el cálculo de la masa retirada:

Operación	f^{im} (kg/s)	Comp. de Entrada x^s	Comp. de Salida x^t	Masa retirada Δm_{tot}
S ₁	15.74	0	0.00010145	0.001597

Con los datos anteriores, se crean las curvas compuestas para las corrientes ricas y la pobre.

Para las corrientes ricas:



Creando la curva compuesta para las corrientes ricas:

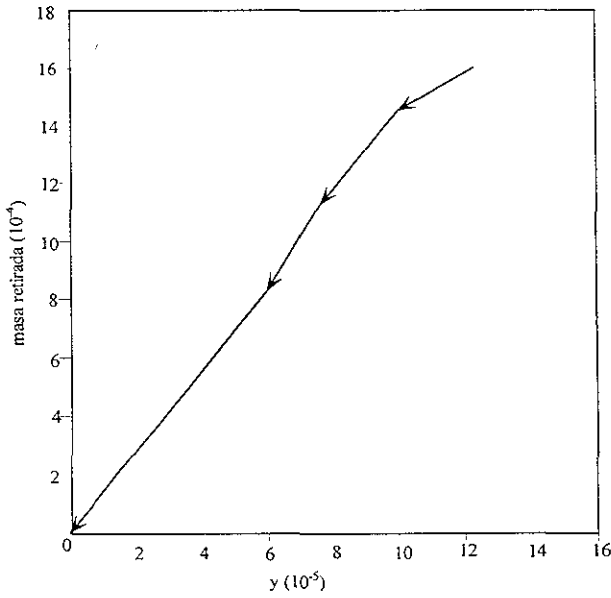


Fig. 4.3

Para la corriente pobre:

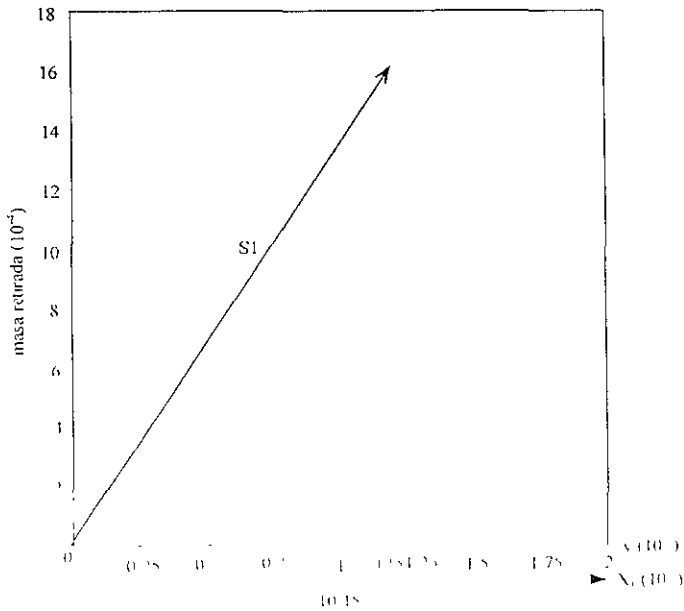


Fig. 4.4

Uniendo las dos curvas compuestas:

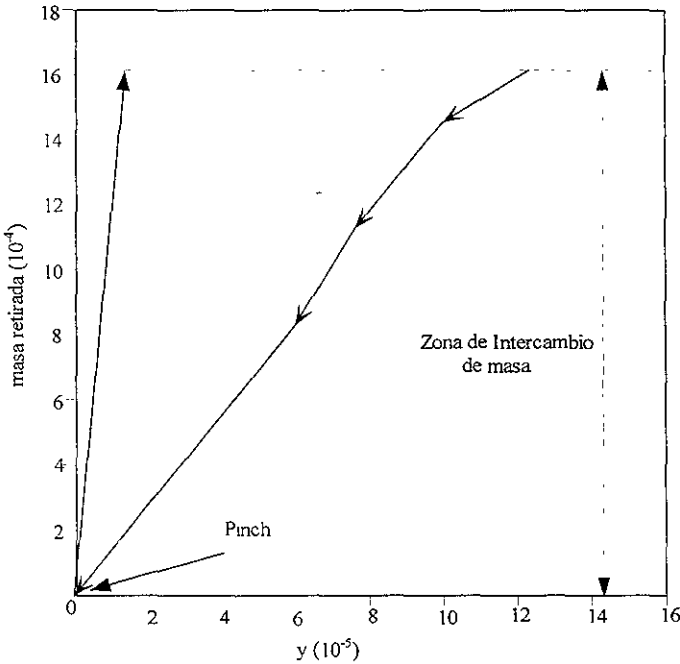


Fig. 4.5

Como se puede observar, el pinch se encuentra a las 0 ppm, esto se debe a que la concentración inicial de la corriente pobre (en este caso el agua) entra a esa concentración, y si recordamos, el pinch para esta metodología se encuentra en el punto donde la corriente rica y pobre se tocan.

Toda el área marcada como zona de intercambio de masa, representa el área donde es factible que la corriente pobre remueva el contaminante de la corriente rica, en este caso, el área es total, lo que significa que no se tiene que recurrir a tratamientos externos para limpiar las corrientes y que no existe un exceso

En el resultado obtenido, tiene mucho que ver que para definir la corriente pobre se tomaron los resultados finales del ejemplo de MANN y LIU (1999), lo que significa que ya se había encontrado un óptimo para la corriente de agua, lo que se refleja en el resultado obtenido al no tener excesos.

Esto comprueba que las metodologías pueden usarse indistintamente, todo depende de las unidades en que se tengan los datos o si se cuenta con datos de equilibrio pues los resultados son semejantes para ambos

CAPITULO V

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A UN ESQUEMA TÍPICO DE REFINACIÓN

Una vez que se ha bosquejado la metodología, a continuación se presenta un caso práctico, dicho caso se lleva a cabo utilizando los datos obtenidos de una refinería modelo.

A continuación se muestra un esquema general del camino que recorre el agua dentro de la refinería, nótese que hacen falta algunas plantas que no fueron tomadas en cuenta por considerarse que los flujos de agua requeridos eran muy pequeños:

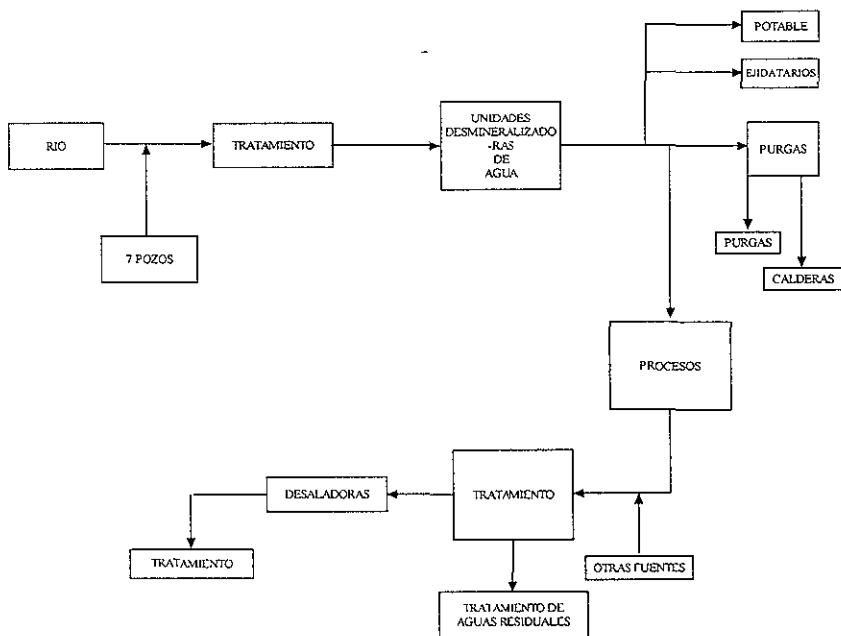


Fig. 5.1

En la Refinería propuesta, el agua es suministrada a partir de las siguientes fuentes: de un río cercano y de 7 pozos naturales, y el agua de reposición a las Torres de Enfriamiento proviene de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

El agua que se obtiene de los pozos (mantos freáticos) y del río, es tratada y se manda a las Unidades Desmineralizadoras de Agua (UDA), la cual canaliza los flujos, según sean requeridos, para los diferentes servicios, por ejemplo, a las calderas para formar vapor y alimentar los agotadores, turbinas, etc. o a proceso donde se utiliza para lavado, desaladoras, etc .

La mayor cantidad de agua que se utiliza para proceso es en forma de vapor (nótese que se toma en cuenta únicamente el agua que entra en contacto directo con corrientes de proceso, y no la que se utiliza para servicios auxiliares) y una vez que termina su ciclo se recolecta en tanques recolectores de aguas amargas como condensado, dicho condensado es enviado a tanques mas grandes de recoleccion y de ahí a tratamiento a una planta tratadora de aguas amargas, en el camino se le unen otros efluentes provenientes de drenaje químico, drenaje acetoso o drenaje

común llegando a una concentración final de: 19700 ppm de H_2S , 11100 ppm de NH_3 , 4.7 CN^- , 99.8 Fenoles y 67.7 Mercaptanos.

El tratamiento que se lleva a cabo en las Plantas Tratadoras de Aguas amargas consiste en remover el ácido sulfhídrico y el amoníaco del agua, mediante el principio de agotamiento con vapor a baja presión como medio de calentamiento y permitiendo la producción de un gas ácido con presencia de amoníaco para su envío a la planta de azufre o eventualmente a quemador, así como una agua desflepada (agotada) dentro de especificaciones ecológicas, para su reúso en desaladoras de crudo y/o envío a la planta de tratamiento de aguas residuales de la Refinería. Una vez que se lleva a cabo el tratamiento, se tiene agua con 5 ppm de H_2S y 25 ppm NH_3 , con estas características el agua es alimentada a la desaladora y al final se obtiene una salmuera que se desecha para su tratamiento posterior. El propósito del ejemplo es tratar de disminuir el consumo de agua que tiene que ser suministrado a la refinería mediante la reutilización de flujos provenientes de un proceso para satisfacer los requerimientos de otro.

Para el caso práctico se toman en cuenta 4 plantas: Planta Combinada No. 1, Planta Catalítica, Planta Hidrodesulfuradora de destilados intermedios y Planta Hidrodesulfuradora de Naftas, para cada una de estas plantas se encontraron los requerimientos de agua (tanto de servicios auxiliares como de proceso) y a su vez la salida de la misma (como agua amarga o condensado). En la siguiente hoja se presenta una tabla donde se muestra cada operación con las condiciones necesarias para el proceso, las corrientes con masa removida igual a cero ó muy cercana a cero no se toman en cuenta. Los equipos se escogieron basándose en la premisa de la cantidad de agua que requerían (sobre todo en el flujo de agua), algunos equipos que no se mencionan aquí y que son consumidores de agua no se tomaron en cuenta por que su flujo era demasiado pequeño (casi insignificante en comparación de los otros) o por que se trataba de un flujo intermitente.

En la siguiente página se pueden apreciar una tabla que concentra todas los flujos máximos y las concentraciones máximas para los equipos; primero se presenta todo el desplegado de equipos con sus respectivas concentraciones, flujos y masa removida por la corriente de agua (MANN y LIU 1999).

También se consideró la presencia de contaminantes en las corrientes, así, se decidió trabajar solamente con aquellas que presenten una concentración de contaminantes considerable. Se encontró, que los contaminantes que con mas frecuencia son arrastrados por el agua son el H_2S , NH_3 , algunas Sales (dentro de las cuales se englobaron CN^- , Cl^- , NO_3^- , etc.) e Hidrocarburos, eso no quiere decir que no existan otros en las corrientes, sino que, al momento de hacer el análisis, estos contaminantes fueron los mas representativos.

En el anexo I se muestran gráficas para cada contaminante y su presencia en las diferentes corrientes de proceso, de acuerdo a los resultados que se obtuvieron en algunos procesos la presencia de ciertos contaminantes fue casi nula, por lo tanto la presencia de contaminantes también fue un factor determinativo para escoger los procesos sobre los cuales se haría el análisis

Tabla 5.1

VAPOR

Operación	Contaminante	C (entrada ppm)	C (salida ppm)	f (ton/hr)	dm (kg/hr)
	H2S	0	3 3411		0.0375
	NH3	0	18.8254		0.2115
Torre fraccionadora	Sales	0	0.0008	11.235	0.0000
	Hidrocarburos	0	0.0177		0.0002
	H2S	0	0.8904		0.0027
	NH3	0	5.0168		0.0150
Agotador de Kerosina	Sales	0	0.0002	2.994	0.0000
	Hidrocarburos	0	0.0047		0.0000
	H2S	0	1.0388		0.0036
	NH3	0	5.8529		0.0204
Agotador de diesel	Sales	0	0.0002	3.493	0.0000
	Hidrocarburos	0	0.0055		0.0000
	H2S	0	0.9046		0.0028
	NH3	0	5.0972		0.0155
Agotador de gasóleo	Sales	0	0.0002	3.042	0.0000
	Hidrocarburos	0	0.0048		0.0000
	H2S	0	1.0087		0.0034
	NH3	0	5.6837		0.0193
Torre de vacío	Sales	0	0.0002	3.392	0.0000
	Hidrocarburos	0	0.0054		0.0000
	H2S	0	0.7435		0.0019
	NH3	0	4.1890		0.0105
Agotador de nafta pesada	Sales	0	0.0002	2.5	0.0000
	Hidrocarburos	0	0.0039		0.0000
	H2S	0	1.1152		0.0042
	NH3	0	6.2835		0.0236
Agotador de ACL	Sales	0	0.0003	3.75	0.0000
	Hidrocarburos	0	0.0059		0.0000

AGUA

	H2S	5	40 0000		1 5555
	NH3	25	60 0000		1 5555
Desaladora	Sales	3	543 0000	44 443	23 9992
	Hidrocarburos	1.5	150 0000		6 5998

* Por razones de confiabilidad no se presenta la fuente

Como se puede observar en las tablas, existen aún muchos procesos que tienen una concentración de contaminante muy pequeña o casi nula. Si al valor anterior se le suman flujos pequeños, la cantidad de masa retirada por el mismo nos arroja valores despreciables, pero al tener la idea de los otros datos que se eliminaron, éstos se tomaron en cuenta ya que en el total de la planta representaban valores que debían ser considerados. En el anexo I se muestran las gráficas donde se puede observar el comportamiento de cada contaminante en cada proceso y de esta forma se puede comprender mejor por que ciertos contaminantes fueron los que se tomaron en cuenta como representativos.

Con base en los datos de las tablas a continuación se presentan dos gráficas comparativas, con los datos finales a los que se les va a hacer el análisis. La primera gráfica muestra la comparación de flujos entre los diferentes procesos, mientras que la segunda muestra la relación que existe entre la masa retirada (Δm) de los contaminantes y los diferentes procesos, para esto último, se tomo como punto de referencia a la masa retirada (Δm) y no la concentración ya que el Δm es una función que engloba la cantidad de contaminantes de cada elemento con su flujo. En otras palabras, el Δm nos dice cuanto contaminante se lleva la corriente de agua y si este es igual a cero o muy cercano a cero significa que no existe ninguna transferencia de masa o que dicha transferencia es demasiado pequeña.

Flujo de agua requerido por las operaciones

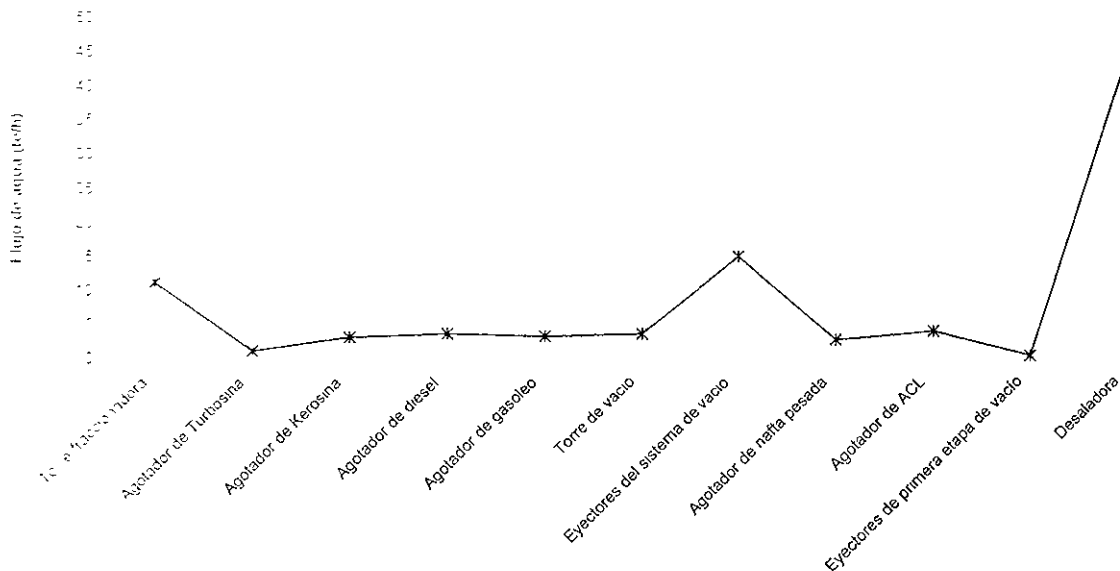


Fig. 5.2

Masa retirada para cada contaminante

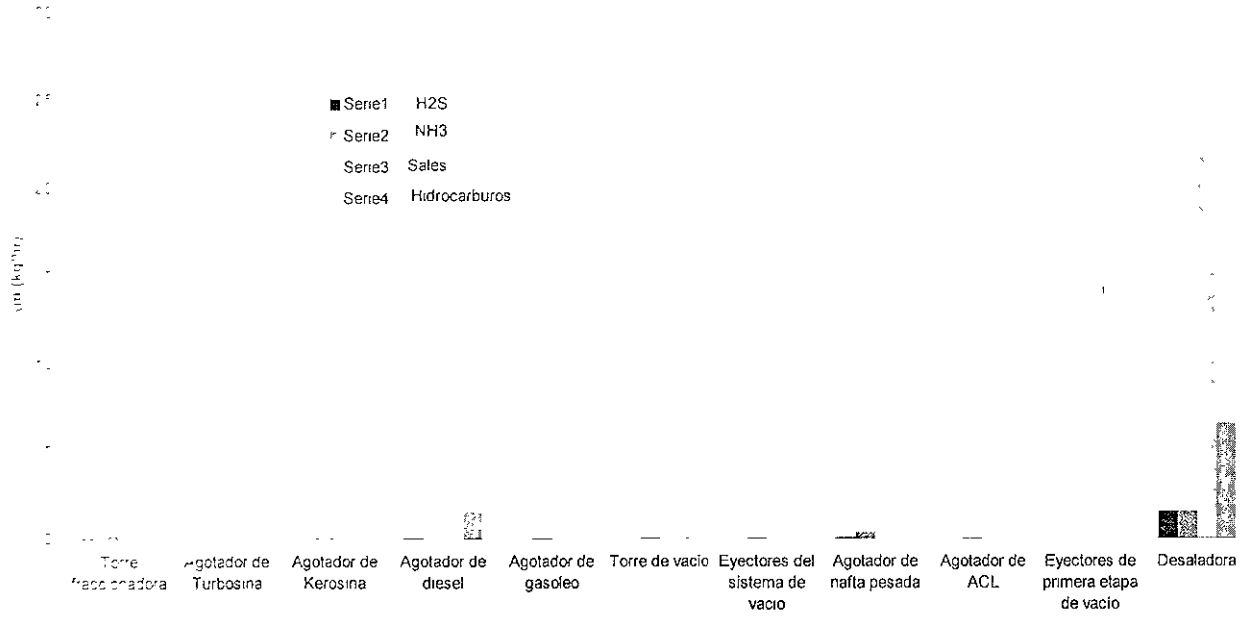


Fig. 5.3

Ya que se acotaron los datos que se van a utilizar para realizar el análisis de la planta, a continuación se presenta la curva compuesta por todos los cálculos se hicieron con base en la metodología de MAN y LIU (1999) para casos multicomponentes (para más información, ver el capítulo II).

Gráfica de Δm vs. ppm con respecto al NH_3

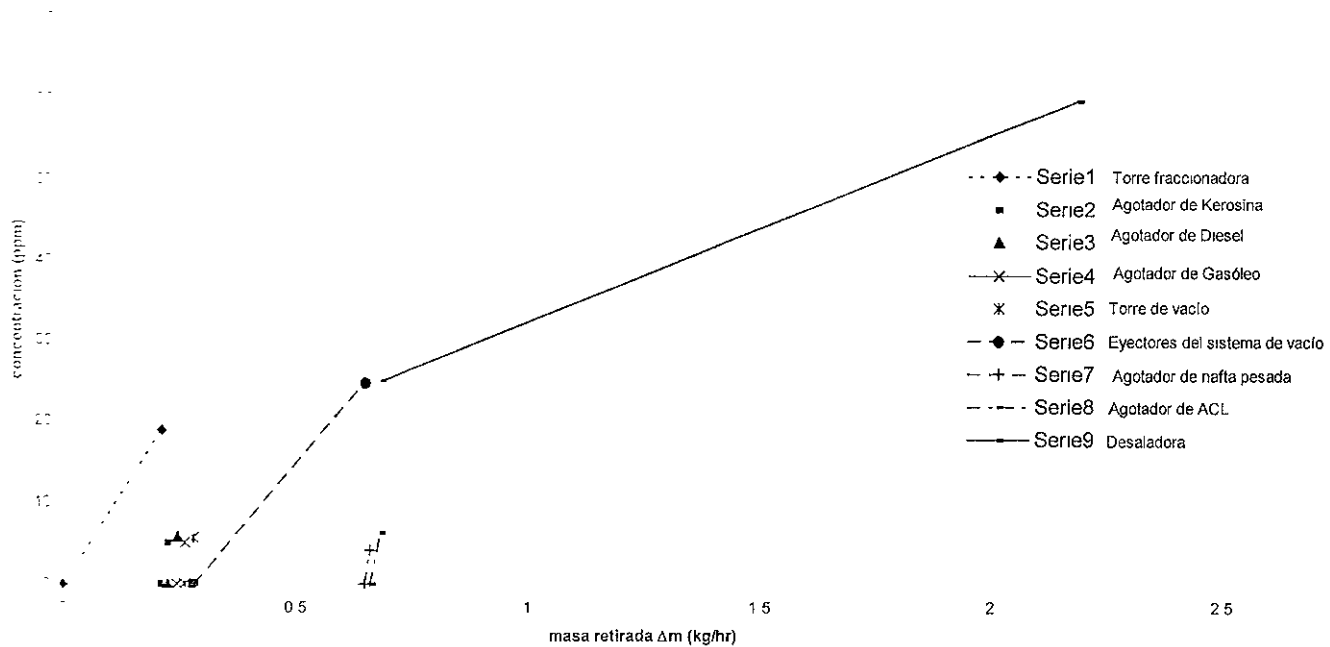


Fig. 5.4

Como se puede observar en la gráfica, hay una parte de la gráfica en donde las corrientes son muy pequeñas y no pueden distinguirse con claridad. para mejorar la apreciación del problema aplicaremos un "zoom" a esta sección para poder apreciar mejor el comportamiento de dichas corrientes, a continuación se presenta el resultado del acercamiento:

Gráfica de Δm vs ppm con respecto al NH_3

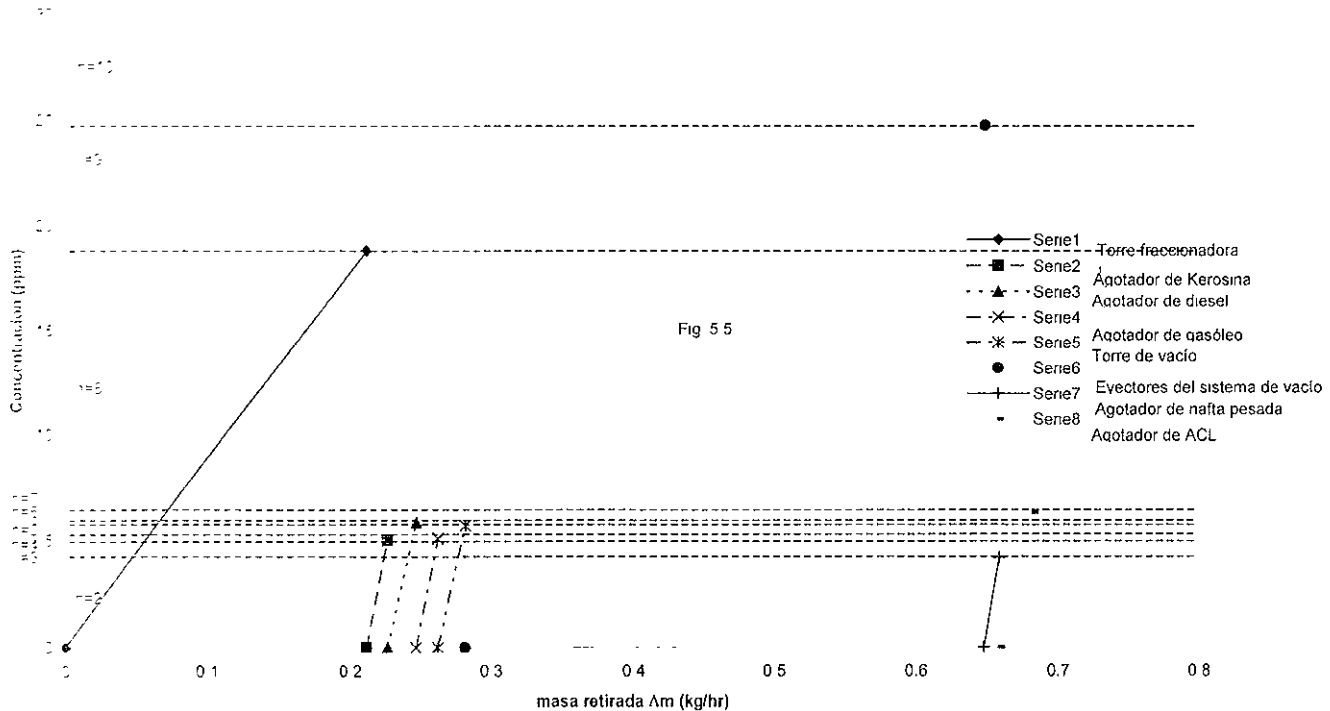


Fig. 5.5

Las líneas punteadas horizontales muestran los diferentes intervalos de contaminante por donde cruzan las corrientes, para cada intervalo se tienen ciertos puntos que se ubican en las líneas de proceso que representan la concentración de contaminantes lo cual hace o no factible su reutilización en otro proceso en el mismo intervalo (ver Capítulo II), a continuación se presenta una tabla con las concentraciones por intervalos para cada proceso de los cuatro contaminantes que se manejan en el ejemplo.

Tabla 5.2

Operación	Contaminante	Intervalo 2	Intervalo 3	Intervalo 4	Intervalo 5	Intervalo 6	Intervalo 7	Intervalo 8	Intervalo 9	Intervalo 10
1	H2S	0.7435	0.89037	0.9046	1.0087	1.03876	1.0052	3.3411		
	NH3	4.189	5.0168	5.0972	5.6837	5.8529	6.2835	18.8254		
	Sales	0.000178	0.0002132	0.0002166	0.0002415	0.0002487	0.000267	0.0008		
	Hidrocarburos	0.003938	0.004793	0.004792	0.005344	0.005503	0.005908	0.0177		
2	H2S	0.7435	0.8904							
	NH3	4.189	5.0168							
	Sales	0.000167	0.0002							
	Hidrocarburos	0.00392	0.0047							
3	H2S	0.7435	0.8904	0.9047	1.008769	1.0388				
	NH3	4.189	5.0168	5.0972	5.6837	5.8529				
	Sales	0.000143	0.0001714	0.0001741	0.0001942	0.0002				
	Hidrocarburos	0.003936	0.004714	0.004789	0.005341	0.0055				
4	H2S	0.7434	0.8903	0.9046						
	NH3	4.189	5.0168	5.0972						
	Sales	0.0001644	0.0001968	0.0002						
	Hidrocarburos	0.003945	0.004724	0.0048						
5	H2S	0.006412	0.007679	0.007802	0.0087					
	NH3	4.189	5.0168	5.0972	5.6837					
	Sales	0.0001474	0.0001765	0.0001794	0.0002					
	Hidrocarburos	0.00398	0.004766	0.004843	0.0054					

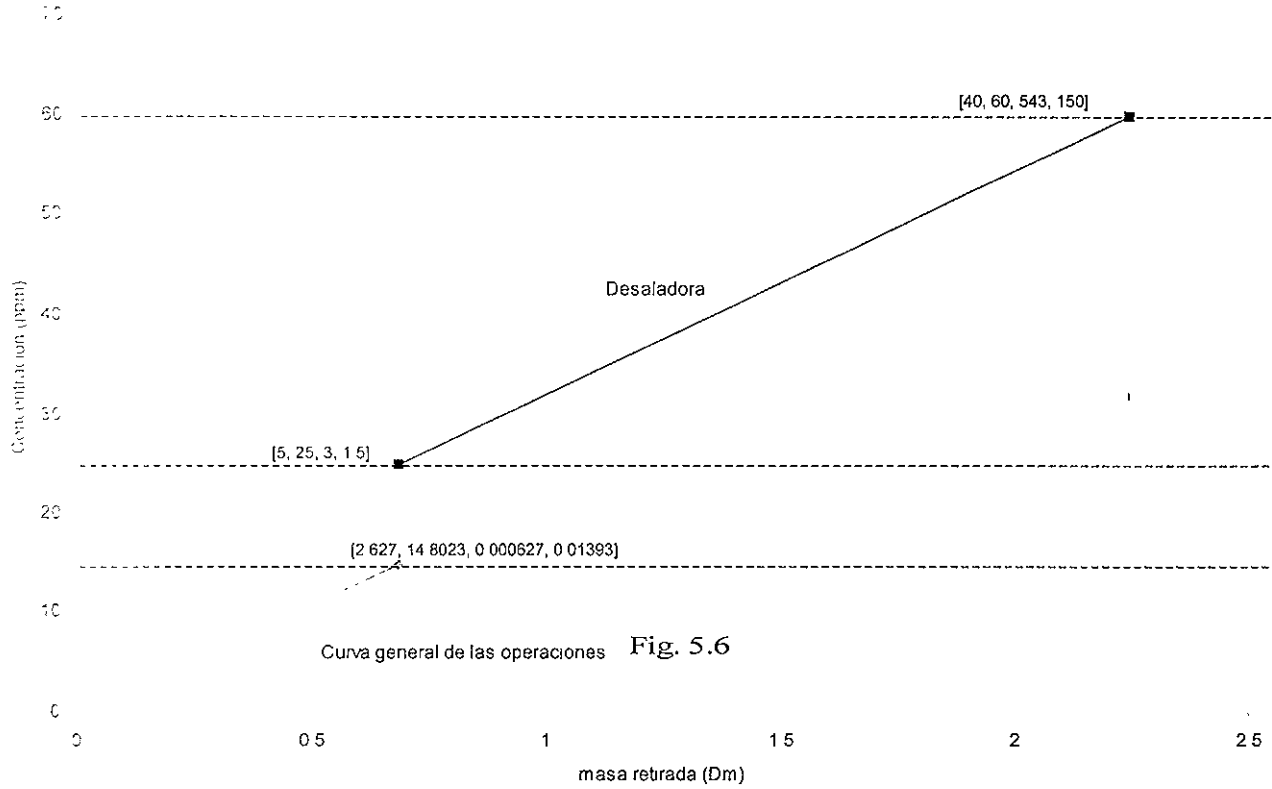
cont. tabla 5.2

Operación	Contaminante	Intervalo 2	Intervalo 3	Intervalo 4	Intervalo 5	Intervalo 6	Intervalo 7	Intervalo 8	Intervalo 9	Intervalo 10
6	H2S	0.7434	0.8904	0.9046	1.008727	1.03876	1.0052	3.3411	4.3965	
	NH3	4.189	5.0168	5.0972	5.6837	5.8529	6.2835	18.8254	24.7722	
	Sales	0.0001691	0.0002025	0.0002058	0.0002294	0.0002363	0.0002536	0.0007599	0.001	
	Hidrocarburos	0.00394	0.004719	0.004794	0.005346	0.005505	0.00591	0.01771	0.0233	
7	H2S	0.7455								
	NH5	4.189								
	Sales	0.0002								
	Hidrocarburos	0.0039								
8	H2S	0.7435	0.8904	0.9046	1.006747	1.03878				
	NH6	4.189	5.0168	5.0972	5.6837	5.8529				
	Sales	0.0001999	0.0002395	0.0002434	0.0002714	0.0002794				
	Hidrocarburos	0.003933	0.004711	0.004786	0.005337	0.005496				
9	H2S								5	40
	NH7								25	60
	Sales								3	543
	Hidrocarburos								1.5	150

La tabla anterior nos da una visión más específica de lo que esta sucediendo en todas las operaciones; en cada intervalo se tienen ciertas concentraciones de contaminantes que hacen factible la utilización de una corriente en otra, es decir, si nos ubicamos en un intervalo cualquiera las concentraciones que se presentan en el intervalo, en una operación dada, nos dan la información de que en dicho intervalo es posible utilizar el flujo que sale de una operación a la entrada de otra si se cumplen los requerimientos máximos de concentración de la segunda operación. En el caso que estamos estudiando, la mayoría de las operaciones utiliza vapor (lo que significa que se requiere una concentración de entrada igual a cero) y al momento de salir de el proceso, el condensado formado presenta una concentración considerable, por lo tanto no es factible el reúso en ninguno de los primeros intervalos ya que la concentración no lo permite, en cambio en el noveno intervalo inicia la operación nueve (desaladora), ya que ésta tiene una concentración máxima inicial de [5, 25, 3, 1.5] y todas las demás corrientes tienen una concentración a la salida menor, es posible reusar la salida de todas las corrientes a la entrada de la desaladora.

Como todas estas corrientes tienen en común que su alimentación debe ser vapor, se puede considerar sumarlas y de esta forma obtener una corriente que represente el comportamiento general de las corrientes, en este caso, sumaremos las corrientes, y obtendremos nuevas propiedades (concentraciones y masa retirada para la corriente general), de la Torre fraccionadora, Agotador de kerosina, Agotador de diesel, Agotador de gasóleo, la Torre de vacío, Eyectores del sistema de vacío, Agotador de nafta pesada y el Agotador de ACL, para formar una nueva corriente.

Gráfica Final de Dm vs ppm



Curva general de las operaciones Fig. 5.6

Fig. 5.6

En la gráfica se puede apreciar mejor lo dicho anteriormente, esto es, que todas las corrientes cuya entrada es vapor pueden reutilizarse a la entrada de la desaladora ya que no existen limitantes de concentración ni de flujo.

Como se hizo en el capítulo III, se calculo el flujo optimo que necesita el sistema para operar mediante un método matemático, para este fin se utilizo el programa GAMS, ya que las operaciones tomando cuatro contaminantes y el número de corrientes con las que se contaba hacía mas compleja la solución del problema, el listado de todo el programa se muestra en el anexo II y a continuación se muestra el resultado de la corrida:

```

COMPILATION TIME = 0.160 SECONDS 0.7Mb WIN-19-115
GAMS 2.50E Windows NT/95/98 10/10/00 18:34:10 PAGE 20
General Algebraic Modeling System
    
```

Execution

```

799 PARAMETER F11          = 11.235
    PARAMETER FS12         = 0.000
    PARAMETER FS13         = 0.000
    PARAMETER FS14         = 0.000
    PARAMETER FS15         = 1.77636E-15
    PARAMETER FS16         = 0.000
    PARAMETER FS17         = 0.000
    PARAMETER W1A2         = 0.743
    PARAMETER W1B2         = 4.189
    PARAMETER W1C2         = 1.780000E-4
    PARAMETER W1D2         = 0.004
    PARAMETER W1A3         = 0.890
    PARAMETER W1B3         = 5.017
    PARAMETER W1C3         = 2.132000E-4
    PARAMETER W1D3         = 0.005
    PARAMETER W1A4         = 0.905
    PARAMETER W1B4         = 5.097
    PARAMETER W1C4         = 2.166000E-4
    PARAMETER W1D4         = 0.005
    PARAMETER W1A5         = 1.009
    PARAMETER W1B5         = 5.684
    PARAMETER W1C5         = 2.415000E-4
    PARAMETER W1D5         = 0.005
    PARAMETER W1A6         = 1.039
    PARAMETER W1B6         = 5.853
    PARAMETER W1C6         = 2.487000E-4
    PARAMETER W1D6         = 0.006
    PARAMETER W1A7         = 1.115
    PARAMETER W1B7         = 6.283
    PARAMETER W1C7         = 2.670000E-4
    PARAMETER W1D7         = 0.006
    PARAMETER W1A8         = 3.341
    PARAMETER W1B8         = 18.825
    PARAMETER W1C8         = 8.000000E-4
    PARAMETER W1D8         = 0.018
    
```

```

800 PARAMETER F21      = 2.994
PARAMETER FS22       = 0.000
PARAMETER W2A2       = 0.743
PARAMETER W2B2       = 4.189
PARAMETER W2C2       = 1.670000E-4
PARAMETER W2A3       = 0.890
PARAMETER W2B3       = 5.017
PARAMETER W2C3       = 2.000000E-4
PARAMETER W2D3       = 0.005
    
```

```

801 PARAMETER F31      = 3.493
PARAMETER FS32       = 0.000
PARAMETER FS33       = 0.000
PARAMETER FS34       = 0.000
PARAMETER FS35       = 0.000
PARAMETER W3A2       = 0.743
PARAMETER W3B2       = 4.189
    
```

GAMS 2.50E Windows NT/95/98 10/10/00 18:34:10 PAGE 21
 General Algebraic Modeling System
 Execution

```

801 PARAMETER W3C2     = 1.430000E-4
PARAMETER W3D2       = 0.004
PARAMETER W3A3       = 0.890
PARAMETER W3B3       = 5.017
PARAMETER W3C3       = 1.714000E-4
PARAMETER W3D3       = 0.005
PARAMETER W3A4       = 0.905
PARAMETER W3B4       = 5.097
PARAMETER W3C4       = 1.741000E-4
PARAMETER W3D4       = 0.005
PARAMETER W3A4       = 0.905
PARAMETER W3B5       = 5.684
PARAMETER W3C5       = 1.942000E-4
PARAMETER W3D5       = 0.005
PARAMETER W3A6       = 1.039
PARAMETER W3B6       = 5.853
PARAMETER W3C6       = 2.000000E-4
PARAMETER W3D6       = 0.005
    
```

```

- 802 PARAMETER F41      = 3.042
PARAMETER FS42       = 0.000
PARAMETER FS43       = 0.000
PARAMETER W4A2       = 0.743
PARAMETER W4B2       = 4.189
PARAMETER W4C2       = 1.670000E-4
PARAMETER W4D2       = 0.005
    
```

```

PARAMETER W4A3      = 0.890
PARAMETER W4B3      = 5.017
PARAMETER W4C3      = 1.968000E-4
PARAMETER W4D3      = 0.005
PARAMETER W4A4      = 0.905
PARAMETER W4B4      = 5.097
PARAMETER W4C4      = 2.000000E-4
PARAMETER W4D4      = 0.005

```

```

- 803 PARAMETER F51      = 3.392
PARAMETER FS52      = 0.000
PARAMETER FS53      = 0.000
PARAMETER FS54      = 0.000
PARAMETER W5A2      = 0.006
PARAMETER W5B2      = 4.189
PARAMETER W5C2      = 1.474000E-4
PARAMETER W5D2      = 0.004
PARAMETER W5A3      = 0.008
PARAMETER W5B3      = 5.017
PARAMETER W5C3      = 1.765000E-4
PARAMETER W5D3      = 0.005
PARAMETER W5A4      = 0.008
PARAMETER W5B4      = 5.097
PARAMETER W5C4      = 1.794000E-4
PARAMETER W5D4      = 0.005
PARAMETER W5A5      = 0.009
PARAMETER W5B5      = 5.684

```

GAMS 2.50E Windows NT/95/98 10/10/00 18:34:10 PAGE 22
 General Algebraic Modeling System
 Execution

```

803 PARAMETER W5C5      = 2.000000E-4
PARAMETER W5D5      = 0.005

```

```

- 804 PARAMETER F61      = 14.784
PARAMETER FS62      = 0.000
PARAMETER FS63      = 0.000
PARAMETER FS64      = 0.000
PARAMETER FS65      = 0.000
PARAMETER FS66      = 0.000
PARAMETER FS67      = 0.000
PARAMETER FS68      = 0.000
PARAMETER W6A2      = 0.743
PARAMETER W6B2      = 4.189
PARAMETER W6C2      = 1.691000E-4
PARAMETER W6D2      = 0.004
PARAMETER W6A3      = 0.890
PARAMETER W6B3      = 5.017

```

```

PARAMETER W6C3      = 2.025000E-4
PARAMETER W6D3      = 0.005
PARAMETER W6A4      = 0.905
PARAMETER W6B4      = 5.097
PARAMETER W6C4      = 2.058000E-4
PARAMETER W6D4      = 0.005
PARAMETER W6A5      = 1.009
PARAMETER W6B5      = 5.684
PARAMETER W6C5      = 2.294000E-4
PARAMETER W6D5      = 0.005
PARAMETER W6A6      = 1.039
PARAMETER W6B6      = 5.853
PARAMETER W6C6      = 2.363000E-4
PARAMETER W6D6      = 0.006
PARAMETER W6A7      = 1.115
PARAMETER W6B7      = 18.825
PARAMETER W6C7      = 2.536000E-4
PARAMETER W6D7      = 0.006
PARAMETER W6A8      = 3.341
PARAMETER W6B8      = 18.825
PARAMETER W6C8      = 7.599000E-4
PARAMETER W6D8      = 0.018
PARAMETER W6A9      = 4.396
PARAMETER W6B9      = 24.772
PARAMETER W6C9      = 0.001
PARAMETER W6D9      = 0.011
    
```

```

- 805 PARAMETER F71      = 2.500
    PARAMETER W7A2      = 0.745
    
```

```

- 806 PARAMETER F81      = 3.750
    PARAMETER FS82      = 0.000
    PARAMETER FS83      = 0.000
    PARAMETER FS84      = 0.000
    PARAMETER FS85      = 0.000
    
```

GAMS 2.50E Windows NT/95/98 10/10/00 18:34:10 PAGE 23
 General Algebraic Modeling System
 Execution

```

806 PARAMETER FS86      = 0.000
    PARAMETER W8A2      = 0.743
    PARAMETER W8B2      = 4.189
    PARAMETER W8C2      = 1.999000E-4
    PARAMETER W8D2      = 0.001
    PARAMETER W8A3      = 0.890
    PARAMETER W8B3      = 5.017
    PARAMETER W8C3      = 2.395000E-4
    PARAMETER W8D3      = 0.005
    
```

```

PARAMETER W8A4      =    0.905
PARAMETER W8B4      =    5.097
PARAMETER W8C4      =  2.434000E-4
PARAMETER W8D4      =    0.005
PARAMETER W8A5      =    1.009
PARAMETER W8B5      =    5.684
PARAMETER W8C5      =  2.714000E-4
PARAMETER W8D5      =    0.005
PARAMETER W8A6      =    1.039
PARAMETER W8B6      =    5.853
PARAMETER W8C6      =  2.794000E-4
PARAMETER W8D6      =    0.005
PARAMETER W8A7      =    3.341
PARAMETER W8B7      =   18.825
PARAMETER W8C7      =  8.000000E-4
PARAMETER W8D7      =    0.018

```

```

----- 807 PARAMETER F99      =   44.197
PARAMETER WS9A9      =    4.396
PARAMETER WS9B9      =   24.772
PARAMETER WS9C9      =    0.001
PARAMETER WS9D9      =    0.011
PARAMETER W9A10      =   39.591
PARAMETER W9B10      =   60.196
PARAMETER W9C10      =  543.002
PARAMETER W9D10      =  149.337

```

```
808 PARAMETER F      =   89.387
```

```
EXECUTION TIME      =   0.110 SECONDS  1.4 Mb  WIN-19-115
```

**** FILE SUMMARY

```
INPUT  C:\WINDOWS\GAMSDIR\FINAL.GMS
OUTPUT C:\WINDOWS\GAMSDIR\FINAL.LST
```

En los resultados se puede apreciar los diferentes valores de los flujos (T_{ij}) disponibles para ser usados en los diferentes intervalos de concentración así como de las concentraciones (W_{ij}) de los mismos que permiten la reutilización de las corrientes en otras en el mismo intervalo de concentración (ver capítulo III).

El valor final $F = 89.387$ ton/h es el flujo que se necesita en todo el sistema para cumplir con los requerimientos de cada proceso. Pero si se toma en cuenta que se encontró que se puede reutilizar todas las corrientes que se obtienen como condensados (aguas amargas) provenientes de las operaciones que utilizan vapor entonces el flujo total que necesitamos es de 44.44 ton/h (que es

el flujo que necesita la desaladora para operar), lo que nos permite ahorrar 44.947 ton/hr del flujo total que se requiere.

A continuación se presenta un esquema de la utilización del agua dentro de la refinería tomando en cuenta los resultados obtenidos por la metodología:

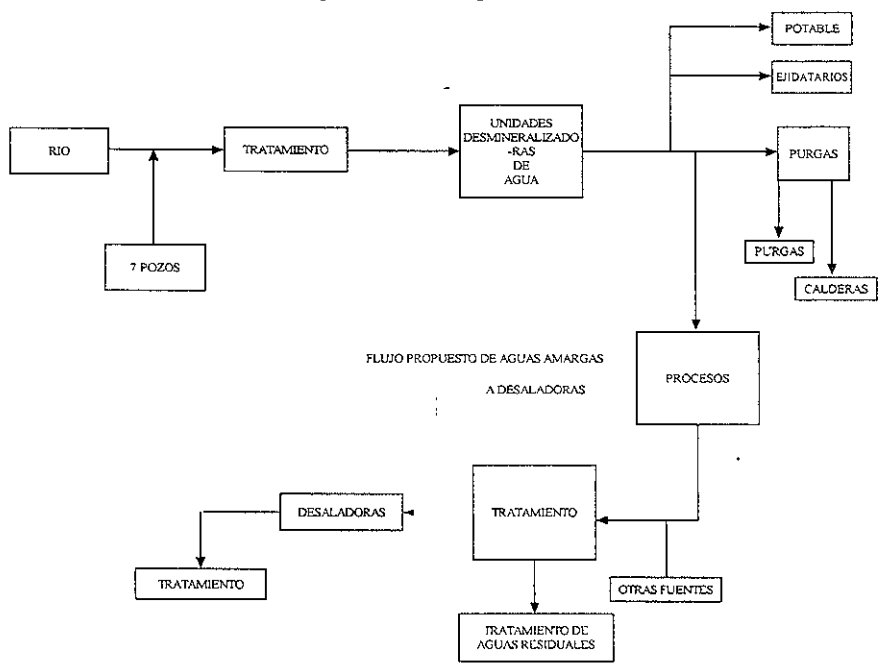


Fig. 5.7

De los procesos que utilizan vapor se obtiene un excedente de 0.5 ton/hr que se debe mandar a la planta tratadora de aguas amargas, pero la mayor parte del flujo se utiliza para la desaladora, lo que nos lleva a un ahorro del agua limpia de un 50 %, pero como se sabe que actualmente el agua que se utiliza para la desaladora proviene de la planta tratadora de aguas amargas, entonces se obtiene un ahorro en el gasto para el tratamiento de la misma, ya que el flujo a tratar disminuye

CONCLUSIONES

En la actualidad los problemas ecológicos se encuentran al orden del día, es el momento en que las personas tomen conciencia de lo que esta pasando a su alrededor y comprendan que el uso correcto de los satisfactores que se encuentran a su disposición es muy importante para evitar su escasez en un futuro.

El papel que juegan las industrias por conservar los recursos no renovables es primordial, ya que ellas son las causantes de la mayor cantidad de contaminación que sufre el planeta, afortunadamente y gracias a las medidas que han adoptado los gobiernos por establecer parámetros que controlen los desechos que las industrias producen, estas han buscado formas de minimizar sus desechos.

El deseo de las industrias por minimizar los contaminantes es también provocado por un propósito de aceptación social, ya que se quiere mostrar a las industrias como un organismo benefactor y amigo de la sociedad y no como un elemento que deteriora y daña.

En un caso específico, la industria petrolera es vista como una gran fuente contaminadora de agua, esto se debe a las grandes cantidades que se necesitan de agua para llevar a cabo sus procesos dentro de una refinería. Una forma en que se empezó a atacar el problema del consumo tan grande de agua dentro de las refinerías fue mediante la aplicación del pinch de transferencia de calor que tiene como finalidad minimizar los consumos de agua de calentamiento y de enfriamiento mediante reuso de corrientes frías y calientes, pero el agua utilizada dentro de los procesos no era tomada muy en cuenta a pesar de tratarse también de otra fuente consumidora de agua importante.

De la necesidad de encontrar un método eficaz para reducir el uso de agua dentro de los procesos de una industria (en específico dentro de una refinería) es por lo que se desarrolló esta tesis, como se demostró durante el desarrollo del trabajo, la técnica propuesta llamada "pinch de transferencia de masa", no es un descubrimiento nuevo, sino solamente una aplicación de los conocimientos que se tenían de transferencia de masa y que mediante las bases asentadas por la tecnología pinch para transferencia de calor es posible aplicar a casos en donde se da un intercambio de masa entre dos corrientes.

Las metodologías que se manejaron y que se aplicaron a los diferentes ejemplos que se vieron, son solamente una pequeña muestra de las magnitudes que puede llegar a tener esta nueva técnica para minimizar consumos de agua.

Cabe hacer notar que a pesar de que las dos técnicas presentadas parecen buscar objetivos diferentes (El-Halwagi (1997) se centra en extraer componentes indeseables de una corriente de desecho, mientras que la metodología de Mann y Liu (1999) se aplica a corrientes de agua que se necesitan para satisfacer los requerimientos de un proceso) las dos tienen como fin el disminuir los gastos y los consumos de agua, por ejemplo, la metodología propuesta por El-Halwagi (1997) retira compuestos indeseables de una corriente de desecho (que generalmente es agua) lo que da una posibilidad de reusar el agua otra vez en algún otro proceso.

La demostración de la metodología de Mann y Liu (1999) en la Refinería Hector Lara Sosa, ubicada en Caderexa Nuevo León, arrojó resultados que no se esperaban, ya que, la finalidad

inicial era disminuir el consumo de agua mediante la reutilización de la misma de un proceso a otro, pero como se pudo observar en los resultados obtenidos, lo que se logró fue la reutilización de la mayor cantidad de los flujos de condensados procedentes de las operaciones que utilizaban vapor en la desaladora, esto se debió a que la mayor parte de los consumos de agua que se requerían en las plantas estudiadas eran en forma de vapor. Sin embargo esto no impidió que se lograra una disminución en el consumo de agua y en el volumen de agua que se enviaba a tratamiento que debe de repercutir de manera significativa en el costo de operación de el proceso.

Se debe aclarar, que el hecho de reutilizar el agua de un proceso a otro puede implicar ciertos cambios en el mismo. Los perjuicios que pudiera causar el incrementar a un máximo la entrada de contaminantes solamente puede ser probada mediante la experimentación puntual de lo que sucedería dentro del proceso, lo cual esta fuera de los objetivos de esta tesis, aquí únicamente se establece, según el equilibrio, que cada corriente soporta llegar a un "máximo" de concentración sin afectar su desenvolvimiento dentro de la operación en que se utiliza, a su vez, es necesario investigar mas a fondo las diferentes interacciones que se presentan cuando existen varios contaminantes dentro de una corriente.

Otra observación que se hace, es que en este trabajo únicamente se desarrollo la metodología de intercambio de masa solo para el caso de reúso de agua, se hace esta aclaración, ya que existen otras formas de combinación para minimizar el consumo de agua, por ejemplo, existe el caso de regeneración y reúso, donde una corriente de agua que sale de un proceso es tratada mediante algún ASM y reusada en otro proceso, lo anterior se hace para que la presencia de contaminantes no impida la reutilización de la corriente deseada en otra; esto no se llevó a cabo ya que era necesario encontrar un o unos ASM adecuados que lograran remover los contaminantes deseados de la corriente de proceso con la que se trabajó, lo cual se salía completamente de los objetivos de esta tesis, además representaba el desarrollo de una problemática más compleja ya que las dos metodologías desarrolladas debían de aplicarse en forma conjunta (lo cual se intento hacer en el caso de estudio) lo que aumentaba las variables de estudio en el problema.

El método para minimización de consumo de agua se aplicó en una refinería por contar con los datos necesarios para el análisis, pero es posible aplicar la metodología a cualquier industria que consuma agua o tenga una descarga de agua al medio ambiente, si consideramos esto, los alcances de la metodología aquí presentada son bastante amplios solamente hay que profundizar en las diferentes categorías en que puede ser dividido, esto es, encontrar la aplicación para un caso particular

También se deben mencionar los beneficios ambientales que implica la implementación de esta metodología en un proceso, ya que por ejemplo, al disminuir la cantidad de contaminantes presentes en un efluente de descarga al medio ambiente se logra minimizar el impacto ambiental que causa en los mantos acuíferos, y a su vez, se evitan problemas de índole legal con las autoridades ambientales

Otro factor importante a considerar es que mediante la implementación de redes de intercambio de masa, es posible utilizar agua proveniente de fuentes que nunca se consideraron aptas como alimentación para procesos, por ejemplo, el agua que se utiliza para servicios de enfriamientos y calentamientos mediante un procedimiento de intercambio de masa puede llegar a ser apta para

utilizarse en los procesos de una refinería de petróleo, lógicamente los costos para llevar a cabo este proyecto deben ser considerados, ya que se debe establecer redes de transferencia de masa adecuadas, así como encontrar los ASM adecuados para lograr la calidad de agua deseada.

Por último, la continuidad que se puede dar a este trabajo es muy grande y sería muy importante que no se desechara, ya que en el nuevo siglo en que se vive, los problemas ambientales vistos y resueltos desde un punto de vista ingenieril cobrarán cada vez mayor importancia debido a que el hombre se da mayor cuenta de la necesidad de conservar lo más preciado que tiene, su medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

Linnhoff, B., and J. R. Flower, "Synthesis of Heat Exchanger Networks Part I. Systematic Generation of Energy Optimal Networks", *AIChE J.*, 24:663, 1978.

Takama N., Kuriyama, T., Shiroko, K. and Umeda, T., 1980, Optimal water allocation in a petroleum refinery. *Comp. Chem. Engng* 4, 251-258.

Linnhoff, B. and Hindmarsh, E., 1983, The pinch design method of heat exchanger networks. *Chem Engng Sci.* 38, 745-763.

El-Halwagi, M. M. And Manousiouthakis, V., 1989, Synthesis of mass-exchange networks. *A.I.C.H.E. J.* 1989, 35, 1233-1244.

El-Halwagi, M. M. and Manousiouthakis, V., 1990a, Automatic synthesis of mass-exchange networks with single component targets. *Chem. Engng Sci.* 9, 2813-2831

El-Halwagi, M. M. and Manousiouthakis, V., 1990b, Simultaneous synthesis of mass exchange and regeneration networks. *A.I.Ch.E. J.* 36, 1209-1219.

El-Halwagi, M. M. And V. Manousiouthakis, "Automated Synthesis of Mass-Exchange Networks with Single-Contaminant Targets", *Chem. Eng. Sci.*, 45: 2813, 1990.

Robin Smith and Eric Petela. "Waste Minimization in the Process Industries Part 1: The problem", *The Chem. Eng.*, 31 October 1991. pp. 24-25.

Robin Smith and Eric Petela. "Waste Minimization in the Process Industries Part 2: Reactors", *The Chem. Eng.*, 12 December 1991. pp. 17-23.

Robin Smith and Eric Petela. "Waste Minimization in the Process Industries Part 3: Separation and recycle systems", *The Chem. Eng.*, 13 February 1992. pp. 24-26.

Robin Smith and Eric Petela. "Waste Minimization in the Process Industries Part 4: Process Operation", *The Chem. Eng.*, 9 April 1992. pp. 21-23.

Robin Smith and Eric Petela. "Waste Minimization in the Process Industries Part 5: Utility Waste", *The Chem Eng.*, 16 July 1992. pp 32-35.

El-Halwagi, M. M., El-Halwagi, A. M. and Manousiouthakis, V., 1992, Optimal design of dephenolization networks for petroleum-refinery wastes *Trans. Instn Chem. Engrs Part B* 70, 131-139.

James M. Douglas "Process Synthesis for Waste Minimization" *Ind. Eng. Chem Res.*, Vol. 31, No. 1, 1992

Wang Y. P., Smith "Wastewater Minimization", *Chem. Eng. Sci.*, 49:981, 1994

Smith, R. F., Petela and Y. P. Wang, "Water, Water Everywhere", *The Chemical Engineer*, p. 21, May 1991

- YA-Ping Wang and Robin Smith. "Design of Distributed Effluent Treatment Systems". *Cem. Eng. Sci.*, Vol. 49., No. 18. pp. 3127-3145, 1994.
- Smith R., "Wastewater Minimization," pp. 93-108, in *Waste Minimization through Process Design*, A. P. Rossiter, ed., McGraw-Hill, New York, 1995.
- Paul tripathi. "Pinch Technology Reduces Wastewater". *Chemical Engineering*. November 1996. p. 87-90.
- Francis DeSilva. "Tips for Process Water Purification". *Chemical Engineering*. August 1996. p. 72-82.
- Vikas R. Dhole, Nand Ramchandani, Richard A. Tanish and Marek Wasilewski. "Make your Process Water Pay for Itself". *Chemical Engineering*. January 1996. p. 100-103.
- Doyle, S. J., and R Smith, "Targeting Water Reuse with Multiple Contaminants", *Trans. Ichem. E.*, 75(part B):181, 1997.
- Mahmound M. El-Halwagi, "Pollution Prevention through Process Integrator". Academic Press. Sn. Diego California. 1997
- Kuo, W. J. and R. Smith, "Designing for the interactions between Water-Use and Effluent Treatment", *Trans. Ichem. E.*, 76:287, 1998.
- Linnhoff, B., Trainsh, R.A., and Kumana, J.D. "Intelligent Networking of Process Wastewater Streams in the Chemical industry". White Paper. August 5, 1998.
- Eastwood, A.R, Tainsh, R.A. and Fien, G-J. "Minimising Wastewater Emissions using WaterPinch[®] Analysis". August 6, 1998.
- James G. Mann and Y. A. Liu. "Industrial Water Reuse and Wastewater Minimization". MacGraw-Hill. 1999. pag. 35-48

APENDICE A

TRANSFERENCIA DE MASA

La transferencia de masa es el “movimiento” que sufre un compuesto en una mezcla de la zona de mayor concentración a la de menor concentración. A menudo la transferencia sucede entre dos fases cruzando una interfase formada por las mismas.

La transferencia de masa ocurre por dos mecanismos: 1) por difusión molecular que resulta del movimiento microscópico espontáneo y al azar de moléculas en un gas, líquido o sólido y 2) por convección, que resulta del movimiento de fluidos macroscópicos.

Cualquiera de las difusiones anteriormente mencionadas requieren el movimiento de diferentes especies hasta que la composición sea uniforme.

En una mezcla binaria, la difusión molecular ocurre cuando uno o más potenciales, por ejemplo: gradientes de concentración (difusión ordinaria), presión (difusión por presión), temperatura (difusión térmica), y fuerzas externas (difusión forzada) que actúan de manera desigual en las diferentes especies químicas presentes.

DIFUSIÓN MOLECULAR ORDINARIA

Supóngase un envase de vidrio cilíndrico que está lleno parcialmente de agua que tiene un colorante rojo disuelto. Agua limpia es añadida poco a poco para que no se mezcle con el agua coloreada. En un principio se nota una fina frontera entre el agua coloreada y el agua limpia, pero después de un tiempo el agua que se encuentra en la parte de arriba comienza a colorearse mientras que el agua que está abajo comienza a perder color. La capa superior comienza a colorearse más que en la interfase original. Durante este cambio de color el movimiento de cada molécula es al azar, pero se respeta que en promedio, la cantidad de moléculas que cruzan de la región de arriba es igual a la que cruza de la región de abajo, de esta forma, si la concentración de las moléculas que se encuentran en la fase de abajo es mayor que en la fase de arriba una transferencia neta de las moléculas de la primera región a la segunda se llevará a cabo. Después de un período de tiempo, la concentración del colorante será igual en toda la solución. Basándose en estas observaciones se puede decir:

- 1.- La transferencia de masa por difusión molecular ordinaria ocurre cuando se presenta un gradiente de concentración, esto es, las especies se difunden hacia la región con menor concentración.
- 2.- La transferencia de masa es proporcional a el área y no al volumen de la mezcla, por lo tanto la cantidad de transferencia puede ser expresado como un flux.
- 3.- La transferencia de masa se detiene cuando la concentración es uniforme.

EQUILIBRIO

Considérese una fase pobre j de contaminante, que esta en contacto con una fase rica, i , en un recipiente cerrado con el fin de transferir un cierto soluto. El soluto se difunde desde la fase rica a la fase pobre, mientras tanto, una fracción del soluto difundido regresa a la fase rica. Inicialmente la transferencia del soluto de la fase rica a la pobre sobrepasa la transferencia de la fase pobre a la fase rica lográndose una transferencia de soluto neta a la fase pobre, así, conforme la concentración del soluto en la fase rica se incrementa, la transferencia inversa también incrementa. Físicamente, ésta situación corresponde al estado en el que ambas fases tienen el mismo valor de potencial químico. En el caso del sistema ideal, la transferencia de un componente es indiferente a la transferencia de otras sustancias. Entonces, la composición del soluto en la fase rica, y_i , puede ser relacionada a la composición en la fase pobre del mismo soluto, x_j , por medio de una función de distribución de equilibrio, f_j^* , que es una función que representa las características del sistema, incluyendo presión y temperatura. Por lo tanto, para una fase rica, y_i , la máxima composición permisible del soluto en la fase pobre, x_j^* , esta dada por:

$$y_i = f_j^*(x_j^*) \tag{1}$$

Nótese que se manejan los subíndices i y j para denotar distintos procesos o distintas fases.

En varias aplicaciones ambientales que implican sistemas de dilución la función de equilibrio puede linealizarse mediante un rango bajo de operación obteniéndose la siguiente ecuación:

$$y_i = m_j x_j^* + b_j \tag{2}$$

Casos especiales de la ecuación 2 incluyen la ley de Raoult para absorción:

$$y_i = \frac{P_i^o}{P_{total}} x_i^* \tag{3}$$

Donde y_i y x_i^* son la fracción mol del soluto en la fase gaseosa y líquida respectivamente, P_i^o es la presión del vapor del soluto a la temperatura T y P_{total} es la presión total del gas.

Otro ejemplo es la ley de Henry para agotamiento:

$$y_i = H_i x_i^* \tag{4}$$

Donde y_i y x_i^* son las fracciones mol del soluto en el gas y en el líquido respectivamente, y H_i es el coeficiente de Henry, el cual puede ser aproximado teóricamente por la siguiente expresión

$$H_i = \frac{P_{total} \sum_{j=1}^n v_j^{(l)} \frac{d \ln \gamma_j^{(l)}}{d \ln x_j^{(l)}}}{P_{total}^{(l)}} \tag{5}$$

Donde $p_{\text{solute}}^{\circ}(T)$ es la presión de vapor del soluto a la temperatura T , P_{total} es la presión total del gas de agotamiento, y $y_i^{\text{solubilidad}}$ es la solubilidad en la fase líquida del contaminante a la temperatura T .

COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA

Un método común para describir el coeficiente de transferencia de masa en la interfase involucra el uso de coeficientes promedio de transferencia de masa que están basados en las diferencia entre la concentración del soluto en una fase y su concentración de equilibrio en la otra fase. Supóngase que la concentración de el contaminante en la fase rica y pobre es y_i y x_j , respectivamente. Para el caso de equilibrio lineal, la concentración del contaminante en la fase pobre, el cual esta en equilibrio con y_i , esta dado por:

$$x_j^* = (y_i - b_j)/m_j \quad (6)$$

Y la concentración del contaminante en la fase rica, la cual esta en equilibrio con x_j , puede ser presentada por:

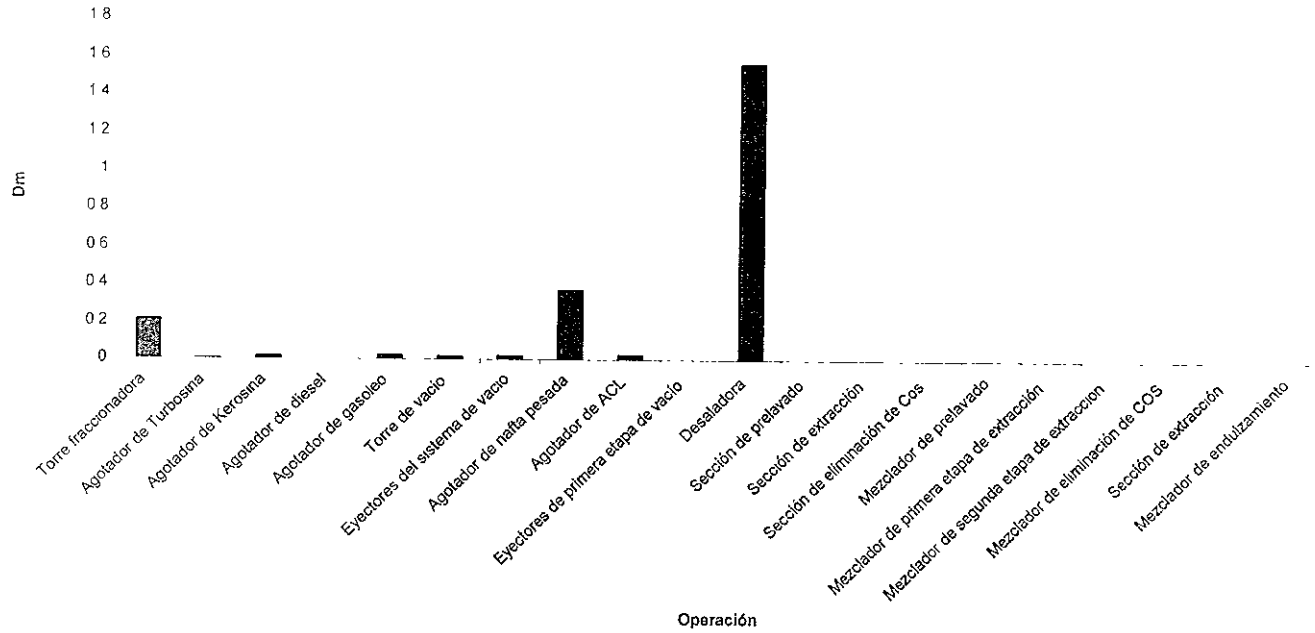
$$y_j^* = m_j x_j + b_j \quad (7)$$

A continuación definiremos dos coeficientes de transferencia de masa; uno para la fase rica K_y , y otro para la fase pobre, K_x . Así, el coeficiente de transferencia de masa de interfase para el contaminante, $N_{\text{contaminante}}$, puede ser definido como:

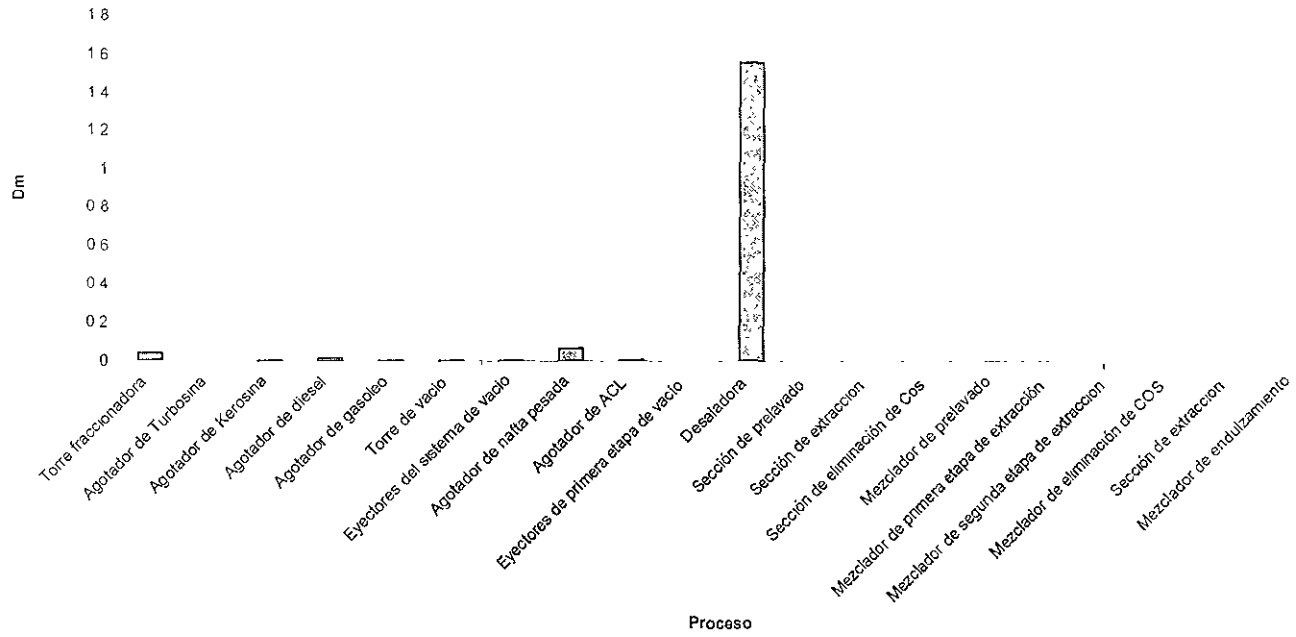
$$N_{\text{contaminante}} = K_y(y_i - y_{i,j}^*) = K_x(x_j^* - x_j) \quad (8)$$

ANEXO I

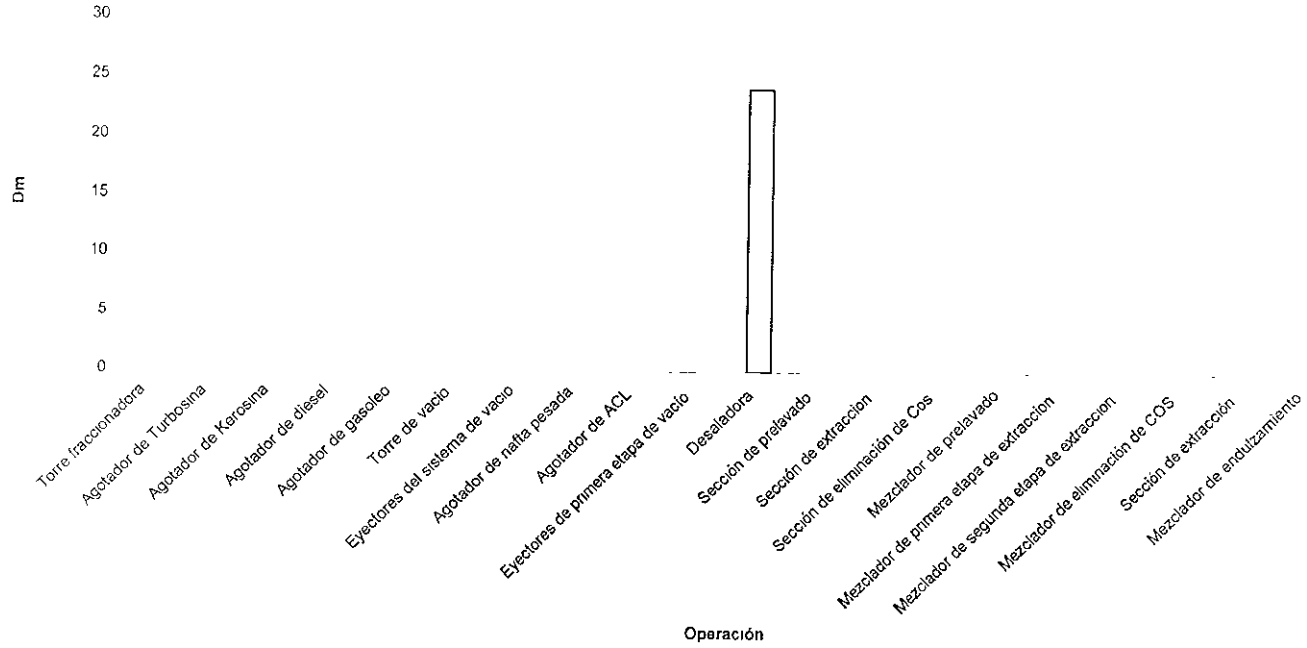
Gráfica para NH3

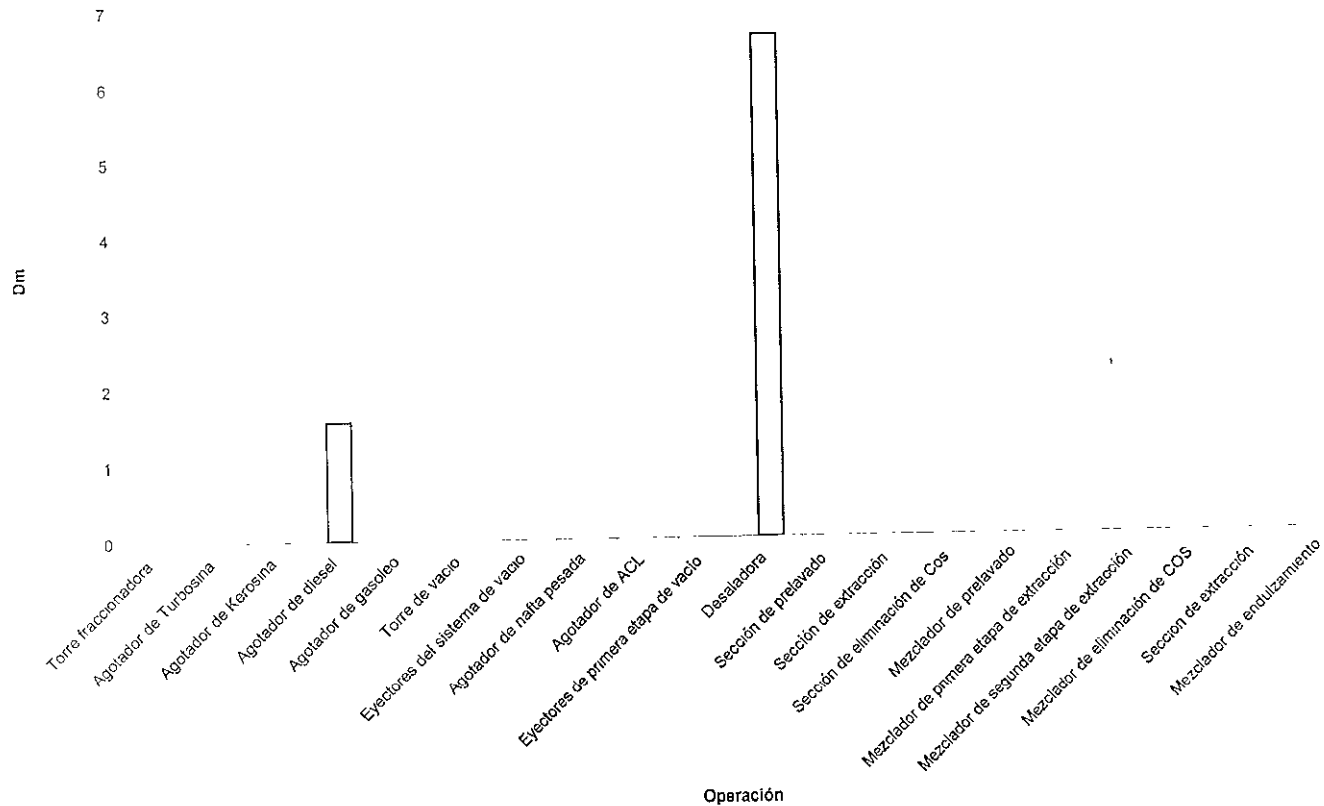


Gráfica para H2S



Gráfica para las Sales





CONJUNTO

A11 /0/,	A21 /0/,	A31 /0/,	A41 /0/,	A51 /0/,	A61 /0/,	A71 /0/,	A81 /0/,	A99 /5/,
A12 /0.7435/,	A22 /0.7435/,	A32 /0.7435/,	A42 /0.7435/,	A52 /0.006412/,	A62 /0.7434/,	A72 /0.7455/,	A82 /0.7435/,	A99 /40/,
A13 /0.8503/,	A23 /0.8503/,	A33 /0.8504/,	A43 /0.8503/,	A53 /0.007679/,	A63 /0.8904/,	B71 /0/,	A83 /0.8904/,	B99 /24.7722/,
A14 /0.9046/,	B11 /0/,	A34 /0.9047/,	A44 /0.9046/,	A54 /0.007802/,	A64 /0.9046/,	B72 /4.1890/,	A84 /0.9046/,	B910 /60/,
A15 /0.008769/,	B22 /4.1890/,	A35 /1.008769/,	B41 /0/,	A55 /0.0087/,	A65 /1.008727/,	C71 /0/,	A85 /1.008747/,	C99 /3/,
A16 /0.0388/,	C23 /5.0168/,	A36 /1.0388/,	B42 /4.1890/,	B51 /0/,	A66 /1.03879/,	C72 /0.0001691/,	A86 /1.03878/,	C910 /543/,
A17 /0.1152/,	C21 /0/,	B31 /0/,	B43 /5.0168/,	B52 /4.1890/,	A67 /1.1152/,	D71 /0/,	A87 /3.3411/,	D99 /1.5/,
A18 /0.2841/,	C22 /0.0001477/,	B32 /4.1890/,	B44 /5.0972/,	B53 /5.0168/,	A68 /3.3411/,	D72 /0.00394/,	B81 /0/,	D910 /150/,
B11 /0.0502/,	C23 /5.0168/,	B33 /5.0168/,	C41 /0/,	B54 /5.0972/,	A69 /4.3965/,	F71N /2.5/,	B82 /4.1890/,	F91N /44.443/,
B12 /4.1890/,	D21 /0/,	B34 /5.0972/,	C42 /0.0001644/,	B55 /4.8837/,	B61 /0/,	W7A1 /0/,	B83 /5.0168/,	T99 /0/,
B13 /5.0168/,	D22 /0.00394/,	B35 /5.6837/,	C43 /0.0001969/,	C51 /0/,	B62 /4.1890/,	W7B1 /0/,	B84 /5.0972/,	W9A9 /0/,
B14 /5.0972/,	D23 /0.0047/,	B36 /5.8529/,	C44 /0.0002/,	C52 /0.0001474/,	B63 /5.0168/,	W7C1 /0/,	B85 /5.6837/,	W9B9 /0/,
B15 /5.8529/,	F71N /2.994/,	C31 /0/,	D41 /0/,	C53 /0.0001765/,	B64 /5.0972/,	W7D1 /0/,	B86 /5.8529/,	W9C9 /0/,
B16 /5.8529/,	W2A1 /0/,	C32 /0.0001437/,	D42 /0.003945/,	C54 /0.0001794/,	B65 /5.6837/,		B87 /16.8254/,	W9D9 /0/,
B17 /0.8254/,	W2B1 /0/,	C33 /0.0001714/,	D43 /0.004724/,	C55 /0.0002/,	B66 /5.8529/,		C91 /0/,	
B18 /0.8254/,	W2C1 /0/,	C34 /0.0001741/,	D44 /0.0048/,	D51 /0/,	B67 /18.8254/,		C82 /0.0001999/,	
C11 /0/,	W2D1 /0/,	C35 /0.0001942/,	F71N /3.042/,	D52 /0.003980/,	B68 /18.8254/,		C83 /0.0002395/,	
C12 /0.000273/,		C36 /0.0002/,	W4A1 /0/,	D53 /0.004765/,	B69 /24.7722/,		C84 /0.0002434/,	
C13 /0.000266/,		D31 /0/,	W4B1 /0/,	D54 /0.004843/,	C61 /0/,		C85 /0.0002714/,	
C14 /0.0002415/,		D32 /0.003936/,	W4C1 /0/,	D55 /0.0054/,	C62 /0.0001691/,		C86 /0.0002794/,	
C15 /0.0002497/,		D33 /0.004714/,	W4D1 /0/,	F51N /3.392/,	C63 /0.0002025/,		C87 /0.0008/,	
C16 /0.0002497/,		D34 /0.004789/,		W5A1 /0/,	C64 /0.0002058/,		D81 /0/,	
C17 /0.0002497/,		D35 /0.005341/,		W5B1 /0/,	C65 /0.0002294/,		D82 /0.003933/,	
C18 /0/,		D36 /0.00955/,		W5C1 /0/,	C66 /0.0002363/,		D83 /0.004711/,	
C19 /0/,		F31N /3.493/,		W5D1 /0/,	C67 /0.0002536/,		D84 /0.004786/,	
C20 /0.000239/,		W3A1 /0/,			C68 /0.0007599/,		D85 /0.005337/,	
C21 /0.000239/,		W3B1 /0/,			C69 /0.0010/,		D86 /0.005496/,	
C22 /0.000239/,		W3C1 /0/,			D61 /0/,		D87 /0.0177/,	
C23 /0.000239/,		W3D1 /0/,			D62 /0.00394/,		F91N /3.75/,	
C24 /0.000239/,					D63 /0.004719/,		W8A1 /0/,	
C25 /0.000239/,					D64 /0.004794/,		W8B1 /0/,	
C26 /0.000239/,					D65 /0.005346/,		W8C1 /0/,	
C27 /0.000239/,					D66 /0.005505/,		W8D1 /0/,	
C28 /0.000239/,					D67 /0.005910/,			
C29 /0.000239/,					D68 /0.01771/,			
C30 /0.000239/,					D69 /0.0233/,			
C31 /0.000239/,					F61N /14.784/,			
C32 /0.000239/,					W6A1 /0/,			
C33 /0.000239/,					W6B1 /0/,			
C34 /0.000239/,					W6C1 /0/,			
C35 /0.000239/,					W6D1 /0/,			

***parametros

PARAMETROS: OS1, OS1.05, OS1.3, OS14, OS15, OS16, OS17, F11, F12, F13, F14, F15, F16, F17, F18,
 T12, T13, T14, T15, T16, T17, T18, W1A2, W1B2, W1C2, W1D2, W51A2, W51B2, W51C2, W51D2, W1A3, W1B3, W1C3, W1D3, W51A3, W51B3, W51C3, W51D3, W1A4, W1B4, W1C4, W1D4, W51A4, W51B4, W51C4, W51D4,
 W1A5, W1B5, W1C5, W1D5, W51A5, W51B5, W51C5, W51D5, W1A6, W1B6, W1C6, W1D6, W51A6, W51B6, W51C6, W51D6, W1A7, W1B7, W1C7, W1D7, W51A7, W51B7, W51C7, W51D7, W1A8, W1B8, W1C8, W1D8,
 FS12, FS13, FS14, FS15, FS16, FS17;

C11 = MAX (A1-A1) /A12, B12-B11/B12, C12-C11/C12, D12-D11/D12),

F11 = C11*F11N,
 T11 = F11,

W1A1 = W1A1 + F11N*(A12-A11)/T12),
 W1B1 = W1B1 + F11N*(B12-B11)/T12),
 W1C1 = W1C1 + F11N*(C12-C11)/T12),
 W1D1 = W1D1 + F11N*(D12-D11)/T12),

***datos para encontrar las nuevas o = y f a la salida de intervalo 2

OS1 = MAX (F11N*W13-F11N*W12+W12*W1A2)/(F11N*W13), (F11N*W13-F11N*W12+W12*W1B2)/(F11N*W13), (F11N*W13-F11N*W12+W12*W1C2)/(F11N*W13), (F11N*W13-F11N*W12+W12*W1D2)/(F11N*W13)),

FS11 = OS12*F11N-T11),

W51A2 = T12*W1A2)/(T12+FS12),
 W51B2 = (T12*W1B2)/(T12+FS12),

A1 / 0/,	A21 / 0/,	A31 / 0/,	A41 / 0/,	A51 / 0/,	A61 / 0/,	A71 / 0/,	A81 / 0/,	A99 / 5/
A11 / 0/,	A22 / 0 7435/,	A32 / 0 7435/,	A42 / 0 7434/,	A52 / 0.006412/,	A62 / 0 7434/,	A72 / 0 7455/,	A82 / 0 7435/,	A910 / 40/
A12 / 0 8907/,	A23 / 0 93017/,	A33 / 0 8904/,	A43 / 0 8503/,	A53 / 0 007579/,	A63 / 0 8904/,	E71 / 0/,	A93 / 0 8904/,	B99 / 24 7727/
A14 / 0 9047/,	B21 / 0/,	A34 / 0 9047/,	A44 / 0 9046/,	A54 / 0 097802/,	A54 / 0.9046/,	B72 / 4 1890/,	A84 / 0 9046/,	B910 / 60/
A15 / 0 9077/,	B22 / 4.1890/,	A35 / 0 008165/,	B41 / 0/,	A55 / 0 0087/,	A65 / 0 008727/,	C71 / 0/,	A85 / 1.008747/,	C99 / 3/
A16 / 0 3076/,	B23 / 5 0168/,	A36 / 1 0368/,	B42 / 4 1890/,	B51 / 0/,	A66 / 1 03879/,	C72 / 0.0001691/,	A86 / 1 03878/,	C910 / 543/
A17 / 0 1157/,	C21 / 0/,	B31 / 0/,	B43 / 5 0168/,	B52 / 4 1890/,	A67 / 1 1152/,	D71 / 0/,	A87 / 3 3411/,	D99 / 1.5/
A18 / 0 1124 /,	C22 / 0 900147/,	B32 / 4 1890/,	B44 / 5 0972/,	B53 / 5 0168/,	A68 / 3 3411/,	D72 / 0.00394/,	B81 / 0/,	D910 / 150/
B11 / 0/,	C23 / 0 0002/,	B33 / 0 0489/,	C41 / 0/,	B54 / 5 0972/,	A69 / 4.3965/,	F71N / 2 5/,	B82 / 4.1890/,	F91N / 44 443/
B12 / 4 8907/,	D21 / 0/,	B34 / 5 0972/,	C42 / 0 0001664/,	B55 / 5 6837/,	B63 / 0 0087/,	W7A1 / 0/,	B83 / 5 0168/,	T99 / 0/
B13 / 0 1481/,	D22 / 0 00332/,	B35 / 5.6837/,	C43 / 0.0001968/,	C51 / 0/,	B62 / 4.1890/,	W7B1 / 0/,	B84 / 5 0972/,	W9A9 / 0/
B14 / 5 0972/,	D23 / 0 00417/,	B36 / 5 8529/,	C44 / 0 0002/,	C52 / 0.0001474/,	B63 / 5.0168/,	W7C1 / 0/,	B85 / 5 6837/,	W9B9 / 0/
B15 / 5.6837/,	F21A / 2 894/,	C31 / 0/,	D41 / 0/,	C53 / 0 0001765/,	B64 / 5.0972/,	W7D1 / 0/,	B86 / 5.8529/,	W9C9 / 0/
B16 / 5 8529/,	W2A1 / 0/,	C32 / 0 000143/,	D42 / 0 003945/,	C54 / 0 0001794/,	B65 / 5.6837/,		B87 / 18 8254/,	W9D9 / 0/
B17 / 4 3411/,	W2B1 / 0/,	C33 / 0 0001714/,	D43 / 0 004724/,	C55 / 0 0002/,	B66 / 5.8529/,		C81 / 0/,	
B18 / 0 3411/,	W2C1 / 0/,	C34 / 0 009 741/,	D44 / 0 0048/,	D51 / 0/,	B67 / 18.8254/,		C82 / 0 0001999/,	
B19 / 0 1123/,	W2D1 / 0/,	C35 / 0 0001942/,	F41N / 3 042/,	D52 / 0 003980/,	B68 / 18.8254/,		C83 / 0 0002395/,	
B20 / 0 0002/,		C36 / 0 0002/,	W4A1 / 0/,	D53 / 0.004766/,	B69 / 24.7722/,		C84 / 0 0002434/,	
C11 / 0 000172/,		D31 / 0/,	W4B1 / 0/,	D54 / 0 004843/,	C61 / 0/,		C85 / 0 0002714/,	
C12 / 0 000166/,		D32 / 0 003936/,	W4C1 / 0/,	D55 / 0 0054/,	C62 / 0 0001691/,		C86 / 0 0002794/,	
C13 / 0 000147/,		D33 / 0 004714/,	W4D1 / 0/,	F51N / 3 392/,	C63 / 0 0002025/,		C87 / 0 0008/,	
C14 / 0 000145/,		D34 / 0 004789/,		W5A1 / 0/,	C64 / 0.0002058/,		D81 / 0/,	
C15 / 0 000267/,		D35 / 0 005341/,		W5B1 / 0/,	C65 / 0.0002294/,		D82 / 0 003933/,	
C16 / 0 000198/,		D36 / 0 0055/,		W5C1 / 0/,	C66 / 0.0002363/,		D83 / 0 004711/,	
C17 / 0/,		F31N / 3 493/,		W5D1 / 0/,	C67 / 0 0002367/,		D84 / 0.004786/,	
C18 / 0 0001358/,		W3A1 / 0/,			C68 / 0.0007599/,		D85 / 0 005337/,	
C19 / 0 0001247/,		W3B1 / 0/,			C69 / 0.0010/,		D86 / 0 005496/,	
C20 / 0 0001782/,		W3C1 / 0/,			D61 / 0/,		D87 / 0 0177/,	
C21 / 0 005344/,		W3D1 / 0/,			D62 / 0.00394/,		F81N / 3 75/,	
C22 / 0 005337/,					D63 / 0 004719/,		W8A1 / 0/,	
C23 / 0 005346/,					D64 / 0.004794/,		W8B1 / 0/,	
C24 / 0 0001782/,					D65 / 0 005346/,		W8C1 / 0/,	
C25 / 0 0001782/,					D66 / 0.005505/,		W8D1 / 0/,	
F1A / 0 000135/,					D67 / 0.005910/,			
W1A / 0/,					D68 / 0.01771/,			
W1B / 0/,					D69 / 0.0233/,			
W1C / 0/,					F61N / 14 784/,			
W1D / 0/,					H6A1 / 0/,			
					H6B1 / 0/,			
					H6C1 / 0/,			
					H6D1 / 0/,			
					W6D1 / 0/,			

CP=66410 1

*A=AME*E*E*E
 C11,C812,CS13,OS14,OS15,CS16,OS17,F11,F12,F13,F14,F15,F16,F17,F18,
 T12,T13,T14,T15,T16,T17,T18,W1A2,W1B2,W1C2,W1D2,*S1A2,*S1B2,*S1C2,*S1D2,W1A3,W1B3,W1C3,W1D3,WS1A3,WS1B3,WS1C3,WS1D3,W1A4,W1B4,W1C4,W1D4,WS1A4,WS1B4,WS1C4,WS1D4,
 W1A5,W1B5,W1C5,W1D5,WS1A5,WS1B5,WS1C5,WS1D5,W1A6,W1B6,W1C6,W1D6,WS1A6,WS1B6,WS1C6,WS1D6,W1A7,W1B7,W1C7,W1D7,WS1A7,WS1B7,WS1C7,WS1D7,W1A8,W1B8,W1C8,W1D8,
 F51C,F513,F514,F515,F516,F517.

D11 = W1A*(A12-A11)/A12, W1B2-B11/B12, (C12-C11)/C12, (D12-D11)/D12),

F11 = D11*F1N,
T11 = F11.

W1A1 = F1N*(A12-A11)/T12),
 W1B1 = W1B1* F1N*(B12-B11)/T12),
 W1C1 = W1C1* F1N*(C12-C11)/T12),
 W1D1 = W1D1* F1N*(D12-D11)/T12):

* metodo para encontrar las nubes o w y f a la salida del intervalo 2

CS13 = W1A*(F1N*(A13-F11*(A12-T12*(A1A2))/(F1N*(A13), (F1N*(B13-F11N*(B12*(T12*(A1B2))/(F1N*(B13), (F1N*(C13-F11N*(C12*(T12*(A1C2))/(F1N*(C13), (F1N*(D13-F11N*(D12*(T12*(A1D2))/(F1N*(D13));

FS12 = CS12*(F1N-T12).

WS1A2 = T12*W1A2/(T12+FS12),
 WS1B2 = T12*W1B2/(T12+FS12).

```

* calculo de la salida del segundo intervalo a la entrada del tercer intervalo para la operacion uno
* T3=T2-FS2..
* A3=A1-A2-F IN* A2-B2*(3-A12)/T13..
* B3=A1-B2-F IN* B2-C2*(3-B12)/T13..
* C3=A1-C2-F IN* C2-D2*(3-C12)/T13..
* D3=A1-D2-F IN* D2-E2*(3-D12)/T13..
* metodo para encontrar las flechas o y f a la salida del intervalo 3
* O3 = MAX (E1*(A1-A2-F IN*A12-T13*A3)/(F IN*A14), (F IN*B14-F IN*B13-T13*W13)/(F IN*B14), (F IN*C14-F IN*C13-T13*W13)/(F IN*C14), (F IN*D14-F IN*D13-T13*W13)/(F IN*D14));
* F3 = (E1*(A1-A2-F IN*A12-T13*A3))/T14..
* A3 = (E1*(A1-A2-F IN*A12-T13*A3))/T13+FS13..
* B3 = (E1*(B1-B2-F IN*B12-T13*B3))/T13+FS13..
* C3 = (E1*(C1-C2-F IN*C12-T13*C3))/T13+FS13..
* D3 = (E1*(D1-D2-F IN*D12-T13*D3))/T13+FS13..
* adaptando la salida del tercer intervalo a la entrada del cuarto intervalo para la operacion uno
* T4=T3-FS3..
* A4=A3-A2-F IN* A2-B2*(4-A13)/T14..
* B4=A3-B2-F IN* B2-C2*(4-B13)/T14..
* C4=A3-C2-F IN* C2-D2*(4-C13)/T14..
* D4=A3-D2-F IN* D2-E2*(4-D13)/T14..
* metodo para encontrar las flechas o y f a la salida del intervalo 4
* O4 = MAX (F IN*A15-F IN*A14-T14*W14)/(F IN*A15), (F IN*B15-F IN*B14-T14*W14)/(F IN*B15), (F IN*C15-F IN*C14-T14*W14)/(F IN*C15), (F IN*D15-F IN*D14-T14*W14)/(F IN*D15));
* F4 = (F IN*A15-F IN*A14-T14*W14)/T14..
* A4 = (F IN*A15-F IN*A14-T14*W14)/(T14+FS14)..
* B4 = (F IN*B15-F IN*B14-T14*W14)/(T14+FS14)..
* C4 = (F IN*C15-F IN*C14-T14*W14)/(T14+FS14)..
* D4 = (F IN*D15-F IN*D14-T14*W14)/(T14+FS14)..
* adaptando la salida del cuarto intervalo a la entrada del quinto intervalo para la operacion uno
* T5=T4-FS4..
* A5=A4-A2-F IN* A15-A4)/T15..
* B5=A4-B2-F IN* B15-B4)/T15..
* C5=A4-C2-F IN* C15-C4)/T15..
* D5=A4-D2-F IN* D15-D4)/T15..
* metodo para encontrar las flechas o y f a la salida del intervalo 5
* O5 = MAX (F IN*A16-F IN*A15-T15*W15)/(F IN*A16), (F IN*B16-F IN*B15-T15*W15)/(F IN*B16), (F IN*C16-F IN*C15-T15*W15)/(F IN*C16), (F IN*D16-F IN*D15-T15*W15)/(F IN*D16));
* F5 = (F IN*A16-F IN*A15-T15*W15)/T15..
* A5 = (F IN*A16-F IN*A15-T15*W15)/T15+FS15..
* B5 = (F IN*B16-F IN*B15-T15*W15)/T15+FS15..
* C5 = (F IN*C16-F IN*C15-T15*W15)/T15+FS15..
* D5 = (F IN*D16-F IN*D15-T15*W15)/T15+FS15..
* adaptando la salida del quinto intervalo a la entrada del sexto intervalo para la operacion uno
* F6=T5-F5..

```

```

* COD para encontrar las nuevas w y f a la salida del intervalo 6
T2 = MAJ (M21*(A17-F21IN*A17)+F21IN*(B16+T16*W16)/(F21IN*A17), (F21IN*B17-F21IN*B16+T16*W16)/(F21IN*A17), (F21IN*C17-F21IN*C16+T16*W16)/(F21IN*A17), (F21IN*D17-F21IN*D16+T16*W16)/(F21IN*A17)),
T3 = MIN (T2, T1)
M21A = T2*(A17-A16)/(T2-T1)
M21B = T2*(B17-B16)/(T2-T1)
M21C = T2*(C17-C16)/(T2-T1)
M21D = T2*(D17-D16)/(T2-T1)
* Pasando la salida de sexto intervalo a la entrada del septimo intervalo para la operacion uno
T1 = T2
M21 = M21A
M21B = M21B
M21C = M21C
M21D = M21D
* Metodo para encontrar las nuevas w y f a la salida de intervalo 7
T2 = MAJ (M21*(A17-F21IN*A17)+F21IN*(B17+T17*W17)/(F21IN*B18), (F21IN*C18-F21IN*C17+T17*W17)/(F21IN*B18), (F21IN*D18-F21IN*D17+T17*W17)/(F21IN*B18)),
T3 = MIN (T2, T1)
M21A = T2*(A17-A16)/(T2-T1)
M21B = T2*(B17-B16)/(T2-T1)
M21C = T2*(C17-C16)/(T2-T1)
M21D = T2*(D17-D16)/(T2-T1)
* Pasando la salida de septimo intervalo a la entrada del octavo intervalo para la operacion uno
T1 = T2
M21 = M21A
M21B = M21B
M21C = M21C
M21D = M21D
* Metodo para encontrar las nuevas w y f a la salida del intervalo 8
T2 = MAJ (M21*(A22-F21IN*A22)+F21IN*(B22+T22*W22)/(F21IN*A23), (F21IN*B23-F21IN*B22+T22*W22)/(F21IN*A23), (F21IN*C23-F21IN*C22+T22*W22)/(F21IN*A23), (F21IN*D23-F21IN*D22+T22*W22)/(F21IN*A23)),
T3 = MIN (T2, T1)
M21A = T2*(A22-A21)/(T2-T1)
M21B = T2*(B22-B21)/(T2-T1)
M21C = T2*(C22-C21)/(T2-T1)
M21D = T2*(D22-D21)/(T2-T1)
PARAMETRO C21, C22, C23, F21, F22, T22, T23, W2A2, W2B2, W2C2, W2D2, h2A2, h2B2, h2C2, h2D2, w2A2, w2B2, w2C2, w2D2, w2A3, w2B3, w2C3, w2D3,
F22,
F23,
T21 = MAJ (M21*(A21-F21IN*A21)+F21IN*(B21+T21*W21)/(F21IN*A22), (F21IN*C21-F21IN*C20+T21*W21)/(F21IN*A22), (F21IN*D21-F21IN*D20+T21*W21)/(F21IN*A22)),
T2 = MIN (T21, T1)
M21A = T2*(A21-A20)/(T2-T1)
M21B = T2*(B21-B20)/(T2-T1)
M21C = T2*(C21-C20)/(T2-T1)
M21D = T2*(D21-D20)/(T2-T1)
* Metodo para encontrar las nuevas w y f a la salida del intervalo 2
T2 = MAJ (F21IN*(A23-F21IN*A22+T22*W22)/(F21IN*A23), (F21IN*B23-F21IN*B22+T22*W22)/(F21IN*B23), (F21IN*C23-F21IN*C22+T22*W22)/(F21IN*C23), (F21IN*D23-F21IN*D22+T22*W22)/(F21IN*D23)),
T3 = MIN (T2, T1)
M21A = T2*(A23-A22)/(T2-T22)

```



```

* 33 para encontrar las nuevas O y f a la salida del intervalo 4
T34 = MAX( F = (F31*(D34-D33)+T34)/(F31*A35), (F31*B35-F31*B34+T34*(B34)/(F31*B35)), (F31*C35-F31*C34+T34*(B3C4)/(F31*C35)), (F31*D35-F31*D34+T34*(B3C4)/(F31*D35)),
T34 = (D34*(F31-T34)/T34
M33A = T34*A34 / (T34+FS34),
M33B = T34*B34 / (T34+FS34),
M33C = T34*C34 / (T34+FS34),
M33D = T34*D34 / (T34+FS34),
* 34 para la salida del cuarto intervalo a la entrada del quinto intervalo para la operacion uno
T35 = T34+FS34,
M34A = (T34*(A35-F31*A35)+T35)/(T35),
M34B = (T34*(B35-F31*B35)+T35)/(T35),
M34C = (T34*(C35-F31*C35)+T35)/(T35),
M34D = (T34*(D35-F31*D35)+T35)/(T35),
* 35 para encontrar las nuevas O y f a la salida del intervalo 5
D35 = MAX( F = (F31*(A35-T35*(A35)/(F31*A36)), (F31*B36-F31*B35+T35*(B35)/(F31*B36)), (F31*C36-F31*C35+T35*(B3C5)/(F31*C36)), (F31*D36-F31*D35+T35*(B3D5)/(F31*D36)),
T35 = (D35*(F31-T35)/T35
M35A = T35*A35 / (T35+FS35),
M35B = T35*B35 / (T35+FS35),
M35C = T35*C35 / (T35+FS35),
M35D = T35*D35 / (T35+FS35),
* 36 para la salida del quinto intervalo a la entrada del sexto intervalo para la operacion uno
T36 = T35+FS35,
M36A = (T35*(A36-F31*A36)+T36)/(T36),
M36B = (T35*(B36-F31*B36)+T36)/(T36),
M36C = (T35*(C36-F31*C36)+T36)/(T36),
M36D = (T35*(D36-F31*D36)+T36)/(T36),
* 37 para el inicio 6
PARAMETERS C1, C54, C943, F41, F42, F43, F44,
          T41, T42, T43, T44, W4A2, W4B2, W4C2, W4D2, W5A2, W5B2, W5C2, W5D2, W4A3, W4B3, W4C3, W4D3, W5A3, W5B3, W5C3, W5D3, W4A4, W4B4, W4C4, W4D4,
          W4C1, W54,
* 38 para el inicio 6
T41 = MAX( A41-A41 / F41, (A42-B41) / B42, (C42-C41) / C42, (D42-D41) / D42);
F41 = (T41*(F41-T41)/T41,
T42 = F41,
* 39 para el inicio 6
W41 = W4A1*(F41-A41-B41) / T41,
W42 = W4B1*(F41-B41-C41) / T42,
W4C1 = W4C1*(F41-C41-D41) / T43,
W4D1 = W4D1*(F41-D41-E41) / T44,
* 40 para encontrar las nuevas O y f a la salida del intervalo 2
T42 = MAX( F41*(A42-D41*(A42-D42)+W4A2)/(F41*A43), (F41*(B43-F41*B42+T42*(B42)/(F41*B43)), (F41*(C43-F41*C42+T42*(W4C2)/(F41*C43)), (F41*(D43-F41*D42+T42*(W4C2)/(F41*D43)),
F54 = (C42*(F41-T42)/T42,
W54A = T42*(A42) / (T42+FS42),
W54B = (T42*(W4B2) / (T42+FS42),

```



```

* PARA ENCONTRAR LAS NUEVAS O y f a la salida del intervalo 6
C6F6 = MAX (F6IN*A67-F6IN*A66-T66*W6A6)/(F6IN*A67), (F6IN*B67-F6IN*B66+T66*W6B6)/(F6IN*B67), (F6IN*C67-F6IN*C66+T66*W6C6)/(F6IN*C67), (F6IN*D67-F6IN*D66+T66*W6D6)/(F6IN*D67)},
T6F6 = C6F6**F6IN-T66,
W6F6F = T66*W6F6 / (T66+T6666),
W6F6B = T66*W6B6 / (T66+T6666),
W6F6C = T66*W6C6 / (T66+T6666),
W6F6D = T66*W6D6 / (T66+T6666),
* PASANDO de la salida del sexto intervalo a la entrada del septimo intervalo para la operacion uno
T67 = T6F6 + T66,
W6A7 = W6F6F + F6IN*(C67-A66)/(T67),
W6B7 = W6F6B + F6IN*(B67-B66)/(T67),
W6C7 = W6F6C + F6IN*(C67-C66)/(T67),
W6D7 = W6F6D + F6IN*(D67-D66)/(T67),
* Metodo para encontrar las nuevas o y f a la salida del intervalo 7
C6E7 = MAX (F6IN*A67-F6IN*A69-T67*W6A7)/(F6IN*A69), (F6IN*B67-F6IN*B69+T67*W6B7)/(F6IN*B69), (F6IN*C67-F6IN*C69+T67*W6C7)/(F6IN*C69), (F6IN*D67-F6IN*D69+T67*W6D7)/(F6IN*D69)},
T6E7 = C6E7**F6IN-T67,
W6E7F = T67*W6A7 / (T67+T6667),
W6E7B = T67*W6B7 / (T67+T6667),
W6E7C = T67*W6C7 / (T67+T6667),
W6E7D = T67*W6D7 / (T67+T6667),
* PASANDO de la salida del septimo intervalo a la entrada del octavo intervalo para la operacion uno
T68 = T6E7 + T667,
W6A8 = W6E7F + F6IN*(A68-A67)/(T68),
W6B8 = W6E7B + F6IN*(B68-B67)/(T68),
W6C8 = W6E7C + F6IN*(C68-C67)/(T68),
W6D8 = W6E7D + F6IN*(D68-D67)/(T68),
* Metodo para encontrar las nuevas o y f a la salida del intervalo 8
C6E8 = MAX (F6IN*A68-F6IN*A69+T68*W6A8)/(F6IN*A69), (F6IN*B68-F6IN*B69+T68*W6B8)/(F6IN*B69), (F6IN*C68-F6IN*C69+T68*W6C8)/(F6IN*C69), (F6IN*D68-F6IN*D69+T68*W6D8)/(F6IN*D69)},
T6E8 = C6E8**F6IN-T68,
W6E8F = T68*W6A8 / (T68+T6668),
W6E8B = T68*W6B8 / (T68+T6668),
W6E8C = T68*W6C8 / (T68+T6668),
W6E8D = T68*W6D8 / (T68+T6668),
* PASANDO de la salida del octavo intervalo a la entrada del noveno intervalo para la operacion uno
T69 = T6E8 + T668,
W6A9 = W6E8F + F6IN*(A69-A68)/(T69),
W6B9 = W6E8B + F6IN*(B69-B68)/(T69),
W6C9 = W6E8C + F6IN*(C69-C68)/(T69),
W6D9 = W6E8D + F6IN*(D69-D68)/(T69),
* para la operacion 9, esta operacion comienza en el noveno intervalo de concentracion

```