

MODELO DE PROGRAMACION LINEAL PARA ASISTIR EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DISTRIBUIDOS DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES

LINEAR PROGRAMMING MODEL TO ASSIST THE DESIGN OF DISTRIBUTED WASTEWATER TREATMENT SYSTEMS

J. M. Zamora-Mata ^{1*}, R. Hernández-Suárez ^{1,2} y J. Castellanos-Fernández ²

¹ *Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa
Av. San Rafael Atlixco No. 186, Vicentina Izt. 09340 México, D.F.*

² *Instituto Mexicano de Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas No. 152, San Bartolo Atepehuacan, 07730 México.*

Resumen

Uno de los procedimientos disponibles para la síntesis de redes de tratamiento distribuido de efluentes se basa en una extensión de los conceptos y metodología de la tecnología de punto de pliegue, desarrollada inicialmente para problemas de recuperación de calor. Dentro de la metodología secuencial de punto de pliegue para la síntesis de redes distribuidas de tratamiento de efluentes, la tarea de determinación de metas para el flujo mínimo de agua que debe ser tratada en cada unidad de tratamiento y el diseño de las subredes correspondientes para reducir la concentración de los contaminantes presentes, se efectúan de una manera gráfica y secuencial en dos pasos diferentes de la metodología. En este trabajo se presenta un modelo de programación lineal que permite realizar estas dos tareas de una manera simultánea y sistemática. Para el desarrollo del modelo de programación lineal propuesto se plantea una configuración de superestructura básica de tratamiento de efluentes que incluye una sola unidad de tratamiento, sin reciclos ni recirculaciones. El objetivo es que de la optimización de la superestructura básica surja una sub-red de tratamiento capaz de remover la carga másica necesaria para bajar la concentración de al menos un contaminante pre-especificado hasta su límite ambiental permitido. El modelo lineal desarrollado puede, por lo tanto, ser utilizado en el contexto de la metodología de diseño de punto de pliegue incorporando de manera muy simple restricciones y reglas heurísticas de diseño, como por ejemplo, la especificación de entrada total, parcial o nula de un subconjunto de corrientes de aguas residuales a tratamiento, una concentración máxima de contaminante permitida en la entrada de las plantas de tratamiento, una carga másica mínima de contaminante a remover en una unidad de tratamiento, un flujo máximo o mínimo de efluente a través de los procesos de tratamiento, y otras. La versatilidad y uso del modelo desarrollado se muestran con la solución de dos ejemplos ilustrativos.

Palabras clave: síntesis y diseño de sistemas de tratamiento distribuido de efluentes, diseño óptimo, modelos de programación lineal, regiones de diseño.

Abstract

One of the procedures available for the synthesis of distributed wastewater treatment networks is based on an extension of the concepts and methodology derived from heat recovery pinch technology. The minimum flowrate target and the design of a wastewater treatment subnetwork are obtained within the pinch technology methodology in a sequential manner in two different steps. In this paper a linear programming model is presented for targeting and design of distributed effluent treatment systems. For the development of the linear programming model, a single-treatment unit basic network superstructure is established in order to remove the mass load of a given contaminant. The linear programming model can be used to target minimum treatment flowrates within the pinch point methodology. Besides producing the minimum flowrate target, the optimal solution of the presented linear programming model establishes the best subnetwork structure for the removal of a given contaminant. The proposed linear programming model can easily incorporate constraints derived from pinch technology to facilitate the design process. The design rules and constraints that can be incorporated include, for instance, the enforcement of total, partial or no treatment at all for a subset of wastewater streams, maximum allowable contaminant concentration at the inlet of treatment plants, maximum or minimum treatment flowrate through treatment processes, and other. The linear programming model generates a global optimal design for each of the wastewater treatment subnetworks. Two examples illustrate the use of the proposed linear programming model.

Keywords: synthesis and design of distributed wastewater treatment networks, optimal design, linear programming model, design regions.

*Autor para la correspondencia E-mail: jmzm@xanum.uam.mx
Fax: (55) 58044900

1. Introducción

El diseño de un sistema industrial de tratamiento de agua, se presenta como una respuesta de proteger al medio ambiente procurando impedir expulsiones no reguladas de corrientes tóxicas de proceso. Contar con un sistema centralizado de tratamiento de efluentes es una práctica común en los complejos industriales. Las corrientes de efluentes de proceso, servicios auxiliares, purgas, drenajes, etc. son combinadas normalmente en un colector común, este tratamiento centralizado y de uso corriente genera un costo total alto debido a la composición resultante en la corriente efluente a tratar ocasionada por aquellos contaminantes que por su naturaleza específica (no degradables o tóxicos) producen una contaminación a escala al ser combinados. Los costos de inversión son elevados por el número requerido de unidades de tratamiento de efluentes y los costos de operación que se incrementan por el manejo de volúmenes altos de agua a través de los procesos de tratamiento.

En un sistema de tratamiento distribuido o descentralizado, las corrientes contaminadas de composición diferente podrían requerir de tecnologías de tratamiento diferentes. Las corrientes contaminadas son tratadas de manera separada y de forma más selectiva, por lo que se logran reducir los flujos de agua y por ende los costos del sistema de tratamiento (Eckenfelder y col., 1985; Lankford y col., 1988; Higgins, 1989). Además, las industrias tienen que seleccionar entre tecnologías de tratamiento de efluentes, cada vez más complejas y costosas debido a que las instancias reguladoras del medio ambiente exigen límites de concentración de contaminantes cada vez más estrictos en las descargas hacia el medio ambiente. Sin embargo, una selección apropiada de la tecnología más recomendable para la remoción de contaminantes, no es suficiente

para garantizar menores costos en el diseño del sistema de tratamiento de agua. Por lo tanto, es preciso revisar de manera detallada en que forma se deberán asociar y secuenciar las diferentes tecnologías seleccionadas, con el objetivo de lograr los menores costos totales en la remoción de masa de contaminantes de las corrientes efluentes que provienen de las diferentes plantas de proceso. Las complejidades que se presentan durante el diseño son bien conocidas y han motivado el estudio y desarrollo de técnicas sistemáticas que permitan la síntesis óptima de tales sistemas.

Uno de los procedimientos disponibles para la síntesis de redes de tratamiento distribuido de efluentes, se basa en una extensión de los conceptos y metodología de la tecnología de punto de pliegue (Wang y Smith 1994; Kuo y Smith, 1997), la cual fue inicialmente desarrollada como una técnica para el diseño para redes de intercambio de calor (ver p.e., Linnhoff y col., 1993). Esta tecnología permite generar diseños de sistemas distribuidos de tratamiento de efluentes en varias etapas desarrolladas de una manera secuencial. En cada etapa de diseño se adiciona al diseño global de la red, una subred que incluye una unidad de tratamiento diferente. De esta manera se van reduciendo los niveles de concentración de los contaminantes involucrados hasta llevarlos a todos por debajo de su respectiva concentración ambiental límite. Cada etapa de diseño requiere la determinación de metas para el flujo mínimo de agua que debe ser tratada en cada unidad de tratamiento que aún no ha sido incorporada al diseño global, y el diseño de una subred asociada con cada una de dichas unidades de tratamiento. Ambas tareas en la etapa de diseño se efectúan de una manera gráfica y secuencial en dos pasos diferentes de la metodología. La selección de una subred, y la consecuente remoción selectiva de al menos uno de los contaminantes en una etapa de diseño se realiza con criterios, por ejemplo, de pre-

acondicionamiento de efluentes en algunas plantas y arreglos característicos de operaciones de tratamiento (Wang y Smith 1994), o por la precedencia de subredes de tratamiento que determinan las menores pérdidas de energía debidas al mezclado de corrientes (Kuo y Smith, 1997).

El paso de determinación de la meta, t^* , de flujo mínimo de efluentes a tratar en una unidad de tratamiento disponible marca el inicio de una etapa de diseño de subred. El flujo S_i de las corrientes efluentes, donde i especifica la corriente efluente, así como las concentraciones $C_{i,j}$ de contaminante, donde j denota a un contaminante con un límite ambiental $c_{j,e}^U$, determinan la mínima carga másica de contaminante, Δm_j , que deberá ser removida por la unidad de tratamiento en consideración. La carga másica de contaminante que deberá ser removida de cada una de las corrientes efluentes se acumula de acuerdo con los intervalos de concentración definidos por el límite ambiental y las concentraciones de

contaminante en las corrientes efluentes a la llegada de la subred, tal como se ilustra en la Fig. 1. La curva compuesta resultante relaciona de esta manera las concentraciones límite ambiental y de entrada en las corrientes efluentes, con la carga másica acumulada de contaminante Δm_j que deberá ser removida por la subred de tratamiento.

La remoción de contaminantes en la planta de tratamiento se representa a través de una línea de operación cuya pendiente determina el flujo de efluente t^* que debe ser tratado para bajar la concentración de mezcla del contaminante en las corrientes efluentes hasta el valor de su límite ambiental. Los puntos de inicio y terminación de la línea de operación corresponden a las concentraciones de entrada cin_j y de salida c_{out_j} de la corriente efluente de la unidad de tratamiento. La masa de contaminante removida por la unidad de tratamiento como función de las concentraciones de entrada y salida de contaminante y el flujo de la corriente a tratar es igual a la carga másica determinada de la curva compuesta para el contaminante j .

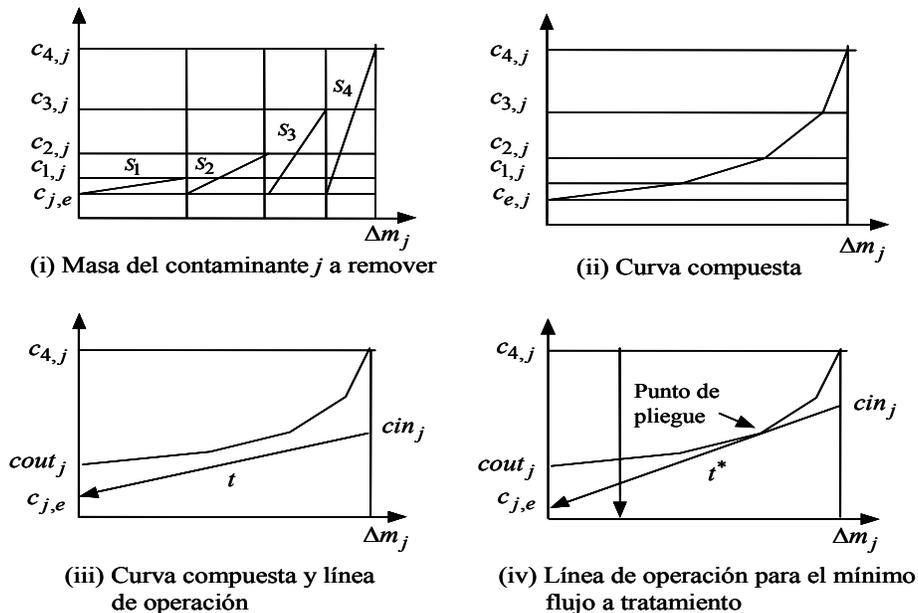


Fig. 1. Determinación del flujo mínimo de efluente por la metodología de punto de pliegue

El punto de contacto de la línea de operación y la curva compuesta determina el flujo mínimo de efluente que debe ser tratado, o la máxima pendiente de la línea de operación delimitada por la curva compuesta, lo que se ha denominado un punto de pliegue en el diseño de una subred de tratamiento de efluentes. La capacidad constante de remoción R_j de la unidad de tratamiento, fija la relación de las concentraciones de entrada y de salida de la corriente tratada. Lo anterior representa también el mínimo costo, cuando existe proporcionalidad del costo con el flujo de efluente a tratar.

Con el auxilio de las curvas compuestas, las corrientes efluentes se clasifican de acuerdo con los niveles de concentración de los contaminantes que se desean remover en la etapa: El primer grupo lo constituyen aquellas corrientes cuya concentración inicial es mayor que la concentración en el punto de pliegue, el segundo grupo lo forman aquellas corrientes cuya concentración inicial es igual a la concentración en el punto de pliegue, y finalmente el tercer grupo está formado por aquellas corrientes cuya concentración inicial se encuentra por debajo de la concentración del punto de pliegue. También, durante este paso se aplican varias reglas de diseño para producir subredes de tratamiento independientes para la remoción de cada uno de los contaminantes presentes en las corrientes de agua efluente.

Las reglas de diseño derivadas por Wang y Smith (1994) indican que, para cumplir con la concentración ambiental límite de un contaminante en la descarga de una subred de tratamiento, las corrientes del primer grupo deben ser totalmente tratadas, las del segundo grupo deben ser tratadas parcialmente hasta completar el flujo mínimo predeterminado y las del tercer grupo no deben ser tratadas. La aplicación de estas reglas de diseño al ejemplo ilustrativo que se

incluye en la Fig. 1 da por resultado el diseño de subred que se presenta en la Fig. 2.

En una etapa de diseño se realizan los gráficos que sean necesarios para llevar a cabo los pasos de determinación del objetivo de flujo mínimo de efluente y de diseño de subred de tratamiento, en función del número de contaminantes presentes en las corrientes efluentes y de la cantidad de unidades de tratamiento disponibles para reducir la concentración de los contaminantes. El objetivo en una etapa de diseño es finalmente seleccionar una subred de tratamiento, que permita remover con un costo mínimo, la carga másica necesaria para llevar la concentración inicial de al menos uno de los contaminantes involucrados hasta su límite ambiental. En la siguiente etapa de diseño, se repite el mismo proceso con los contaminantes y unidades de tratamiento remanentes, y así sucesivamente hasta que en la salida de la última etapa, la concentración de mezcla de todos los contaminantes cae por debajo de sus respectivas concentraciones límite.

La selección de una subred de tratamiento de efluentes en una etapa de diseño se puede lograr, por ejemplo, mediante la propuesta del cálculo de pérdidas de energía debido al mezclado de corrientes (Kuo y Smith, 1997). Las pérdidas de energía debidas al mezclado de corrientes se pueden interpretar como una pérdida de potencial en un sistema debido al mezclado de corrientes. Las pérdidas de energía debidas al mezclado de corrientes para soluciones ideales se pueden expresar como:

$$\Delta E_x = \Delta H - RT_0 \sum_{j \in J} n_j \ln \frac{1}{X_j} \quad (1)$$

Donde ΔH es el calor de mezclado de corrientes, n_j el flujo molar (kmol/h) y X_j es la fracción molar para cada componente. Las corrientes de agua efluente son generalmente soluciones diluidas y se puede

suponer que son ideales. Por lo tanto, ΔH puede ser omitida en (1).

$$\Delta Ex = -RT_0 \sum_{j \in J} n_j \ln \frac{1}{X_j} \quad (2)$$

La expresión en (2) puede escribirse en términos de los flujos másicos y pesos moleculares de los contaminantes de la siguiente manera,

$$\Delta Ex = -RT_0 \sum_{j \in J} \left[\left(\frac{m_j}{M_j} \right) \ln \frac{1}{\frac{(m_j / M_j)}{\sum_{j \in J} (m_j / M_j)}} \right] \quad (3)$$

Cuando existe información disponible para las especies contaminantes se pueden calcular fácilmente n_j y X_j . Para la selección de la subred de tratamiento no se necesita el valor exacto de las pérdidas de energía sino simplemente de las magnitudes relativas. Por ejemplo, se puede considerar en (3) que todos los contaminantes tienen un mismo peso molecular promedio, p.e. el peso molecular del agua $M_j = M$. De esta manera se tiene,

$$\Delta Ex = -\frac{RT_0}{M} \sum_{j \in J} \left[m_j \ln \frac{\sum_{j \in J} m_j}{m_j} \right] \quad (4)$$

Además, en lugar de considerar el valor absoluto de las pérdidas de energía, ΔEx , se pueden evaluar las pérdidas por mezclado en términos de un cambio porcentual, $\% \Delta Ex$, definido en la siguiente expresión:

$$\% \Delta Ex = \frac{\Delta Ex}{Ex_{in}} 100 \quad (5)$$

Donde Ex_{in} representa la energía total de las corrientes efluentes a la llegada del mezclador. La subred de tratamiento que genera el menor cambio porcentual en la

energía de las corrientes efluentes que se mezclan, $\% \Delta Ex$, se selecciona en la etapa de diseño correspondiente.

Las corrientes efluentes que emergen de la subred de tratamiento seleccionada, se utilizan en la siguiente etapa de diseño, en donde se repiten los pasos para la generación y selección de una nueva subred, misma que abordará la remoción de otro de los contaminantes presentes en las corrientes efluentes. El diseño final es obtenido secuenciando las subredes de tratamiento, colocando una después de la otra según el orden de precedencia determinado por la estrategia de secuenciación de menores pérdidas de energía por mezclado de las corrientes efluentes. Esta técnica de diseño es muy completa y contiene aspectos muy interesantes cuando se manejan restricciones de diseño simples, tal es el caso de corrientes que contienen un sólo contaminante. Sin embargo, debido a su naturaleza gráfica en los pasos de determinación de flujo mínimo de efluentes a tratar y de diseño de subredes, la metodología presenta serios inconvenientes al hacer la extensión a sistemas de tratamiento distribuido para contaminantes múltiples.

En este artículo se presenta un modelo de programación lineal que permite resolver de manera simultánea los pasos de determinación de metas de flujo mínimo a tratar y de diseño de subredes de tratamiento de efluentes, en el contexto de los conceptos y metodología secuencial de punto de pliegue propuesta por Wang y Smith (1994) y Kuo y Smith (1997). El modelo matemático se desarrolla con base en una superestructura de subred básica, que involucra una unidad operacional de tratamiento y no incluye reciclo de corrientes.

El modelo lineal propuesto puede incorporar de manera sencilla, diversas restricciones derivadas de la tecnología de punto de pliegue para facilitar el proceso de diseño, así como otras que se pudieran requerir por bases de diseño.

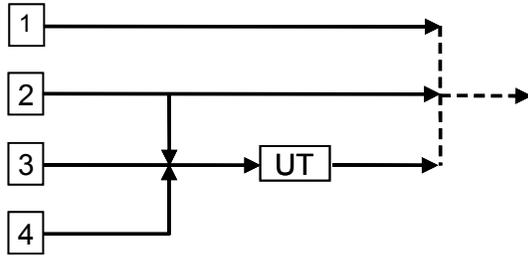


Fig. 2. Diagrama de malla para el diseño de una subred de tratamiento de efluentes.

2. Descripción del problema bajo consideración

En la síntesis de subredes de tratamiento distribuido de efluentes es necesario crear una configuración representativa de las condiciones de operación de las corrientes contaminadas y que deben ser conducidas a las unidades de tratamiento. En la Fig. 3 se presenta como base del enfoque para una subred, una superestructura conteniendo una unidad de tratamiento interrelacionada con mezcladores, divisores y sin reciclo de corrientes efluentes al mezclador inicial. Las corrientes efluentes que requieren ser tratadas son mezcladas en el nodo M1 y enviadas a la unidad de tratamiento UT. Las corrientes tratadas o no, convergen en el nodo mezclador M2 en donde se debe satisfacer la concentración final $c_{j,e}^U$ de al menos un contaminante j . Toda corriente efluente alimentada a la superestructura de una subred tiene la posibilidad de participar de manera total, parcial o desviarse del tratamiento de efluentes.

El problema de tratamiento de efluentes puede ser enunciado de la siguiente manera: Dado un conjunto de corrientes efluentes $I = \{i : i = 1, 2, \dots, n\}$, donde n es el número total de corrientes contaminantes que entran a una subred para ser tratadas; dada una corriente efluente S_i , $i \in I$, caracterizada por una concentración $C_{i,j}$, $i \in I$, $j \in J$ de

un conjunto de especies contaminantes $J = \{j : j = 1, 2, \dots, m\}$, donde m representa la cardinalidad del conjunto J . Se desea determinar el flujo mínimo de la corriente de agua que debe ingresar a una unidad de tratamiento de efluentes. Deberán ser determinados los flujos de las corrientes que participan en el proceso de tratamiento para reducir la concentración de contaminantes, y la composición de las corrientes de entrada y salida en una operación de tratamiento. La concentración de al menos uno de los contaminantes tratados, digamos el contaminante j , debe satisfacer la concentración máxima pre-especificada por regulaciones ambientales $c_{j,e}^U$ en la descarga de la superestructura y al menor costo posible.

Se formula un modelo de programación matemática para un subsistema de tratamiento de efluentes, con base en la superestructura básica de la Figura 3, y tasas de remoción constantes en las unidades, $R_j = (cin_j - cout_j) / cin_j$, $j \in J$, para cada contaminante en la operación de tratamiento. Para el diseño se ha supuesto que no hay pérdida de flujo de agua durante el proceso de tratamiento de efluentes; también son conocidas y han sido previamente caracterizadas las corrientes efluentes que entran al sistema para ser tratadas. Los valores óptimos de las variables de flujo y concentración desconocidas en la superestructura básica, determinarán el diseño de la subred de tratamiento particular.

3. Modelo de programación lineal propuesto

Modelo (R)

Índices

i = corriente efluente

j = contaminante en una corriente

e = punto de descarga

Conjuntos

$I = \{i : i \text{ es una corriente efluente}\}$
 $J = \{j : j \text{ es un contaminante}\}$

Parámetros

$C_{i,j}$ = concentración de contaminante en una corriente efluente, ppm
 $c_{j,e}^U$ = concentración máxima de contaminante permitida en el punto de descarga, ppm
 CC = coeficiente de costo de capital
 CO = coeficiente de costo de operación
 R_j = relación constante de remoción de contaminante
 S_i = flujo de la corriente efluente, t/h
 F_e = flujo efluente total $F_e = \sum_{i \in I} S_i$, t/h
 Δm_j^U = masa máxima de contaminante a remover en la unidad de tratamiento, Kg/h

Variables positivas continuas

cin_j = concentración de contaminante en la entrada de la unidad de tratamiento, ppm.
 $cout_j$ = concentración de contaminante en la salida de la unidad de tratamiento, ppm.
 $c_{j,e}$ = concentración del contaminante en el punto de descarga, ppm.
 $f_{i,e}$ = flujo de efluente desviado al punto de descarga, t/h.
 f_i = flujo efluente enviado a una unidad de tratamiento, t/h
 t = flujo a través de una unidad de tratamiento, t/h

Función objetivo

$$\text{minimizar } (CC + CO) t \quad (6)$$

Restricciones del modelo

Balances de agua en los divisores iniciales de la red

$$f_i + f_{i,e} = S_i \quad i \in I \quad (7)$$

Balance de agua en el mezclador que precede a la unidad de tratamiento:

$$\sum_{i \in I} f_i = t \quad (8)$$

Balance de agua en el mezclador final:

$$\sum_{i \in I} f_{i,e} + t = F_e \quad (9)$$

Balance de contaminantes:

$$\sum_{i \in I} f_{i,e} C_{i,j} + (1 - R_j) \sum_{i \in I} f_i C_{i,j} = F_e c_{j,e}^U \quad j \in J \quad (10)$$

COTAS

$$0 \leq f_i, f_{i,e} \leq S_i \quad i \in I \quad (11)$$

$$0 \leq t \leq F_e \quad (12)$$

De acuerdo con (6), el Modelo (R) considera la proporcionalidad de los costos de capital y de operación con el flujo de agua a tratar (p.e. McLaughlin y col., 1992). Otras consideraciones incluyen las siguientes.

1. Una cota superior para la concentración del contaminante j en la entrada de la unidad de tratamiento, cin_j^U , puede ser establecida a través de la siguiente desigualdad lineal,

$$\sum_{i \in I} f_i C_{i,j} - t cin_j^U \leq 0 \quad (13)$$

2. Una cota inferior para la carga másica de contaminante j a remover en la unidad de tratamiento, Δm_j^L , puede ser establecida a través de la siguiente desigualdad lineal:

$$10^3 \Delta m_j^L - R_j \sum_{i \in I} f_i C_{i,j} \leq 0 \quad (14)$$

3. Una obligación de bajar la concentración del contaminante j en la salida de la unidad de tratamiento, debajo de una concentración $c_{out_j}^U$, se puede establecer con la desigualdad lineal:

$$(1 - R_j) \sum_{i \in I} f_i C_{i,j} - t c_{out_j}^U \leq 0 \quad (15)$$

$j \in J$

4. El Modelo (R) permite resolver de manera óptima global, simultánea y automática los pasos de determinación de flujo mínimo de agua a tratamiento y diseño de subred de tratamiento de efluentes sin reciclo.

5. El Modelo (R) hace evidente que, independientemente del número de contaminantes o corrientes efluentes involucrados, el problema que se aborda puede ser resuelto con técnicas de programación lineal.

En este trabajo, la optimización del Modelo (R) se realiza con un código de programación implementado en el sistema GAMS (1998), utilizando el resolutor GAMS/OSL (1997).

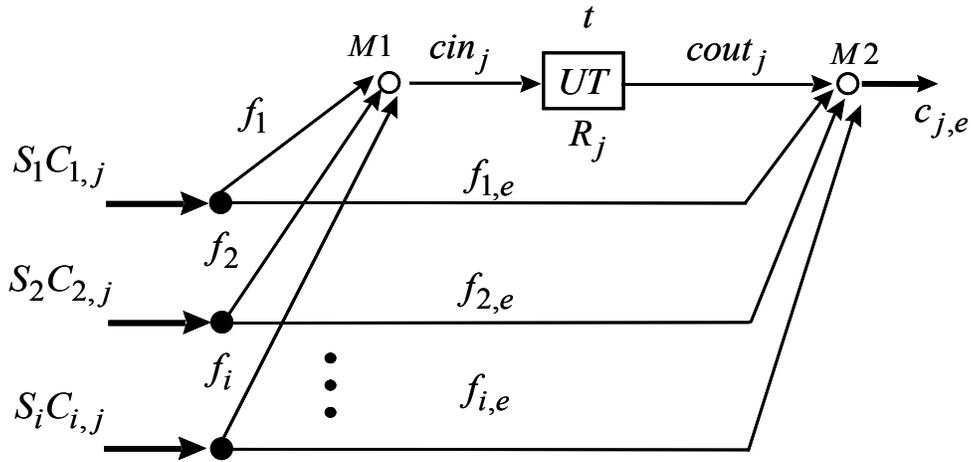


Fig. 3. Superestructura básica para diseño de una subred de tratamiento de efluentes.

4. Ejemplos ilustrativos

Ejemplo 1

Se busca diseñar un sistema de tratamiento de efluentes que está constituido por los contaminantes A, B y C. La Tabla 1 muestra la concentración de los tres

contaminantes y los flujos de cinco corrientes de efluentes. Las relaciones de remoción por diseño para la única operación de tratamiento disponible, son suministradas en la Tabla 2.

La concentración límite en la descarga para los contaminantes A, B y C son 60, 50 y 70 ppm, respectivamente.

Tabla 1. Datos de las corrientes efluentes para el ejemplo 1.

Corriente No.	Flujo (t/h)	Contaminante		
		A (ppm)	B (ppm)	C (ppm)
1	10	930	300	400
2	38	350	0	150
3	25	200	700	350
4	12	0	350	300
5	30	700	150	900

Tabla 2. Datos del proceso de tratamiento para el ejemplo 1.

Proceso	Relación de remoción de contaminantes (%)		
	A	B	C
UT	95	85	90

Para el contaminante C se ha impuesto, por bases de diseño, el satisfacer una concentración fija de 45 ppm a la salida de la unidad de tratamiento. Para el contaminante A, se restringe su concentración de entrada a la operación de tratamiento, a lo más a 430 ppm. El proceso de remoción exige que el flujo de la corriente 4 sea al menos un tercio del flujo de la corriente 3 en la corriente de mezclado que entra a la unidad de tratamiento. Los costos están en función del flujo t (t/h) de efluente enviado a tratamiento. El costo de capital (\$) se ha determinado en $10,300t$ y el costo de operación (\$/h) está expresado como $0.0022t$. Se ha considerado una tasa anual de retorno de 10% y un factor de servicio de

0.95 para la operación de la planta (aprox. 8322 h anuales). Se desea diseñar una red de tratamiento de efluentes que satisfaga todas las restricciones de diseño con un costo total anual mínimo.

La optimización del Modelo (R) da por resultado un costo total mínimo de 107.011 (M\$/año). El costo de capital asciende a 105.143 (M\$/año), mientras que el costo de operación se determinó en 1.868 (M\$). El flujo de efluente asociado a tratar a través del proceso es de 102.081 t/h. En la Fig. 4 se muestra el diseño óptimo de la red de tratamiento. Se puede observar que las corrientes 1 y 3 son totalmente tratadas, mientras que las corrientes 2, 4 y 5 son tratadas parcialmente para satisfacer las restricciones del problema.

Las restricciones de la relación de flujo entre las corrientes 3 y 4, la concentración máxima de entrada en la operación de tratamiento del contaminante A y la concentración fija de salida para el contaminante C en la unidad de tratamiento son satisfechas de la siguiente manera: El flujo de la corriente 4 corresponde al 44.5% de la corriente 3, se solicitó una relación de flujo de al menos un tercio.

Las concentraciones de entrada a la operación de tratamiento son 430 ppm, 281 ppm y 450 ppm para los contaminantes A, B y C respectivamente; para el contaminante A se satisface la concentración máxima de entrada a la unidad en 430 ppm. Las concentraciones de salida del proceso de tratamiento son 21.5 ppm, 42.1 ppm y 45 ppm para los contaminantes A, B y C respectivamente; se satisface en el diseño la concentración de salida requerida en 45 ppm para el contaminante C. Finalmente, la concentración límite para los contaminantes en la descarga del sistema son satisfechas con los valores de 60 ppm, 41.9 ppm y 67 ppm para los contaminantes A, B y C respectivamente. Se observa que el contaminante A está en su concentración límite requerida de 60 ppm.

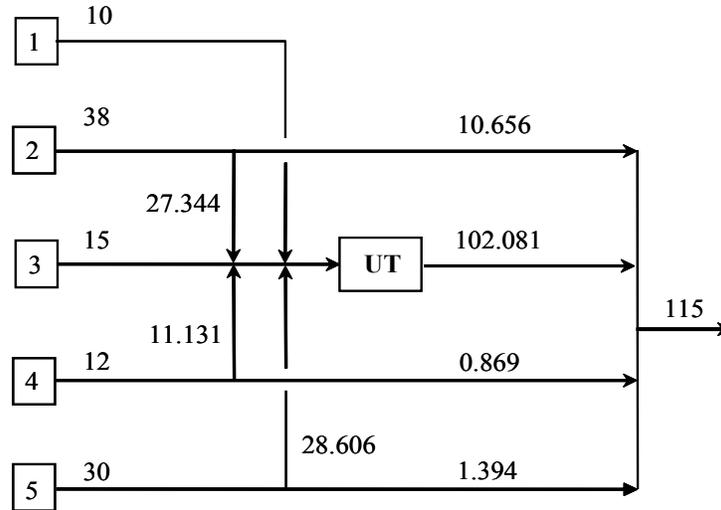


Fig. 4. Diseño óptimo de la red de tratamiento de efluentes para el ejemplo 1.

Ejemplo 2 (Kuo y Smith, 1997)

Este problema trata del diseño de un sistema con tres corrientes de agua conteniendo a los contaminantes A, B, y C en diferentes niveles de concentración. Los flujos de las corrientes y concentraciones iniciales de los contaminantes se muestran en la Tabla 3. La concentración máxima permitida en la corriente efluente de descarga es de 100 ppm para cada contaminante.

Tabla 3. Datos de las corrientes efluentes para el ejemplo 2.

Corriente No	Flujo (t/h)	Contaminante		
		A (ppm)	B (ppm)	C (ppm)
1	20	600	500	500
2	15	400	200	100
3	5	200	1000	200

Cada uno de los tres procesos de tratamiento de efluentes I, II y III pueden remover solamente un contaminante, conforme a las tasas de remoción proporcionadas en la Tabla 4. Se desea

diseñar un sistema de tratamiento de efluentes que pueda satisfacer las concentraciones ambientales de los contaminantes con el mínimo flujo total de agua a tratar. Los costos del tratamiento se consideran proporcionales a los flujos de agua tratados.

Tabla 4. Datos de los procesos de tratamiento para el ejemplo 2.

Proceso No	Relación de remoción de contaminantes (%)		
	A	B	C
I	90	0	0
II	0	99	0
III	0	0	80

Para llevar a cabo el diseño y determinar el flujo total de efluentes a tratar en el sistema, una configuración de red es producida y desarrollada en tres etapas. La aplicación del Modelo (R) en cada etapa permitirá resolver de manera simultánea los pasos de determinación de flujo mínimo de fuente a tratar en cada unidad y el diseño de las subredes correspondientes.

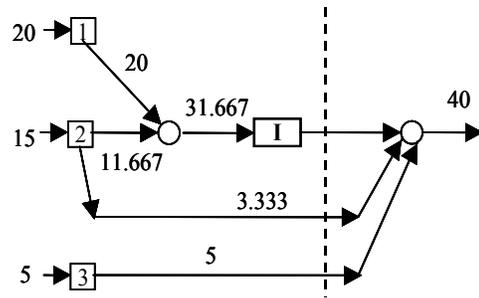
Para la etapa inicial se formulan y resuelven tres problemas de programación lineal. Las soluciones de estos problemas dan por resultado las tres subredes de tratamiento mostradas en la Fig. 5 para reducir las concentraciones de los contaminantes A, B y C a sus respectivos límites ambientales. Los flujos óptimos de efluente en las subredes obtenidas son de 31.667 t/h, 23.283 t/h y 23.125 t/h, para la remoción de los contaminantes A, B y C, respectivamente.

En esta etapa de diseño debe seleccionarse una de las subredes mostradas en la Fig. 5. De acuerdo con la propuesta de Kuo y Smith (1997), la subred a seleccionar será aquella que produzca el menor cambio porcentual de exergía en el nodo de mezclado que antecede a la unidad de tratamiento. En este caso, la subred para la eliminación del contaminante C, Fig. 5(iii), produce las menores pérdidas de exergía debido al mezclado de corrientes. Por lo tanto, dicha subred es seleccionada, hasta la parte de las líneas punteadas antes del mezclador final, para integrar la primera etapa en el diseño de red global que se desarrolla, dejando pendiente la remoción de los contaminantes A y B.

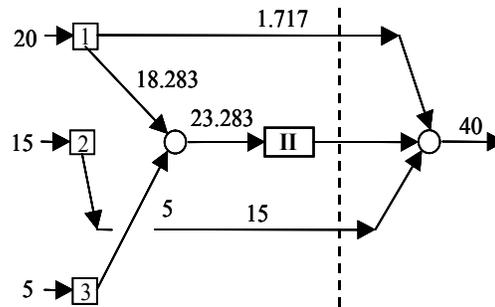
En la segunda etapa de diseño se utiliza nuevamente el Modelo (R) en la generación de subredes de tratamiento para la eliminación de los dos contaminantes remanentes, tomando como corrientes efluentes de llegada a aquellas que emergen de la subred previamente seleccionada, con flujos de 23.125, 15 y 1.875 t/h, para las corrientes 1, 2 y 3, respectivamente.

Por lo tanto, en esta etapa se resuelven dos problemas de programación lineal que optimizan las superestructuras básicas con las unidades de tratamiento I y II. En la Fig. 6 se muestran los diseños de las dos subredes obtenidas para la eliminación de los contaminantes A y B. En este caso, la subred de tratamiento para el contaminante B, con un flujo de efluente a tratar de 23.487 t/h,

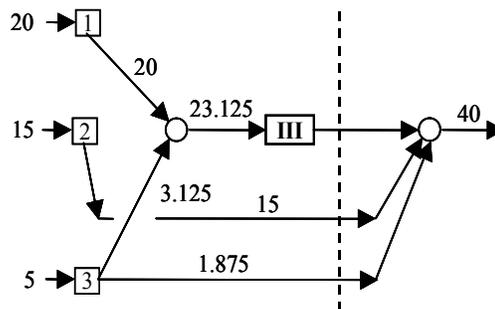
exhibe menores pérdidas de energía debido al mezclado de corrientes que la subred obtenida para el contaminante A. Por lo tanto, la subred de la Fig. 6(ii) es seleccionada en la segunda etapa de diseño, quedando solamente pendiente la remoción del contaminante A.



(i) Subred para el contaminante A

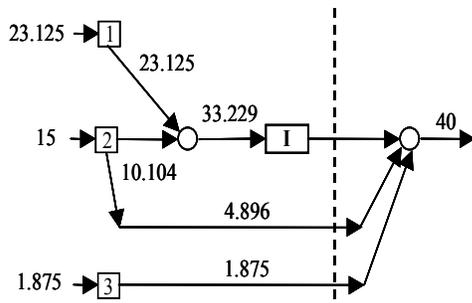


(ii) Subred para el contaminante B

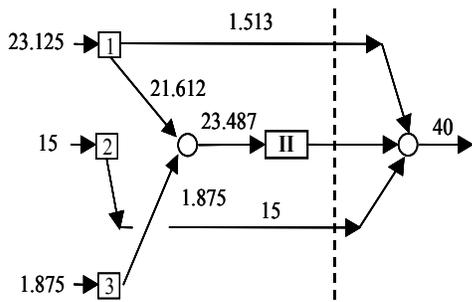


(iii) Subred para el contaminante C

Fig. 5. Subredes de tratamiento obtenidas en la etapa de diseño del ejemplo 2.



(i) Subred para el contaminante A



(ii) Subred para el contaminante B

Fig. 6. Diseños de subredes obtenidas en la segunda etapa de diseño para el ejemplo 2.

La etapa final de diseño toma como corrientes efluentes de llegada a las corrientes que emergen de la subred de tratamiento para el contaminante B, Fig. 6(ii), con flujos de 1.513, 23.487 y 15 t/h, respectivamente. Tras la optimización de la superestructura básica con la unidad I, se obtiene finalmente la última subred del diseño global, mismo que se muestra en la Fig. 7.

El flujo total de agua a tratamiento es de 80.737 t/h. Para la solución de este problema se requirió la solución de 6 problemas de programación lineal; el método de punto de pliegue requiere de la elaboración separada de seis curvas compuestas y la generación gráfica de las seis subredes de tratamiento asociadas (Kuo and Smith, 1997).

4.1 Regiones de diseño para la secuenciación de las plantas de tratamiento

El modelo de programación lineal propuesto para la síntesis de subredes de tratamiento, puede ser utilizado de manera muy versátil para el desarrollo de redes de tratamiento distribuido bajo diferentes escenarios de interés a través de un análisis de sensibilidad. Por ejemplo, es posible estudiar de manera sistemática el efecto que tienen sobre el diseño final de la red diferentes valores para la concentración ambiental límite de los contaminantes. Esto se ilustra con la Fig. 8, la cual fue desarrollada como una extensión del Ejemplo 2 en función de diferentes valores de las concentraciones ambientales límite de los contaminantes. Dicha figura permite identificar en este caso tres regiones de diseño, en donde la topología óptima de la red de tratamiento depende fuertemente de los valores de las concentraciones límite.

Los resultados de la Fig. 8 muestran, por ejemplo, que para una concentración máxima permitida de contaminantes en la descarga por debajo de 60.5 ppm, el diseño óptimo de la red de tratamiento debe exhibir una secuencia de plantas de tratamiento II-I-III. Para una concentración máxima permitida entre 69.5 y 98 ppm, la secuencia óptima de tratamiento cambia a II-III-I. Finalmente, para valores de las concentraciones límite por arriba de 98 ppm, la mejor topología de red presenta un arreglo III-II-I. Este caso corresponde precisamente al caso base manejado en el Ejemplo 2, con una concentración límite en la descarga de 100 ppm para los tres contaminantes involucrados. un cambio en la pendiente de las curvas en la Fig. 8, indica un cambio en la población de corrientes efluentes que entran a tratamiento.

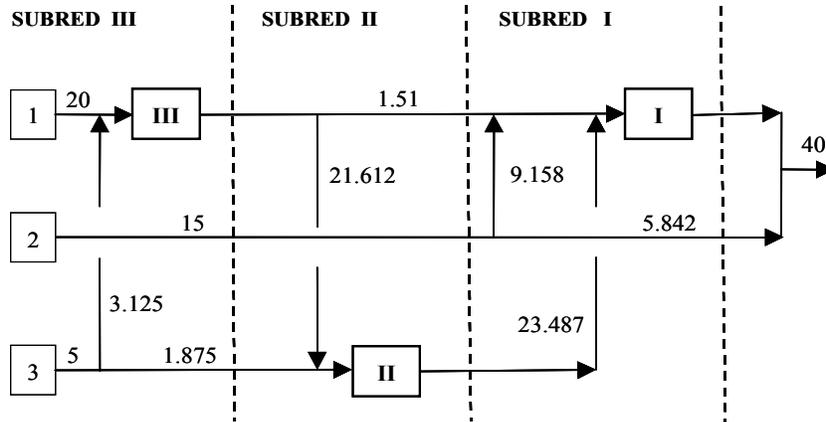


Fig. 7. Diseño final de la red de tratamiento de efluente (similar a Kuo y Smith, 1997).

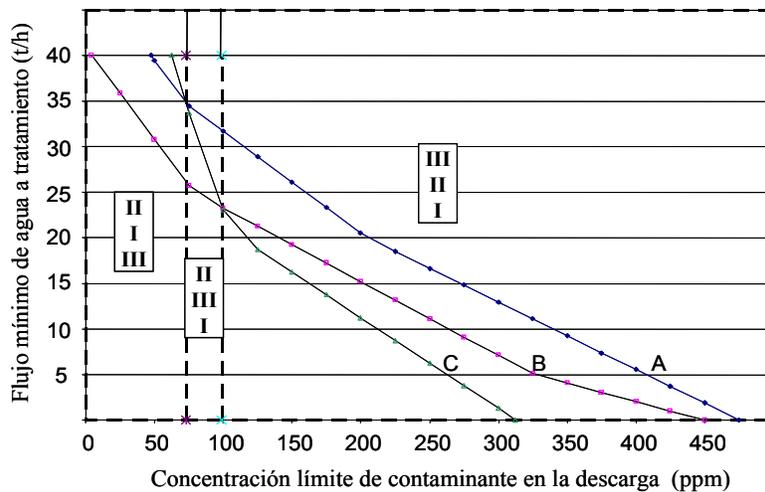


Fig. 8. Regiones de diseño para la secuenciación de plantas de tratamiento en el ejemplo 2.

Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un modelo de programación lineal para el diseño óptimo de subredes de tratamiento de efluentes, que permite resolver de manera sistemática y simultánea los pasos de determinación de metas de flujo mínimo de agua a tratamiento y de diseño de una subred de tratamiento, dentro del contexto de la metodología de punto pliegue para el diseño de redes distribuidas de tratamiento de efluentes.

El modelo desarrollado permite resolver de manera sencilla problemas multi-contaminante, e incorpora de manera

bastante directa varias restricciones de diseño que no son tan fáciles de manejar con los métodos gráficos de la metodología de punto de pliegue. Entre estas restricciones se incluyen, por ejemplo, relaciones máximas o mínimas de mezclado, una concentración máxima o mínima de contaminante en la entrada de las plantas de tratamiento, una carga másica máxima o mínima de contaminante a remover en las plantas de tratamiento, o bien volúmenes máximos o mínimos de la corriente efluente a tratamiento. Adicionalmente, y tal vez de mas relevancia, el modelo matemático desarrollado pone en evidencia que, bajo las

suposiciones más usuales de diseño, el problema de desarrollo de una subred de tratamiento de efluentes que incluye una unidad de tratamiento sin reciclos, puede ser resuelto de manera rigurosa a través de la solución de un solo programa lineal, esto sin importar el número de corrientes efluentes o contaminantes presentes en el problema. La versatilidad del modelo propuesto también se ha ilustrado con un estudio de sensibilidad paramétrica realizado bajo diferentes escenarios de valores de las concentraciones ambientales límite de los contaminantes. Dicho estudio ha permitido identificar regiones de diseño donde se presentan diferentes topologías óptimas para la red de tratamiento distribuido, en función de los valores de las concentraciones ambientales límite de los contaminantes.

En este trabajo se explotan las características del modelo de programación lineal propuesto. Sin embargo, a expensas de generalizar el modelo matemático usado a un modelo de programación no lineal, el enfoque propuesto para el cálculo del objetivo de flujo mínimo de efluente a tratamiento y diseño de subred se pueden extender para considerar la minimización de funciones de costo no lineales y la derivación de subestructuras de red que incluyan corrientes de reciclaje.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el soporte financiero y las facilidades otorgadas en el desarrollo de este trabajo por el Instituto Mexicano del Petróleo, a través del proyecto de investigación FIES 98-85-II.

Referencias

- Eckenfelder, Jr. W. W., Patoczka, J. y Watkin, A.T. (1985). Wastewater treatment, *Chemical Engineering* 92, 60-74.
- GAMS (1998). *General Algebraic Modelling System*. GAMS Washington. DC. EUA.

- GAMS/OSL (1997). *General Algebraic Modelling System, High Performance LP/MIP Solver From IBM GAMS*. Washington. DC. EUA.
- Higgins, T. E. (1989). *Hazardous Waste Minimization Handbook*. Lewis Publishers Inc. Boca Raton, Florida. USA.
- Kuo, W. C. J. y Smith, R. (1997). Effluent Treatment System Design, *Chemical Engineering Science* 52, 4273-4290.
- Lankford, P.W., Eckenfelder, W.W. Jr. y Torrens, K.D. (1988). Reducing wastewater toxicity, *Chemical Engineering* 95, 72-81.
- Linnhoff, B. (1993). Pinch Analysis-A State of the Art Overview. *Transactions IChemE* 71, Part A, 503-521.
- Mc Laughlin, L. A. y Mc Laughlin, H. J. (1992). Develop an effective wastewater treatment strategy. *Chemical Engineering Progress* Sept, 34-42,
- Wang, Y. P. y Smith, R. (1994). Design of distributed effluent treatment systems, *Chemical Engineering Science* 49, 3127-3145.