

# Aplicación para Formular y Resolver Modelos Matemáticos de Sistemas de Evaporación Multiefecto

**Jaime A. Irahola**

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy,  
Gorriti 237, (4600) S. S. de Jujuy-Argentina (e-mail: irahola@arnet.com.ar)

---

## Resumen

Se presenta una aplicación para formular y resolver modelos matemáticos de sistemas de evaporación multiefecto. La aplicación permite que cualquier usuario, sin ser un experto en optimización, simulación e ingeniería química pueda simular, optimizar, hacer re-ingeniería o sintetizar un sistema de evaporación multiefecto. La información del problema se ingresa por medio de tablas o "flowsheet" y la aplicación formula el modelo y lo resuelve usando un optimizador comercial. En el modelo matemático se considera el número de los efectos, el condensador y un calentador/enfriador del producto final. Además, el uso del software elimina la necesidad de verificar el modelo, permite modelar de manera rápida y confiable, disminuyendo considerablemente el tiempo total de análisis desde la especificación del modelo hasta obtener el resultado óptimo.

*Palabras clave: evaporación multiefecto, modelado, simulación, optimización, software*

## Application to Formulate and to Solve Mathematical Models of Multieffect Evaporation Systems

### Abstract

An application to formulate and to solve mathematical models of multieffect evaporation systems is presented. The application allows that any user, without being an expert in optimization, simulation and chemical engineering can simulate, optimize, make re-engineering or synthesize a multieffect evaporation system. The information of the problem is entered by means of tables or flowsheet and the application formulates the model and it solves it using a commercial optimizer. In the mathematical model the number of effects, the condenser and a heater/cooler for the final product, are considered. In addition, the use of software eliminates the necessity of verifying the model, it allows to model in a fast and reliable way, considerably reducing the time consumed in the analysis from the specification of the model until the optimal result is obtained.

*Keywords: multieffect evaporation, modelling, simulation, optimization, software*

## INTRODUCCIÓN

Sabido es que los sistemas de evaporación son grandes consumidores de energía. Eso motivó que se investigara la forma de realizar la operación de manera más económica. Entre diversas alternativas que se estudiaron, se encontró que la evaporación multiefecto es una importante opción. De hecho, se observa esta disposición en numerosas plantas de evaporación, como ser en la concentración de licor de caña de azúcar, de jugos de frutas, de licor negro, de leche, etc.

Si bien es cierto, el diseño de evaporadores es una ciencia bien conocida en base a "handbooks" y libros, también es, que esta operación ha sido estudiada sólo desde el punto de vista de análisis, operación, simulación (Ugrin y Urbicain, 1999) integración energética (Grendi y Romero, 2001). En cambio, en escasas oportunidades se ha enfocado el problema de evaporación desde el punto de vista de síntesis del proceso (Westerberg y Hillebrand Jr., 1988). Tradicionalmente, por lo antes citado, estaba totalmente establecida la forma de cálculo del área de transferencia calórica, el método de alimentación (cocorriente, contra corriente o mixto), la circulación natural o forzada, la longitud de los tubos, etc. Las características del líquido a ser procesado y del producto deseado, determinaban el tipo de evaporador que se requería. La economía se consideraba función del número de efectos, de las etapas de "flasheo", de los materiales de construcción, del diseño del condensador y del tipo de energía utilizada.

Si se centra la atención sólo en el sistema de evaporación y se supone que el tipo de evaporador ya ha sido elegido, restan algunas variables que pueden considerarse con el fin de hacer un nuevo diseño óptimo o simplemente la reingeniería del actual Sistema de Evaporación Multiefecto (SIEME). Éstas son: área de los efectos, condiciones de operación, número de efectos, tipo de alimentación y fuente de vapor a usar (alta, media o baja presión). Antiguamente, el número de efectos y el método de alimentación fueron determinados de acuerdo a la experiencia práctica y se adoptaron estándares implícitos para distintas industrias. En este trabajo se presenta una aplicación capaz de formular el modelo matemático basándose en instrucciones dadas por el usuario ya sea

por medio de cuadros de edición o tablas, y/o gráficos representativos del "flowsheet" de la planta real. Luego se transcribe la información y el modelo al formato de un optimizador comercial (GAMS-Minos. Brooke et al. 1992). Se resuelve el problema con el optimizador y los resultados pueden observarse en forma gráfica o por medio de un listado. El resultado es un óptimo local que puede ser mejorado sucesivamente, hasta llegar a un óptimo cuasi-global, esto debido a que el problema es no-lineal (NLP) no-convexo y que el software existente (a nivel internacional) aun no tiene la capacidad para resolver este tipo de problemas y encontrar directamente el óptimo global.

El software desarrollado se ha denominado: SEXSE (Sistema EXperto para Sistemas de Evaporación Multiefecto). El mismo pretende ser un centro que permita simular, u optimizar en forma total o parcial problemas de SIEMEs. Las metodologías que se quiere comandar son algoritmos genéticos, sistemas expertos y modelos matemáticos rigurosos de optimización. Se desea que las metodologías mencionadas trabajen de forma conjunta para enfrentar con mayor éxito los serios problemas de convergencia, robustez y velocidad que se enfrentan en este momento con el software actual. En esta oportunidad, SEXSE aborda la resolución usando un optimizador matemático.

## NUEVO ENFOQUE EN EL DISEÑO ÓPTIMO DE UN SIEME

Como se mencionó antes, la manera clásica para el diseño óptimo de un SIEME ha sido, de alguna manera, heurística, es decir: se tienen patrones ampliamente aceptados en diversas industrias y se los ha adoptado como los mejores. Por ejemplo, en el área azucarera se tienen plantas con 5 o 6 efectos en cocorriente (Hugot, 1972); para la concentración de hidróxido de sodio se aconseja 3 efectos en contra corriente (Geankoplis, 1983), etc. La elección del número de efectos y el método de alimentación se obtenían de acuerdo a la experiencia en planta y/o en plantas piloto y a veces, en base a algunos estudios de optimización (muchas veces suponían fuertes hipótesis simplificadoras). El sistema de "flowsheeting" que aquí se presenta supera las hipótesis citadas. Así, éste realiza la síntesis óptima de un SIEME considerando como variables a optimizar el área de

cada efecto, la trayectoria de las corrientes de líquido y de vapor, "bypassing" de los efectos por ambas corrientes, el número de efectos. También tiene en cuenta la funcionalidad de: el incremento del punto de ebullición (BPE), la entalpía de la solución (h), y el coeficiente global de transferencia calórica de cada efecto (U). Todo ello permite la formulación de un modelo matemático mixto entero-no-lineal riguroso, altamente representativo de la realidad.

El método de resolución del modelo matemático, permite que se pueda: (i) Simular un SIEME: Simplemente no se tomará en cuenta el valor de la función objetivo, y se fijarán las variables correspondientes para que SEXSE funcione como un simulador en modo diseño o en modo análisis. (ii) Hacer Reingeniería óptima de un SIEME, es decir realizar una optimización parcial. Esto es importante cuando se quiere optimizar una planta ya instalada. En esa situación, sólo se pueden optimizar algunas variables ya que otras deben permanecer constantes, como ser: los efectos (área de los efectos), las condiciones de los servicios de calefacción y/o enfriamiento, etc. (iii) Realizar la síntesis óptima de un nuevo SIEME (Irahola y Cerdá, 1994) en cuyo caso la función objetivo puede ser, por ejemplo: el costo total del sistema. Así, dadas las condiciones de entrada y salida y las, temperaturas de los servicios de calefacción y enfriamiento, las variables a optimizar son: número, áreas y temperaturas de operación de los efectos. Trayectorias de las corrientes de vapor y de las corrientes de líquido (cada efecto puede interconectarse con dos o mas efectos, sean las corrientes de vapor o de líquido), ingreso de la corriente de vapor vivo de calefacción a uno o mas efectos, la corriente de alimentación puede ingresar a uno o más efectos, el producto puede salir de uno o más efectos.

### ENTORNO DESARROLLADO

Normalmente, el potencial usuario del modelo matemático desarrollado, debería tener conocimiento de cómo ha sido modelado el problema y del lenguaje del optimizador (esto implica un alto grado de especialización). Una vez que el usuario ha conseguido esto, está en condiciones de resolver cualquier problema de un SIEME. Pero, como el software no permite alcanzar el óptimo global en la primer corrida, (podría ocurrir que el

problema ni siquiera converja), se debe realizar varias corridas del resolvidor. Recuérdese, que se está utilizando métodos numéricos y por consiguiente se debe inicializar las variables. A pesar que éstas se inicializan por "default", generalmente el usuario debe proporcionar y probar *numerosos puntos* iniciales para alcanzar los resultados deseados. También, podría ser necesario que se cambien algunos parámetros propios del resolvidor, como ser tolerancia en las iteraciones mayores y menores, numero de iteraciones mayores y menores, etc. Sin embargo, lo dicho no es todo. Cuando se investiga sobre SIEMEs, se debe cambiar continuamente variables y parámetros tanto en su definición como en su valor. Por ejemplo, si desea optimizar un SIEME que tenga estructura fija algunas variables pasan a ser parámetros y ello debe modificarse en varios lugares del modelo matemático. En síntesis, el hacer este tipo de operaciones repetidamente, es tedioso y se convierte en una potencial fuente de errores de sintaxis y de formulación del modelo. Por ello, se debe controlar el modelo en cada operación antes citada. Más aún, también se debe controlar la lógica de los resultados, pues podría ocurrir que sean el resultado de de un modelo erróneo. Con la aplicación propuesta se eliminan los errores humanos que podrían ocurrir debido a las operaciones antes mencionadas.

Es interesante considerar cual es el tiempo que se demora en cambiar variables o parámetros o intercambiar estos. Sea un modelo matemático (pequeño) de una página de extensión (por ejemplo: 50 líneas de código). Cada vez que se produce un cambio en una parte del modelo se debe controlar si en consecuencia, no se debe cambiar también otra parte del mismo, por tanto, se debe revisar algunas o todas las líneas de código. En cambio, con SEXSE, el usuario solo debe marcar algunas casillas con el "mouse", enfocando su atención en los cambios que desea hacer y despreocuparse de consideraciones intrínsecas del modelo y del lenguaje del optimizador. Ello, obviamente, significa un ahorro considerable de esfuerzo y de tiempo. Según la experiencia del autor, se estima un ahorro de tiempo de más del 50 %.

SEXSE permite realizar el modelado o cambios en el modelo ya ingresado de

manera rápida y segura. El usuario ahora no necesita conocer en profundidad: el modelo matemático ni el lenguaje del resolutor, ni siquiera de ingeniería química. Se limita simplemente a formular el problema que quiere resolver de manera simple, marcando en tablas o copiando el "flowsheet" de su planta a la computadora, donde se observará el gráfico equivalente en el monitor. No sólo el ingreso de datos es simple, también lo es la observación de resultados. Ahora, el usuario no debe sacar la información del resultado de la corrida y armar dato a dato el gráfico del SIEME, sino que la obtiene en forma automática en pantalla. En consecuencia, tanto, el principiante como el experto se beneficiarán con el entorno gráfico desarrollado. El experto en el tema de evaporación y optimización verá ampliamente simplificado el ingreso de datos, parámetros y variables, la *reformulación del modelo* y el análisis de resultados. El principiante, aun sin tener conocimiento específico del tema será conducido a través de sucesivas pantallas hasta formular completamente el problema, resolverlo y observar los resultados.

**DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO**

Inicialmente, se abre el programa con el título del mismo. En esa pantalla se tiene la opción de ver una "Demo", donde se muestra el ingreso de datos, la resolución del problema y la forma de ver los resultados. Otra opción explica brevemente lo referente a SIEMEs. En la ventana siguiente, se observa las opciones del sistema experto en cuanto a los diversos

problemas que se podrían resolver, simulación, optimización, síntesis óptima y reingeniería óptima (A esas opciones se sumarán dos metodologías que se irán agregando paulatinamente: redes neuronales y algoritmos genéticos). En la pantalla que sigue el usuario puede elegir cualquiera de los títulos según el problema que quiera resolver. Por ejemplo, si elige reingeniería, se despliega una lista de opciones: *automático*, *"Flowsheet"* y *normal*. Si elige *automático*, se presentaran una serie de pantallas en las cuales el usuario debe llenar los cuadros de edición, luego que la pantalla en uso es completada, aparece una nueva, y así sucesivamente, hasta resolver el problema. Las opciones restantes requieren ciertos conocimientos del usuario. Si elige *"flowsheet"*, podrá introducir los datos en forma gráfica. Y por último, con la opción *"normal"* el usuario podrá moverse libremente por todos los comandos de SEXSE.

**INGRESO DE DATOS**

*Ingreso de Datos por Planilla:*

En la figura 1, se presenta la planilla principal, que se debe llenar de manera ordenada de arriba hacia abajo. Inicialmente, se debe elegir la sustancia que se desea concentrar y el número de efectos del SIEME. (Cabe señalar, que la optimización del número de efectos, se puede realizar, ya sea por etapas o de una sola vez, En este último caso, se introduce un número alto de efectos y SEXSE hallará el número óptimo anulando aquellos efectos que estén en exceso).

Ingreso de datos para el problema de Reingeniería Óptima								
Asistente	Costos	Propiedades	Estructura	Áreas del SIEME	Resolución	Reset	Ventanas	Fin
Sustancia: <input type="text" value="Licor de Caña de azúcar"/>						Inicio Costos y Propiedades Ruta de Alimentación Servicio de calefacción Ruta de Ctes de Vapor Ruta de Ctes de líquido Áreas de los efectos Resolución Flowsheet		
Núm. de efectos: <input type="text" value="6"/>								
Función Objetivo a Optimizar: <input type="text" value="Minimiza Costo total"/>								
Características del Modelo								
Servicio de Vapor	Agua de Enfriamiento	Alimentación	Producto	Condiciones Críticas de la disolución				
Temperatura °F <input type="text" value="250"/>	Temp. Inicial °F <input type="text" value="90"/>	X(masa/masa) <input type="text" value="0.1"/>	X(masa/masa) <input type="text" value="0.5"/>	Temp. Mín. °F <input type="text" value="125"/>				
Presión (Atm) <input type="text"/>	Temp. Final °F <input type="text" value="108"/>	Caudal (10 <sup>3</sup> lb) <input type="text" value="50"/>	Caudal (10 <sup>3</sup> lb) <input type="text" value="10"/>	Temp. Max. °F <input type="text" value="232"/>				
		Temperatura °F <input type="text" value="180"/>	Temperatura °F <input type="text" value="130"/>					

Fig. 1: Planilla principal del entorno.

Una vez cumplimentada esta información (sustancia y número de efectos), el sistema automáticamente, llena el resto de casilleros: toda la información para correr la aplicación. Estos datos pueden ser reformados por el usuario de acuerdo al problema que quiera resolver. También, en esta planilla se introduce la función objetivo que se desea optimizar. Se despliega un cuadro de opciones: Minimizar costo total, minimizar costo de equipos, minimizar costo operativo. Los parámetros del optimizador están prefijados, pero el usuario podría cambiarlos.

Respecto a la información que debe introducir, se puede citar: (i) caudales y concentración de las corrientes de solución débil y fuerte, (ii) condiciones del agua de enfriamiento y del vapor de servicio. En la figura 2 se muestra como el usuario puede introducir: (a) los costos de servicios y equipos o adoptar los sugeridos, (b) funciones: del incremento del punto de ebullición, de la entalpía de la solución y del coeficiente global de transferencia calórica, para cada uno de los equipos.

*Ingreso de Datos por "Flowsheet" en Pantalla.*

Una vez que se ha elegido ingreso de datos por "flowsheet" se obliga al usuario a introducir la sustancia que desea concentrar y el número de efectos del SIEME. Hecho esto, aparece una pantalla que muestra los efectos elegidos, la fuente de alimentación de licor

débil, el tanque de producto final, el servicio de vapor de calefacción, y el condensador barométrico multijet. Seguidamente el usuario deberá interconectar los equipos, de acuerdo a la planta real. Para ello, deberá señalar el equipo que desea conectar a otro. Hecho esto, aparece una lista lógica de todos los equipos a los que se puede conectar. Realizada la elección, SEXSE traza las corrientes.

*Ingreso de Información Respecto a las Áreas de los Efectos.*

Las áreas de los efectos pueden ser variables a determinar por el optimizador o por el contrario el usuario puede desear fijar algunas y optimizar otras. En la figura 3, se muestran todas las alternativas posibles: a) Areas óptimas, b) Areas óptimas e iguales c) Algunas áreas óptimas, d) Areas prefijadas distintas, e) Area única prefijada.

En caso que el usuario realice síntesis óptima, elegirá (a), en cambio, si realizara reingeniería óptima, elegiría (c).

*Ruta de las Corrientes de Líquido y de Vapor*

Esta es otra característica importante del modelo matemático. Sin embargo, cada vez que se va a cambiar una o más conexiones, de cada una de las corrientes que interconectan dos o más equipos, la operación es engorrosa y se cometen, frecuentemente,

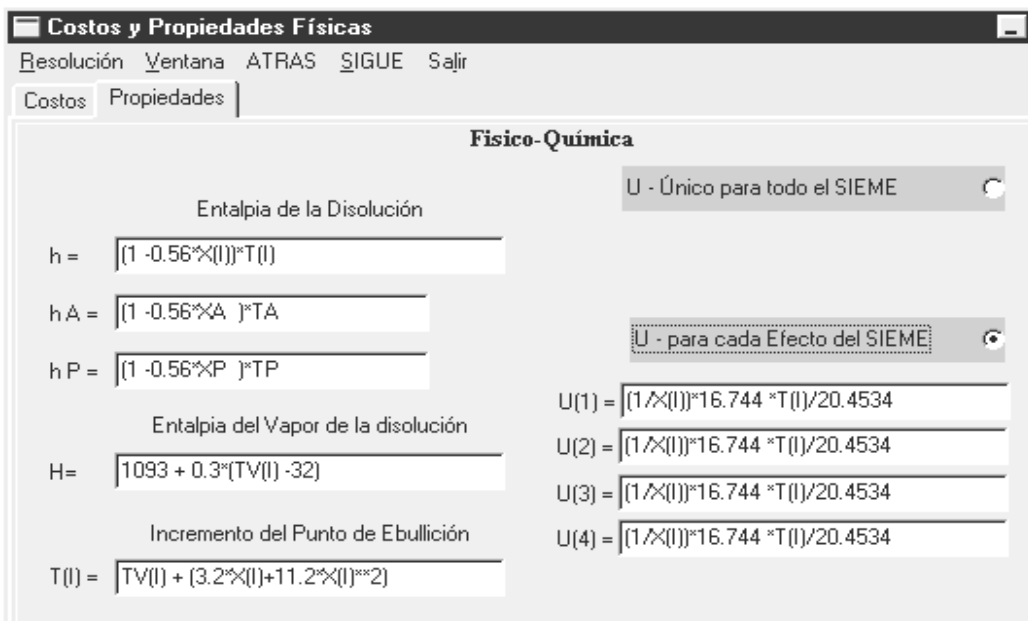


Fig. 2: Información que hace al modelo matemático, altamente representativo: realístico.

Areas de los efectos del SIEME				
Resolución	Ventanas	ATRÁS	SIGUE	Salir
<input type="radio"/> Areas Optimas <input checked="" type="radio"/> Algunas Areas Optimas <input type="radio"/> Areas Iguales		<input type="radio"/> Areas prefijadas <input type="radio"/> Area Unica Prefijada		

Fig. 3. Alternativas de las áreas de los efectos.

errores de sintaxis. Con SEXSE, estas interconexiones pueden hacerse de manera segura y rápida usando un "flowsheet" o tablas. Si se usan éstas, la conexión de las corrientes de líquido inter-efectos se consigue marcando las casillas correspondientes a los efectos de los cuales sale y a los que ingresa la corriente. En forma similar, se ingresa la conexión de las corrientes de: licor débil, vapor de calefacción, vapor inter-efectos y las corrientes que se enfrían en el condensador.

#### *Resolución del Problema y Presentación de Resultados*

La resolución se lleva a cabo corriendo el programa. Entonces, el modelo es escrito, compilado y ejecutado. Si la corrida no converge, en la misma pantalla se puede cambiar el punto inicial y volver a correr el programa. Los resultados se pueden observar en un listado o en forma gráfica. En ésta, si se elige cualquier elemento: corrientes o equipos, SEXSE muestra los valores de las variables.

#### **CONCLUSIONES**

Se ha presentado un entorno que permite realizar síntesis óptima, reingeniería óptima, y simulación de SIEMEs, formulando un modelo matemático riguroso y usando un optimizador comercial. La representatividad del modelo es tan alta como lo permiten las funciones y propiedades fisicoquímicas que el usuario introduzca. El entorno acelera notablemente el trabajo ya que se eliminan errores de sintaxis y de modelado y se observan los resultados clasificados y en forma gráfica. Esto permite un considerable ahorro de tiempo desde la especificación del modelo hasta el hallazgo del resultado óptimo. La salida de resultados por "flowsheet" es de vital

importancia para analizar los resultados de la corrida, cuando se realiza investigación y desarrollo del proceso. Por otra parte, la interfaz con el usuario: intuitiva y amigable, permite que las corridas puedan ser realizadas por un operario en una fábrica o un usuario cualquiera, que tenga un mínimo conocimiento sobre optimización y modelado matemático de SIEMEs.

#### **REFERENCIAS**

- Brooke, A., Kendrick, D. y Meeraus, A., "GAMS - A User's Guide". Release 2.25. The Scientific Press, (1992).
- Geankoplis, Ch. J., "Transport Processes and Unit Operations", 2nd. Edition, 495-501 (1983).
- Grendi, E., Romero, L. y Cisternas, L. "Integración Energética para Sistemas de evaporación". Ingeniería Química, Madrid. 33, 185-192 (2001)
- Hugot, E. "Handbook of Cane Sugar Engineering". 2nd Edition. (1972).
- Irahola Ferreira, Jaime A. y Jaime Cerdá. "Optimal Synthesis of a Multiple-Effect Evaporator System. Fifth International Symposium on Process Systems Engineering" (PSE) Kyongju - Korea (1994)
- Ugrin, E. y Urbicain, M. J. "Design and simulation of multieffect evaporators". Heat Transf. Eng. 20(4), 38-44 (1999).
- Westerberg, A. W. y Hillebrand Jr., J. B. "The Synthesis of Multiple-Effect Evaporator Systems Using Minimum Utility Insights - II. Liquid Flow-Pattern Selection". Computers & Chemical Engineering, 12, 625-636 (1988).