

# SP

SIMULACIÓN DE PROCESOS

## ALIVIO DE PRESIÓN EN COLUMNAS DE DESTILACIÓN DE CRUDO

¿Simulación dinámica o métodos convencionales?

*La estimación de los caudales de alivio de presión en la cabeza de las columnas de destilación resulta de cálculo complicado debido a la naturaleza de estas unidades, donde la composición cambia a lo largo de la columna y del tiempo. En el presente artículo se compara la aplicación del método convencional y del basado en simulación dinámica para la estimación en una unidad atmosférica de destilación de crudo.*



**J.A. Feliu  
y M.A. Alós**  
Inprocess Technology  
& Consulting Group

**LOS CONSTANTES CAMBIOS** que experimentan, tanto a nivel económico, medioambiental o tecnológico, los procesos de refino de petróleo, conllevan que las refinerías tengan que plantearse frecuentes cambios en la cantidad o en la calidad de los productos que obtienen y, por lo tanto, enfrentarse a continuos rediseños para eliminar posibles cuellos de botella. Sin embargo, cualquier cambio en el proceso productivo que implique aumentar la capacidad de producción de las unidades existentes en una refinería llevará implícita una comprobación de las limitaciones de los sistemas de alivio de presión (*relief systems*) para garantizar la seguridad de las instalaciones. De los nuevos cálculos se concluirá si aquellos son suficientes o si es necesaria su sustitución, con los consiguientes costes económicos adicionales. Por ello, una estimación precisa de los nuevos caudales que podrían acabar yendo a las válvulas de seguridad puede significar un ahorro en costes y tiempo para la unidad en la que debe incrementarse la producción.

La estimación de los dichos caudales en la cabeza de las columnas de destilación es, de lejos, el caso más complicado de este tipo de cálculos, debido a la naturaleza de estas unidades, donde la composición cambia a lo largo de la columna y del tiempo. Por ello, los métodos de cálculo tradicionales son bastante conservativos y pueden llevar a concluir que los sistemas actuales de alivio de presión no tienen la capacidad suficiente para absorber la nueva producción, sugiriendo una inversión económica y comportando una demora en tiempo, cuando en realidad, con un estudio más detallado, se podría llegar a concluir que quizás la capacidad sí era suficiente.

En los últimos años, gracias al desarrollo de los ordenadores y de los programas de simulación de procesos, la simulación dinámica se presenta como un método alternativo que permite obtener resultados más exactos. La propia API 521(1) señala la simulación dinámica como un método alternativo a los métodos convencionales para el diseño de sistemas de alivio de presión, al facilitar el cálculo de los transitorios de presión y los caudales máxicos que deben absorber las válvulas de seguridad. Las ventajas de la aplicación de la simulación dinámica que la

propia normativa API indica son un cálculo más preciso de dicho caudal (relief load) y una mejor comprensión de lo que ocurre en el proceso durante el episodio de alivio.

En el presente artículo se compara la aplicación del método convencional y el método basado en simulación dinámica para la estimación del relief load de una unidad atmosférica de destilación de crudo (CDU).

### 1. Método convencional

El método convencional más común para estimar el caudal que podría ir a las válvulas de seguridad es el presentado por Sengupta y Staats en 1978 [2]. El método se conoce como método de calor no balanceado (o acumulado), y se basa en calcular el balance de energía y el de materia en las condiciones de alivio para estimar la cantidad de energía acumulada en la unidad. El caudal de alivio resulta entonces de dividir dicha energía acumulada por el calor latente de vaporización de la fase líquida que se encuentra en el plato de cabeza de la columna.

El calor latente de vaporización de un componente se define como la diferencia de entalpía entre el vapor saturado y el líquido saturado a temperatura constante. Lo que es obvio y evidente para un componente puro no lo es tanto para una mezcla. La forma más aceptada de calcularlo, por ser la más conservativa, es considerar la diferencia en entalpía entre la fase líquida y la fase vapor en el punto de rocío de la mezcla. Este calor latente sería la energía necesaria para llegar a vaporizar la última gota de reflujo. Un método alternativo de calcular el calor latente de vaporización es considerar la diferencia entálpica entre el punto de ebullición y el punto de rocío de la mezcla. En este segundo caso, el método considera el calor sensible y da lugar a resultados mucho menos conservativos, por lo que no se considera apropiada su aplicación. En la realidad, la composición de la mezcla varía a medida que se evapora, y la velocidad de evaporación cambia en función de la composición. Por ello, aplicando la simulación dinámica se obtiene la aproximación más cercana a la realidad y el valor de alivio más preciso, evitándose a la par la discusión entre las ventajas e inconvenientes de las distintas suposiciones que se deben tomar en el método convencional.

Figura 1  
Esquema de la unidad atmosférica de crudo modelada

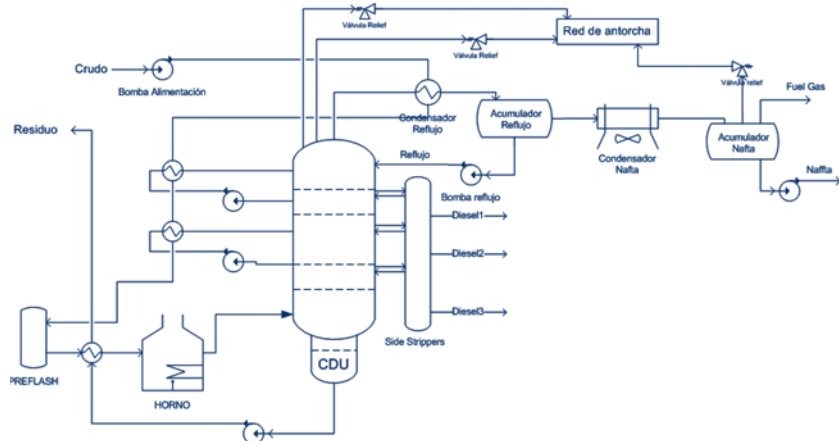


TABLA 1

#### ACCIONES EN CASO DE GPF

Todas las bombas y compresores se paran, por lo que no existen caudales de entrada ni de salida de la columna. Una bomba de emergencia accionada por la energía de una turbina de vapor se activa un minuto después del GPF y permite evacuar líquido del condensador a la columna.

Todas las válvulas quedan en posición manual a excepción de aquellas que permiten aliviar materia de la columna, que quedan en posición cerrada, por ser éste un escenario más conservativo.

Al quedar todos los caudales interrumpidos, también deja de producirse transferencia de calor en los intercambiadores, a excepción de los aerorefrigeradores (*air coolers*), para los que se recomienda mantener un valor igual al 20% de la refrigeración que había en las condiciones de proceso, debido a la convección natural del aire.

En el momento del GPF, deja de suministrarse fuel combustible al horno y éste se apaga. Sin embargo, existe un calor residual en el material refractario de las paredes del horno, que es la única fuente remanente de energía. En la aplicación del método convencional, es común considerar un 50% del calor suministrado en condiciones normales, mientras que en la aplicación del modelo dinámico se puede modelar la curva residual de calor en función del tiempo.

### 2. Simulación dinámica

Para el presente estudio se ha utilizado el simulador comercial Unisim (Honeywell), derivado del originalmente comercializado por Hyprotech, Hysys. En dicho simulador las ecuaciones diferenciales de los balances de materia y energía incluyen los términos de velocidad de acumulación, que permiten estimar los cambios en composición en cada unidad de volumen de la unidad en función del tiempo. Además, el modelo se basa en una red de nodos de presión y resistencias al flujo que integra todos los cálculos hidráulicos del sistema. Como resultado se obtiene un modelo del proceso muy

cercano a la realidad, que permite, entre otras muchas aplicaciones, realizar una estimación rigurosa de los caudales que irían a las válvulas de seguridad, así como un análisis muy detallado de todo lo que ocurre en un escenario determinado.

### 3. Caso de estudio

Se estimará el caudal máxico que deberían absorber las válvulas de seguridad situadas en la zona de cabeza de la unidad atmosférica en caso de fallo total del sistema de energía de la unidad, GPF (*General Power Failure*).

La Figura 1 muestra el diagrama de proceso de la unidad sujeta a estudio.

TABLA 2

CONDICIONES DE PROCESO			
	Caudal t/h	Energía MkJ/h	Temp °C
Alimentación	430	-864	120
Vapor	6,6	-86,1	300
Tren PC		146	
Horno		192	
Bombas		2,51	
Vapor	0,25	-0,45	44
Nafta	110	-245	48
Agua	7,6	-118	44
Diesel1	100	-184	178
Diesel2	104	-165	271
Diesel3	10,7	-15,2	322
Residuo Ar.	104	-141	341
Condensadores		78	
Refrigerador aire		70,1	
PumpArounds		111	

**CUALQUIER AUMENTO DE LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN LLEVARÁ IMPLÍCITA UNA COMPROBACIÓN DE LAS LIMITACIONES DE LOS SISTEMAS DE ALIVIO DE PRESIÓN, PARA GARANTIZAR LA SEGURIDAD DE LAS INSTALACIONES**

En caso de GPF, se considera que ocurren los eventos descritos en la Tabla 1.

### 3.1. Resultados del método convencional

En la Tabla 2 se presentan los caudales máxicos y de energía de las corrientes de entrada y salida del proceso en condiciones estacionarias de operación.

Según muestran los valores presentados en la Tabla 3, el caudal máxico que deben absorber las válvulas de seguridad es de 188 toneladas/hora.

TABLA 3

### VALORES REQUERIDOS EN LA APLICACIÓN DEL MÉTODO CONVENCIONAL

50% del calor aportado por el horno	MkJ/kg	96,0
20% de calor absorbido por los aerorefrigerantes	MkJ/kg	14,2
Calor latente del liquido en el plato de cabeza	kJ/kg	437

Figura 2

### Evolución del calor residual con el tiempo

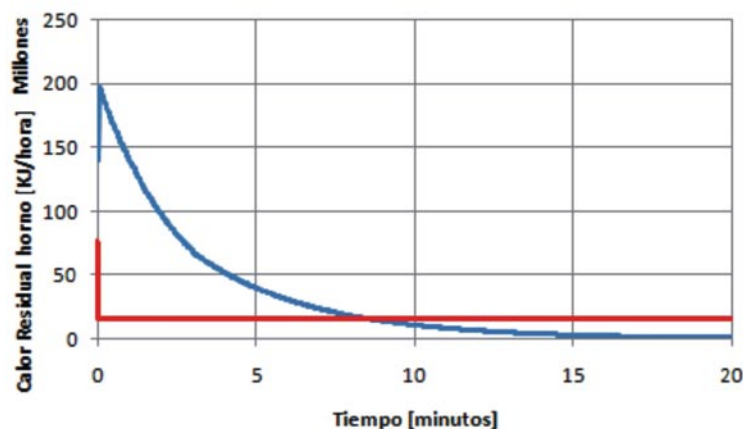
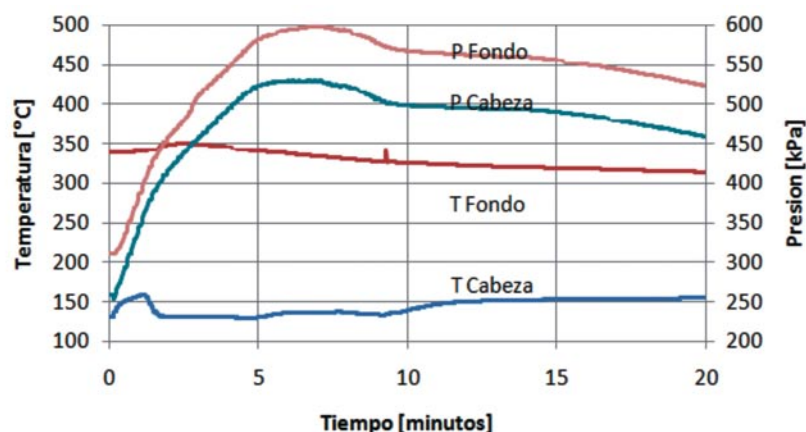


Figura 3

### Perfiles de temperatura y presión en la columna de destilación



### 3.2. Resultados de la simulación dinámica

Se ha desarrollado un modelo dinámico para simular el esquema de la Figura 1. Además, el simulador comercial dispone de un programador de eventos que permite ejecutar las acciones mostradas en la Tabla 1, que emulan el GPF.

Siguiendo las directrices de API de no dar ningún crédito a las acciones de los controladores en el cál-

culo de un caudal de alivio durante un GPF, a no ser que éstas den lugar a un escenario más conservativo, todos los controladores pasarán de automático a manual.

Como se ha mencionado, en el momento del GPF deja de suministrarse fuel combustible al horno y éste se apaga, pero existe un calor residual en el material refractario de las paredes del horno que es la única fuente remanente de energía. La si-

mulación dinámica permite modelar el transitorio dinámico de la transferencia de este calor residual al horno, en el que existe un volumen de líquido que se evapora por efecto de este calor residual de radiación. La línea azul de la Figura 2 muestra la aportación de calor residual al horno en función del tiempo durante el GPF. En la misma Figura 2, la línea roja representa el calor evacuado mediante el aerorrefrigerador, que es un 20% del valor en condiciones normales de proceso.

La Figura 3 presenta los perfiles de temperatura y presión en cabeza y fondos de la columna en función del tiempo durante el GPF. El calor de radiación residual transferido al crudo en el horno evapora primero el líquido que aún quedaba, aumentando la presión en el horno y alimentando aún a la columna por diferencia de presión estática. Como consecuencia, la presión y la temperatura en la columna aumentan.

Trancurridos 190 minutos de simulación, la presión en la cabeza de la columna alcanza los 500 kPa y la válvula de seguridad se abre, alcanzándose un pico de caudal de 95 toneladas/ hora, que representa un 50% del caudal calculado mediante el método convencional. Tal como se puede observar en la Figura 4, dicho caudal se mantiene durante un periodo de 5 minutos, despresurizando ligeramente la columna y permitiendo que la válvula de seguridad vuelva a cerrarse transcurridos 14 minutos desde el inicio del GPF. La Figura 5 muestra el recorrido de apertura de la válvula en función de la presión a la entrada de la PSV. La curva muestra el comportamiento típico de histéresis de una válvula de seguridad.

### 3.3. Análisis de sensibilidad

Una de las grandes ventajas de la aplicación de la simulación dinámica a este tipo de estudios es la posibilidad de analizar la respuesta del sistema bajo distintos escenarios. ¿Qué ocurriría si el aerorrefrigerador no sustrajese el 20% de calor? ¿El nivel de líquido en el condensador en condiciones de proceso es del 70%? ¿Qué ocurre si el momento del GPF, el nivel de líquido en el condensador fuese del 50%?

La Figura 6 muestra el efecto de eliminar la acción del refrigerador en la carga que debe absorber la vál-

Figura 4  
Evolución del caudal de alivio de presión con el tiempo (*Relief Load*)

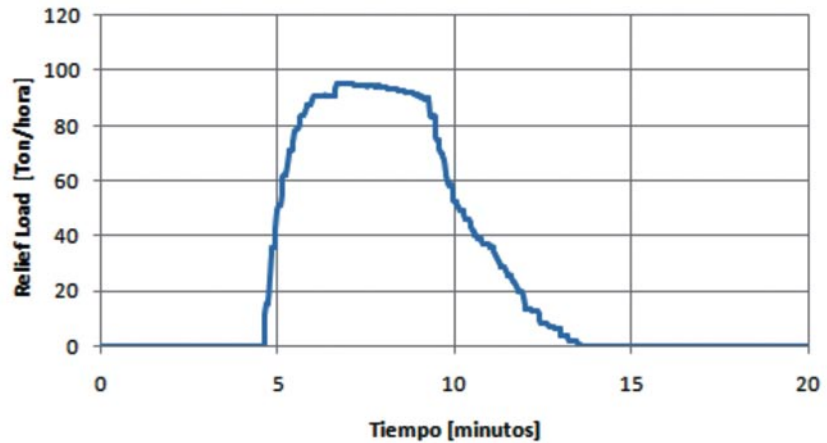


Figura 5  
Histéresis de la válvula de seguridad

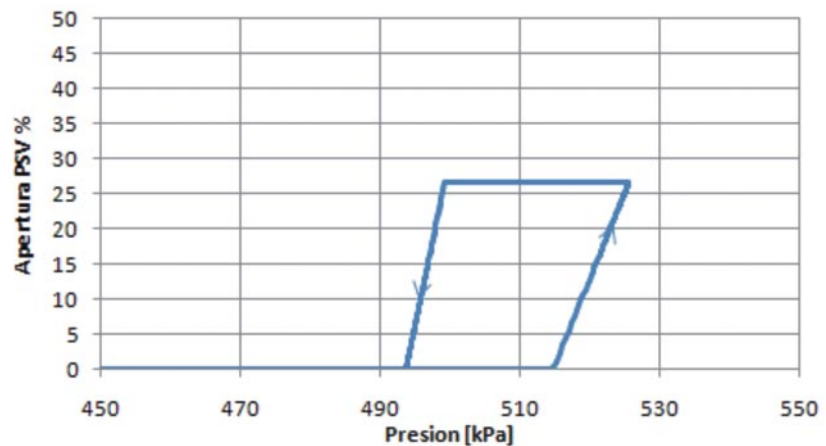
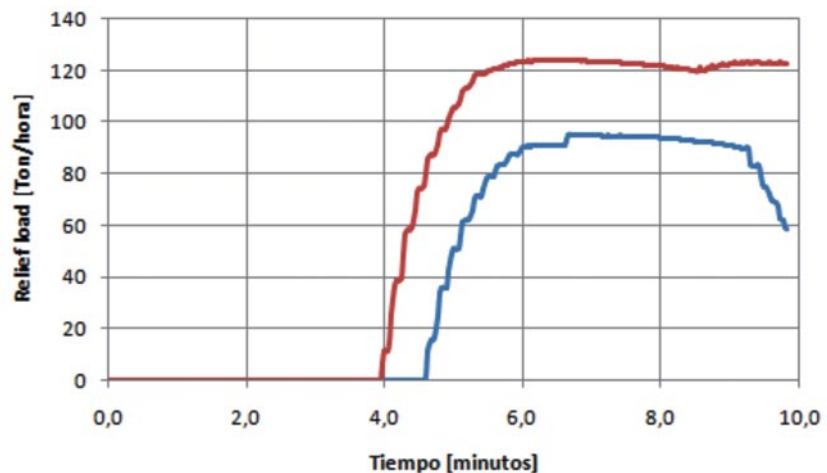
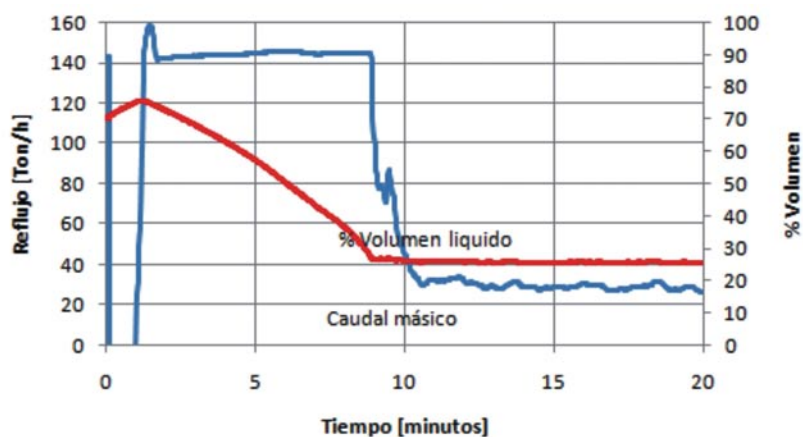


Figura 6  
Efecto del aerorrefrigerador en el cálculo de la carga que llega a la PSV





**Figura 7**  
Evolución del nivel de líquido en el condensador y del caudal de reflujo con el tiempo



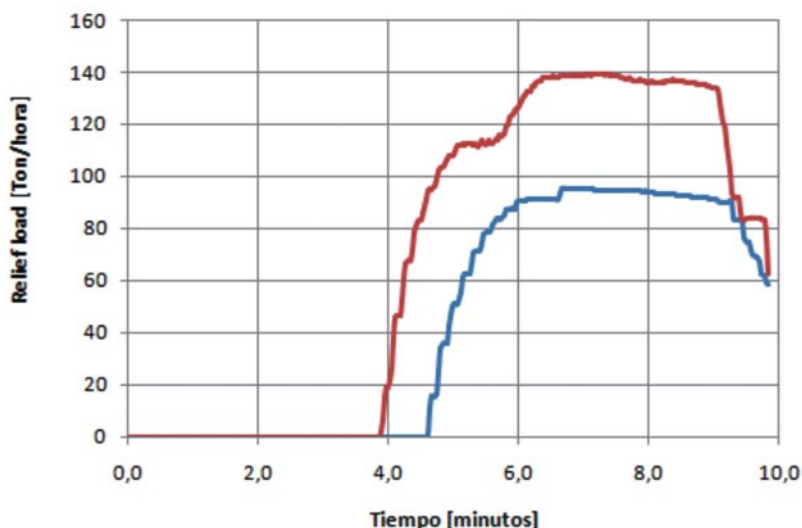
vula. Como se puede apreciar observando la curva roja, la PSV se abre unos 45 segundos antes y el caudal alcanza las 120 toneladas/hora, representando un 30% más del valor estimado con la acción del refrigerador.

La Figura 7 muestra el nivel de líquido en el condensador durante el GPF, línea roja, y el caudal de reflujo, línea azul. En el momento del GPF, la bomba de reflujo se para y el caudal de reflujo cae de 140 toneladas a cero. El nivel de líquido en el condensador aumenta pero, después de 1 minuto, la bomba accionada por la turbina de vapor entra en funcionamiento, permitiendo que el

reflujo vaya a la columna. Como el controlador de nivel está en manual, el volumen de líquido disminuye hasta alcanzar la altura del orificio de salida de líquido.

En principio, a mayor cantidad de líquido en el sistema, más capacidad de mitigar los efectos del calor residual de radiación transferido por el horno. La Figura 8 muestra que, efectivamente, considerar un menor nivel de líquido en el condensador (50%) lleva a resultados más conservativos, al estimar una carga entorno a las 140 toneladas/hora (curva roja), que representa un 50% más del valor estimado con el nivel inicial de líquido al 70% (curva azul).

**Figura 8**  
Efecto del nivel de líquido en el condensador



#### 4. Conclusiones

Como en cualquier otra actividad, los estudios de simulación dinámica deben ser realizados por personal experto y competente. Los estudios requieren un muy detallado conocimiento del proceso modelado, de sus sistemas de control, de los escenarios del alivio y del comportamiento esperado en los transitorios en general. Los modelos dinámicos deben integrar detallada y meticulosamente toda la documentación referente al proceso. Las aproximaciones y suposiciones deben estar documentadas y razonadas. Los comportamientos erróneos del modelo deben ser solucionados o justificados. Se recomienda revisar los resultados del modelo con expertos en otras áreas de conocimiento para asegurar que los modelos son razonables y lógicos. Algunas consideraciones a tener en cuenta en el uso de la simulación dinámica para el diseño de sistemas de alivio de presión son:

1) Se puede aplicar a cualquiera de los escenarios en los que se aplican los métodos convencionales

2) En general, no deben tenerse en cuenta ninguna de las acciones de los sistemas control, a no ser que aumenten la estimación de los caudales de alivio.

3) En caso de que el fenómeno físico a modelar no se comprenda perfectamente, la solución adoptada debe ser la más conservativa.

4) Un modelo dinámico desarrollado para cualquier otro propósito que no sea el diseño del sistema de alivio de presión, por ejemplo, un sistema de entrenamiento de operadores (OTS), no debe ser utilizado para este fin, ya que no puede asegurarse que proporcione cálculos de caudal de alivio precisos, a no ser que se realice una revisión detallada de todas las suposiciones del modelo precedente.

5) En condiciones de estado estacionario, el modelo debe reflejar las condiciones de operación de la planta, perfiles de presión, temperatura, caudales y composiciones. Por ello, el modelo debe incluir el adecuado nivel de detalle de modo que garantice la estimación de los caudales que irían a las válvulas de seguridad. El modelo debe incorporar los detalles geométricos de todos los equipos para conseguir el cálculo correcto de los volúmenes y de la hidráulica del sistema.

## SI BIEN EL CÁLCULO MEDIANTE UN MÉTODO CONVENCIONAL ES MÁS SENCILLO, DISPONER DEL MODELO DINÁMICO DE LA UNIDAD DE PROCESO PERMITE QUE SE PUEDAN REALIZAR ANÁLISIS DE ESCENARIOS ALTERNATIVOS

6) Es necesario llevar a cabo análisis de sensibilidad para verificar que las decisiones tomadas en los apartados anteriores son realmente las más conservativas.

Algunas de las limitaciones más significativas de los métodos convencionales son [3]:

1) Los cálculos dependen básicamente de la estimación del calor latente de vaporación de la corriente de reflujo a la temperatura del alivio.

2) En la aplicación del método convencional no se consideran los volúmenes del sistema.

3) Imposibilidad de reutilización para el cálculo de múltiples escenarios.

4) No existe posibilidad de considerar variaciones en el tiempo de las fuentes de energía que van a la columna, por lo que siempre se aplican las más altas posibles, resultando en claras sobreestimaciones.

En contraposición, la ventaja más significativa de la simulación dinámica frente a los métodos convencionales es el mayor rigor de los cálculos que emplea para la determinación de los caudales del alivio, y poder mostrar que éstos no son constantes sino que varían con el tiempo transcurrido. La posibilidad que la simulación dinámica brinda de incorporar en el modelo todos los detalles de los equipos del proceso da como resultado la obtención de valores más cercanos a la realidad.

Si bien el cálculo mediante un método convencional es más sencillo y, por lo tanto, rápido, a la larga disponer del modelo dinámico de la unidad de proceso permite que, una vez obtenido éste, se puedan realizar análisis de escenarios alternativos, evitando un nuevo análisis desde cero como requeriría el método convencional. Por ello, la aplicación del modelo dinámico puede resultar en una reducción de horas-hombre en este tipo de proyectos.

Finalmente, el sobredimensionamiento a que da lugar la aplicación del método convencional da como resultado mayores costes cuando los resultados concluyen que la capacidad del sistema de alivio de presión no es suficiente. Los resultados más rigurosos del método basado en la simulación dinámica pueden concluir que realmente la capacidad del sistema es suficiente y, por lo tanto, suponer un ahorro en costes. Por otra parte, en los casos en que el método convencional dé caudales menores que los obtenidos por simulación dinámica, es prácticamente seguro que esos resultados llevarían al dimensionamiento de válvulas de alivio insuficientes.

### Referencias

[1] ANSI/API Standard 521: Pressure-Relieving and Depressuring Systems, 5th Edition, enero (2007).

[2] Arbo et al., A. "Applying relief load calculation methods", Petroleum Technology Quarterly, Q1 (2008).

[3] Nezami, R.L. "Distillation Column Relief Loads", Hydrocarbon Processing, abril (2008). 