

# Se

SEGURIDAD

## Análisis de sobrepresiones en intercambiadores de calor

### Estudio dinámico de las sobrepresiones producidas por rotura de un tubo

*El presente artículo propone una metodología de cálculo y análisis que permite estudiar la propagación y magnitud de la onda de presión generada tras la rotura accidental de un tubo en el interior de un intercambiador de calor. Se describe el equipo empleado, la metodología seguida y los resultados obtenidos. El estudio del comportamiento de una instalación ante un fallo de este tipo permite verificar el diseño de los sistemas de protección y prevenir los riesgos derivados de posibles accidentes.*



**A. Pérez Muñoz,**  
**A. Correal Bonet,**  
**B. Pomares Jiménez,**  
**R.M. González Bañuelos**  
Técnicas Reunidas, S.A.

**G. García Campillo,**  
**G. García Guasch y**  
**J. García Guasch**  
Catalonia Engineering  
Solutions  
Catalonia Academic  
Developments Center, S.L.

**LA ROTURA DE UN TUBO** dentro de un intercambiador de calor es un suceso poco probable, aunque posible, y sus efectos deben estudiarse para evitar el daño que se puede ocasionar a la instalación en el caso de producirse. Además, el código API 521, en la Sección 3.15.2, establece que el fallo por rotura de tubo debe ser un escenario a considerar cuando la presión de diseño del lado de baja presión es menor de 2/3 de la presión de diseño del lado de alta. El ahorro económico derivado de diseñar una instalación a una presión menor de la regla de los 2/3 puede ser considerable. De ahí la importancia de establecer una metodología de cálculo que permita verificar la integridad mecánica de una instalación ante un fallo de este tipo.

Cuando ocurre la rotura de un tubo en el interior de un intercambiador de calor por el que circulan fluidos a muy diferentes presiones de trabajo, la rotura ocasiona un flujo, a través de la fisura, del fluido que se encuentra a mayor presión hacia el lado de menor presión. Se genera en ese momento una onda de presión que debe ser aliviada antes de que se ocasionen daños irreparables en el equipo y otros elementos de la instalación.

El objetivo de este tipo de análisis es dimensionar los dispositivos de protección de la instalación para las sobrepresiones que se generarían en un accidente de este tipo.

Concretamente, el intercambiador de calor debe protegerse por un elemento de descarga con suficiente capacidad para reducir las sobrepresiones generadas en la rotura. Todo lo anterior define un problema general, pero plantea cuestiones específicas como la previsión del tipo y alcance de la rotura interna y su ubicación, la determinación de la magnitud de las sobrepresiones, el flujo a desalojar y la selección de los dispositivos de protección.

Establecer un modelo que represente y permita obtener respuesta a las cuestiones anteriores es una tarea compleja que debe abordarse con medios asequibles que estén al alcance de los ingenieros. El presente estudio permite analizar este tipo de fallos ante múltiples escenarios de un modo rápido y eficiente, determinando de modo cuantitativo y cualitativo la validez de los sistemas de protección empleados.

El presente documento describe la metodología empleada y muestra

los resultados obtenidos mediante técnicas numéricas de la hipotética rotura de un tubo en el interior de un intercambiador de calor en el que existe una gran diferencia de presión entre el lado de la carcasa y el de los tubos. A diferencia de los métodos tradicionales basados en la experiencia para la estimación de las sobrepresiones que se producirán en el interior del equipo, en este estudio se propone emplear una herramienta de análisis numérico para la simulación del régimen transitorio en instalaciones de fluidos, la estimación de los picos de presión y el análisis de su evolución temporal.

### 1. Descripción del equipo

La Figura 1 muestra un esquema de un intercambiador de calor del tipo CFU según TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association) de 7 metros de longitud y 1 metro de diámetro.

La carcasa consiste en un baffle longitudinal y ocho bandejas a contra flujo de dos tipos. El fluido que vehicula es Therminol VP-1, que entra a una presión de operación de 16 barg.

El lado de los tubos está formado por haces de tubos en forma de "U" de 1" de diámetro exterior. El fluido que vehicula es agua a una presión de entrada en operación de 110 barg.

La Tabla 1 presenta las condiciones de operación principales del intercambiador.

El dispositivo de seguridad elegido para proteger el equipo es una válvula de seguridad de 6" de diámetro situada en la parte superior del intercambiador. A diferencia de los discos de ruptura comúnmente empleados para la protección de sobrepresiones, el empleo de una válvula de seguridad permite recircular el fluido descargado a través de la instalación sin tener que expulsarlo a la atmósfera. Este requerimiento es mandatorio en instalaciones con fluidos muy contaminantes, como sucede para el caso analizado con el fluido circulante por el lado de baja presión del intercambiador de calor.

### 2. Metodología

El método seguido consiste en resolver el transitorio de un fluido en régimen unidimensional e incompresible, sin transferencia de energía. Dicho procedimiento cumple con el apartado "5.22" del código

Figura 1  
Esquema del intercambiador

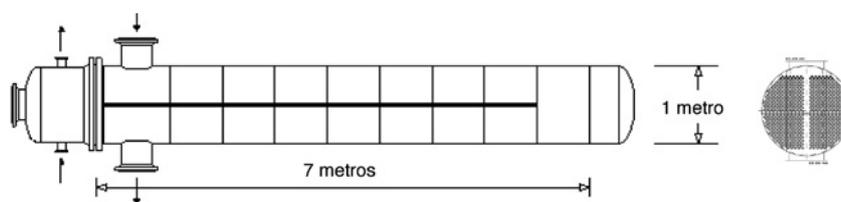


TABLA 1

#### CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL INTERCAMBIADOR

		Carcasa	Tubos
Caudal	Kg/s	200	30
Temperatura entrada/salida	°C	318 / 290	210 / 300
Presión de trabajo	bar (g)	16	110
Presión de diseño	bar (g)	26	130

API 521. Este apartado indica que debe llevarse a cabo una simulación dinámica que permita determinar el incremento de presión en régimen transitorio para el dimensionado de sistemas de protección contra las sobrepresiones. También, en su apartado "5.19.3", establece que se puede emplear un modelo dinámico unidimensional para el tratamiento de dicho problema.

En una primera fase, se ha modelizado el equipo utilizando AFT Impulse 4.0, trabajando según las condiciones previstas de operación, estado estacionario, para reflejar dichas condiciones y asegurar un nivel de detalle en el modelo suficiente para afrontar el estudio transitorio. El modelo reproduce las dimensiones diametrales y longitudinales del equipo, así como las pérdidas de carga asociadas a sus componentes.

Para determinar la magnitud de la onda de presión generada como consecuencia de la rotura del tubo, es necesario resolver el problema en régimen transitorio (dinámico). El código API 521 así lo establece en su apartado "5.22". El software empleado permite evaluar la evolución de la magnitud de la presión a lo largo del tiempo partiendo del instante de la rotura, tras el cual se generará la sobrepresión que actuará como golpe de ariete sobre las partes estructurales del equipo y a su vez validar la válvula de seguridad propuesta.

Se ha tenido en cuenta un periodo de cálculo suficientemente largo tras la rotura del tubo y la apertura

de la válvula para observar la evolución de la presión en el interior del equipo.

El transitorio hidráulico de interés cubre un periodo de tiempo, del orden de milisegundos, que empieza cuando se produce la ruptura del tubo y que finaliza con la estabilización de la presión en el interior de carcasa tras la apertura de la válvula, pues se espera que en ese intervalo se genere la máxima sobrepresión en el equipo. Este es el primer estadio del problema.

En instantes posteriores al accidente, del orden de segundos, es de esperar que la presión en el lado de baja presión no aumente debido a la actuación de la válvula aunque continúe la entrada de fluido proveniente del lado de alta presión. Este segundo estadio del problema dependerá del tiempo que se tarde en cortar el flujo en ambos circuitos de la instalación. En dicha fase, lo que se tiene es una mezcla bifásica de fluido en el lado de baja presión, cuya modelización y análisis no es objeto del presente estudio.

Se parte de la hipótesis de que la onda de presión generada inmediatamente después de la rotura de un tubo se desplazará a velocidad sónica a través del fluido en el lado de baja presión (aceite) del intercambiador, el cual se encuentra en estado líquido y, por lo tanto, puede considerarse como fluido incompresible. Esta hipótesis es aproximada, pues como consecuencia de la rotura, el fluido del intercambiador en lado de alta

## EL MÉTODO SEGUIDO CONSISTE EN RESOLVER EL TRANSITORIO DE UN FLUIDO EN RÉGIMEN UNIDIMENSIONAL E INCOMPRESIBLE, SIN TRANSFERENCIA DE ENERGÍA

presión (agua) se pone en contacto con otro fluido a baja presión, produciéndose el fenómeno conocido como “*flashing*”, transformándose el agua total o parcialmente en vapor. En consecuencia, en el lado de baja presión del intercambiador se propagará por diferencia de presiones un fluido agua/vapor en el aceite, lo cual supone una mezcla bifásica de dos fluidos diferentes. El tratamiento bifásico del problema en régimen dinámico es de gran complejidad y no es objeto del presente análisis, pues se considera que las máximas sobrepresiones se producen inmediatamente después de la rotura.

Aunque el accidente real puede ser desde la rotura parcial de la sección de un tubo hasta un seccionamiento completo del mismo, según establece el código API 521 en su apartado 5.19.3, se supone una rotura brusca (en guillotina) de uno de los tubos.

El análisis se ha efectuado suponiendo que la rotura se produce en la zona de la úes de los tubos, siendo éste uno de los escenarios con mayor probabilidad de ocurrencia. La metodología de cálculo permite analizar rápidamente escenarios de fallo adicionales, como un fallo en la zona de unión del tubo a la placa tubular. En el presente estudio, únicamente el caso mencionado es objeto de análisis.

### 3. Definición del modelo hidráulico

La modelización del equipo se ha realizado, como ya se ha dicho, con AFT Impulse 4.0, que permite en un primer estadio calcular el estado estacionario en base a técnicas estándar usadas en la industria desde hace años. Emplea el método de Newton-Raphson para resolver las ecuaciones fundamentales que gobiernan

el balance de masas y del momento del flujo en tuberías. Las soluciones se obtienen por iteración y métodos matriciales optimizados para acelerar el cálculo y obtener convergencia.

Una vez ha solucionado el estado estacionario, este software resuelve las ecuaciones del golpe de ariete usando el método de las características. Este método es el más empleado para resolver problemas de transitorios hidráulicos.

El intercambiador se ha modelizado como un conjunto de tuberías con un diámetro equivalente al del área de paso del fluido y una longitud equivalente a la de la trayectoria del fluido en el interior del equipo, y se han considerado todas las pérdidas de carga.

Se calcula inicialmente el estado estacionario, cuyos resultados fijan el estado inicial del sistema antes de la rotura. Tras la rotura, el modelo unidimensional permite simular el transitorio hidráulico que se produce posteriormente, donde el caudal y la presión variarán continuamente.

El efecto de la rotura de un tubo es modelizado como un aporte de caudal constante al sistema durante todo el tiempo de la simulación. El incremento de caudal desde el inicio de la rotura hasta alcanzar el valor constante se realiza mediante una rampa o función lineal, de duración 1 ms.

La simulación transitoria comienza con el fallo, iniciándose en el instante  $t=0$  segundos, con una duración de la rotura de 1 milisegundo. Se supone que dicho intervalo de tiempo es suficientemente corto para reproducir una rotura prácticamente instantánea de modo conservador. Se analizaron también tiempos de rotura superiores, de 5 y 10 milisegundos, dando resultados menos conservadores y que no se presentan en este documento. Tal y como se ha comentado con anterioridad, se simula una rotura total del conducto (en guillotina).

La determinación del caudal trasgado a través de la rotura se realiza estableciendo la hipótesis de que el 100% del agua es vaporizado desde el instante inicial, es decir, que no se transfiere una mezcla bifásica de agua líquida y vapor al lado de baja presión. Dicha hipótesis es conservadora en cuanto a que el caudal de rotura teórico calculado será siempre mayor que el real.

### 4. Resultados

La variación de los valores de la presión obtenidos frente al tiempo en diferentes puntos del interior de la carcasa del intercambiador de calor se muestran en la figura 2.

Como puede observarse, instantes después de la rotura del tubo, en el interior del equipo se produce un incremento máximo de presión de 9 bar en la zona más próxima a la rotura (véase la gráfica del nodo 5).

La onda de presión se propaga en todas direcciones, observándose un desfase temporal de la onda conforme nos alejamos del punto de rotura. A medida que avanza por el interior del equipo, va decreciendo, pero no de modo simétrico. Se observa que las presiones en los puntos 4, 3 y 2 son superiores que sus homólogas de los puntos 6, 7 y 8, porque la onda viaja contra o a favor de corriente, respectivamente. Además, en el punto 2 hay un pico de presión mayor provocado por el estrechamiento de la tobera y por viajar a contracorriente. En el punto 8, el pico de presión se debe al estrechamiento de la tobera.

Tras el primer pico de presión, la presión se reduce y se estabiliza debido a la inercia del fluido durante un breve periodo de tiempo de aproximadamente unos 20 milisegundos.

Posteriormente, aumenta de nuevo, aunque de forma más gradual, llegando hasta su valor máximo entre los 160 y 180 milisegundos.

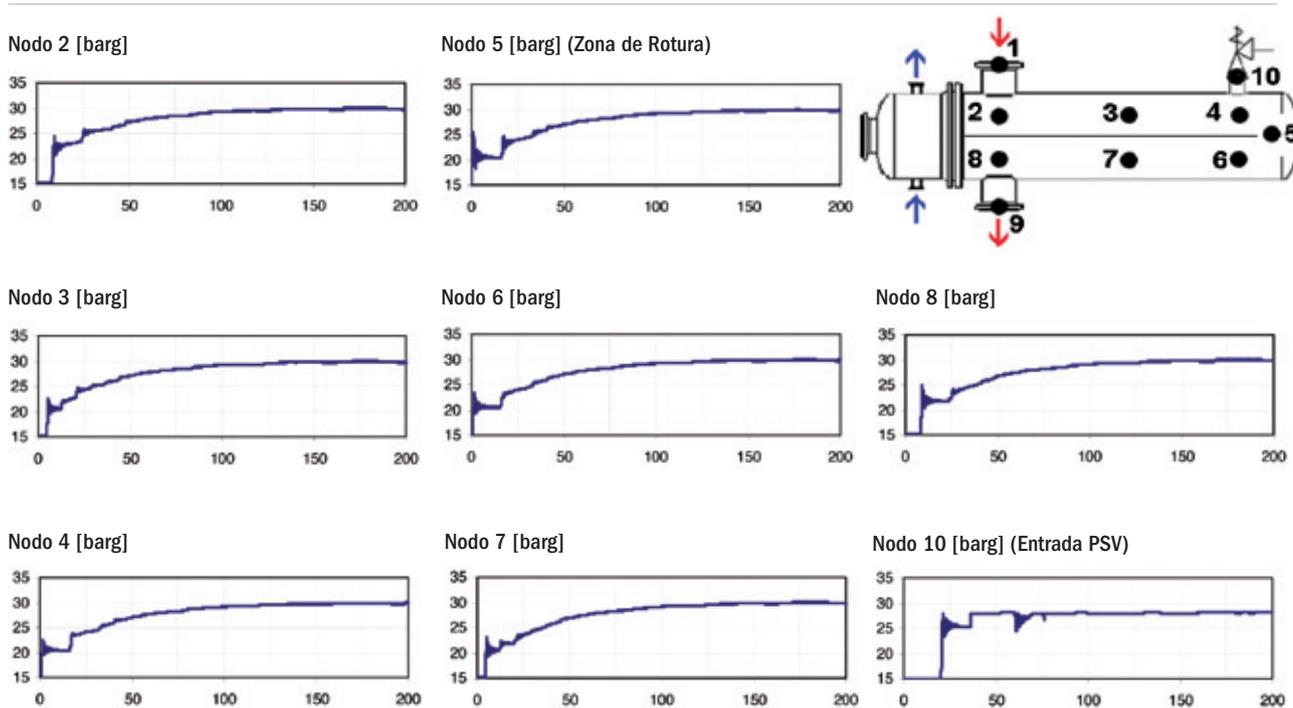
Después, la presión empieza a reducirse de forma gradual debido a la apertura de la válvula de seguridad.

La evolución de la presión en instantes posteriores que muestra este modelo es conservadora, ya que el caudal de rotura considerado se estima constante y siendo un 100% agua vaporizada, lo cual en la realidad no será así, pues es de esperar que el caudal vaporizado se reduzca con el paso del tiempo reduciendo el caudal trasgado por la rotura y, como consecuencia, disminuyendo la sobrepresión.

En los diferentes puntos del intercambiador analizados se aprecian curvas muy similares.

La gráfica del nodo 10 muestra la variación de presión a la entrada de la válvula. Como puede apreciarse, la apertura de la válvula comienza 20 milisegundos después de producirse la rotura del tubo como reacción a la primera onda de presión recibida. En los instantes siguientes se apre-

Figura 2  
Valores de presión calculados en el interior del intercambiador. Tiempo [ms]



cian unas oscilaciones de la presión en la entrada de la válvula; cuando esta sobrepresión se estabiliza, se abre definitivamente.

### 5. Verificación de resistencia mecánica

La sobrepresión debida a la rotura de un tubo es un evento que debe ser analizado como una condición accidental en el diseño mecánico de intercambiadores de calor. Por tanto, el criterio para verificar la resistencia mecánica del equipo ante un accidente de este tipo debe de ser diferente al establecido para condiciones de operación normales o anómalas.

El código ASME VIII División 1 establece, en su apartado UG-23(d), que, ante un suceso de baja probabilidad como un terremoto, la tensión mecánica admisible del equipo a fallo por colapso plástico puede incrementarse en un 20%, lo que equivale a aplicar un factor reductor de la carga de 0.833. Esto quiere decir que, ante un evento de este tipo, el código permite reducir el margen de seguridad al diseño pero manteniéndolo dentro de valores admisibles.

Se considera el criterio anterior de aplicabilidad para la verificación de la resistencia mecánica de un recipiente a presión ante la sobrepre-

## ESTE ARTÍCULO ESTÁ CENTRADO EN CÓMO AFECTA UN FALLO EN EL INTERIOR DEL EQUIPO AL PROPIO EQUIPO

sión debida a un accidente de rotura de tubos.

Por lo tanto, para el modelo de estudio analizado, siendo la presión de diseño en el lado sobrepresurizado de 26 bar(g), la presión admisible ante una sobrepresión accidental queda establecida en 31.2 bar(g). Los resultados obtenidos del caso de estudio permiten verificar que la máxima sobrepresión interna obtenida es menor que la presión admisible y que, por tanto, el equipo está protegido mecánicamente a colapso plástico.

### 6. Conclusiones

Este tipo de estudios permite, aplicando las directrices del código API 521, verificar el dimensionado de los elementos de protección contra sobrepresiones y la integridad mecánica del equipo ante un fallo por rotura de tubo.

Realizar este tipo de estudios es de gran utilidad porque aporta más conocimiento sobre el comportamiento de las instalaciones en condiciones anómalas, mejorando la seguridad de los diseños.

Los modelos que se configuran para emplearlos en este tipo de análisis permiten a su vez comparar diferentes alternativas de diseño para seleccionar y ubicar objetivamente los dispositivos de protección (válvulas de seguridad, discos de rotura, etc.).

Este artículo está centrado en cómo afecta un fallo en el interior del equipo al propio equipo. No obstante, el estudio puede enfocarse para analizar la afectación del fallo en un equipo sobre los demás elementos de la instalación y viceversa.

#### Referencias

- [1] ANSI/API Standard 521 (ISO 23251) - Petroleum and natural gas industries - Pressure-relieving and depressuring systems.
- [2] "Prevent overpressure failures on heat exchangers. Dynamic modelling predicts pressure wave effects and consequences during a tube rupture" por J.R. Cassata, Z.J. Feng, S. Dasgupta, R. Samways, publicado en la revista "Hydrocarbon Processing", Noviembre 1998.
- [3] "Design considerations to prevent heat exchanger failure" por B.C.R. Ewan y M. Moatamedi, publicado en "Hydrocarbon Processing", Noviembre 2000.
- [4] Manual de usuario de AFT Impulse 4.0, "Waterhammer Modeling in Piping Systems", AFT - Applied Flow Technology, 2007.
- [5] 2010 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessels.