



# Análisis en régimen transitorio y su aplicación en gasoductos de alta presión

Por *Lic. Rubén Librandi*

**Este trabajo expone dos ejemplos relacionados, en los que la simulación se utiliza para analizar el transporte de gas en alta presión.**

**U**n sistema de transporte de gas en alta presión consiste básicamente en un punto de recepción, al menos un gasoducto troncal con plantas compresoras intermedias y varios puntos de entrega.

Tanto para el diseño de uno nuevo como para la ampliación de uno existente, recurrimos a modelos de simulación en estado estacionario, en los que se verifica que “todo lo que ingresa debe ser igual a lo que egresa”. En otras palabras, que la masa de gas almacenada se mantiene constante.

Estos modelos estacionarios tienen un nivel de complejidad que fue superado con la aparición de la computadora personal y su uso masivo.

El incremento sostenido de la capacidad de procesamiento de los ordenadores permitió, además, resolver mediante métodos numéricos las ecuaciones diferenciales que describen al régimen transitorio. Esto pone a nuestra disposición una invaluable herramienta que nos permite abordar problemas como los que presentaremos a continuación.

Las dos condiciones extremas que pueden acontecerle a un gasoducto son la rotura y el bloqueo, el significativo desbalance de masa que provocan vuelve inaplicable el enfoque en régimen estacionario (masa constante), por lo tanto, deberá recurrirse al análisis en régimen transitorio.

En el presente trabajo exponemos un ejemplo de cada caso que casualmente se dieron en el mismo gasoducto, el cual transporta gas desde la Argentina hacia Chile a través de la cordillera de los Andes.

Ellos son, en el caso 1, una rotura de línea ocurrida en 2002; y en el caso 2, un bloqueo programado de línea en 2005. El primero está basado en un trabajo presentado en el Pipeline Simulation Interest Group (PSIG) de 2002; el segundo, en un trabajo presentado en el Grupo de Interés en Modelado y Operación de Redes (GIMOR) en 2007.

## Caso 1: rotura de un gasoducto

Se trata de una condición extrema con muy baja probabilidad de ocurrencia, las veces que ha tenido lugar ha sido en casos que no disponían del sistema de supervisión y adquisición de datos SCADA –que permite el control y monitoreo de los sistemas de transporte de gas– o que fue instalado con posterioridad.

El caso que nos ocupa aconteció en un sistema cuya tecnología nos permitió disponer de la información necesaria, tanto para sacar conclusiones del incidente como para conocer la confiabilidad del modelo para abordar este tipo de problema.

El estado estacionario, que utilizamos, ya sea para efectuar un diseño, como para analizar maniobras operativas, puede ser considerado como un problema de flujo isotérmico. El fenómeno de rotura, en cambio, es un problema de flujo adiabático donde el gasoducto se comporta como una garganta de tobera, en la que el fluido alcanza una velocidad igual a la del sonido, y la brusca despresurización viene acompañada por un rápido descenso de temperatura.

### Descripción del sistema

Para situarnos en el problema, mostramos un esquema simplificado del sistema que se trata de un gasoducto troncal de 20 pulgadas de diámetro y con una MAPO (máxima presión admisible de operación) de 93,1 barg (figura 1).

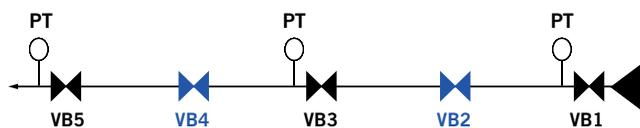


Figura 1.

En la tabla 1, figura la información correspondiente al esquema y forma parte de los datos necesarios para el análisis.

Sólo las válvulas impares tienen instalados transmisores de presión (PT) que nos permiten su medición y comando en forma remota. En cuanto a las pares, al no disponer de este elemento, debemos inferir los parámetros a través de la simulación.

Cabe aclarar que la ubicación precisa de la rotura que figura en tabla se determinó con posterioridad, por lo

Punto	Progresiva km	Altimetría m	SCADA PT?
PC N°1	0,0	320	Sí
VB1	0,0	320	Sí
VB2	31,4	425	No
Rotura	40,0	650	
VB3	63,4	784	Sí
VB4	94,1	1966	No
VB5	126,2	3644	Sí

Tabla 1.

tanto, era desconocida durante el transcurso de los acontecimientos que describimos a continuación.

### Sucesión cronológica de los eventos

Una vez efectuada la descripción física del sistema, pasamos a describir la cronología de los eventos. Estos se iniciaron una vez detectada la rotura y, con el objetivo de aislarla, desde sala de control, se procedió a sacar de servicio a la PC N.º 1 y cerrar las válvulas VB1, VB3 y VB5 en los tiempos detallados.

Si bien es posible operar algunas válvulas por vía remota, todas tienen instalados unos presostatos calibrados para que se cierren en caso de baja presión y en forma local. En el caso específico de la VB2, el valor de calibración es de 24,5 barg.

El perfil de presión en el instante en que se produce la rotura ( $t=0$ ) será para nosotros la **condición inicial** de nuestro problema, es decir,  $P(x,0)$ .

Punto	Evento	t hh:mm	t minutos
pk 40,0	Rotura	22:44	0
PC N.º1	F/S remoto	23:01	17
VB3	Cierre remoto	23:01	17
VB5	Cierre remoto	23:01	17
VB1	Cierre remoto	23:08	17
VB2	Cierre local ?	??:??	??
VB4	Cierre local ?	??:??	??

Tabla 2.

Al sacar de servicio la PC N.º 1, en el minuto 17, el sistema dejó de tener aporte de gas, y, a partir de ese instante, quedó aislado el tramo VB1–VB5 (tabla 2).

Dado que este análisis se efectúa con posterioridad a los hechos, la ubicación precisa de la rotura ya es conocida y vemos que el problema quedó circunscripto al tramo VB1–VB5 a partir del minuto 17 y luego al VB1–VB3 en el minuto 24.

Una vez que la presión en VB2 alcanzó el valor de calibración de 24,5 barg, se cerró esta válvula y se confinó el problema al tramo VB2–VB3. Lo que no sabemos es el instante en el cual se cerró y es lo primero que debemos determinar.

### Evolución de la presión en cabecera PC N.º 1/VB1

Así como necesitamos una condición inicial  $P(x,0)$ , también necesitamos una condición de borde  $P(0,t)$  que estará dada por los valores de presión medidos en la VB1 que graficamos en la figura 2.

Disponemos, entonces, de toda la información necesaria para el análisis, es decir, la configuración del sistema, la condición inicial  $P(x,0)$  y la de borde  $P(0,t)$ .

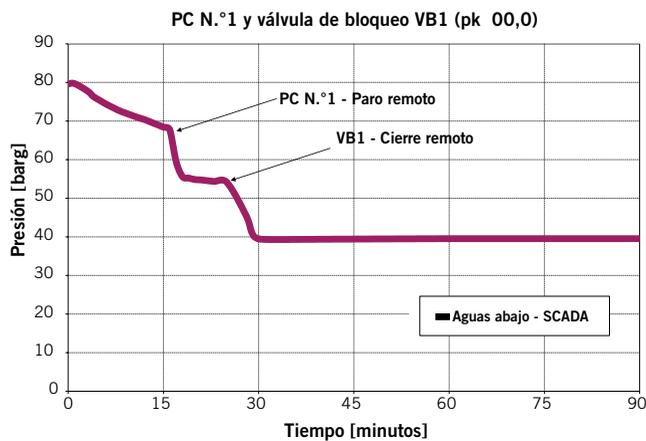


Figura 2.

### Comparación entre variables medidas y calculadas

Una vez conocida la evolución de la presión medida en VB3, procedemos a compararla con la calculada; esta información es de vital importancia para entender cómo responde el modelo ante este tipo de problemas y qué podemos esperar de él (figura 3).

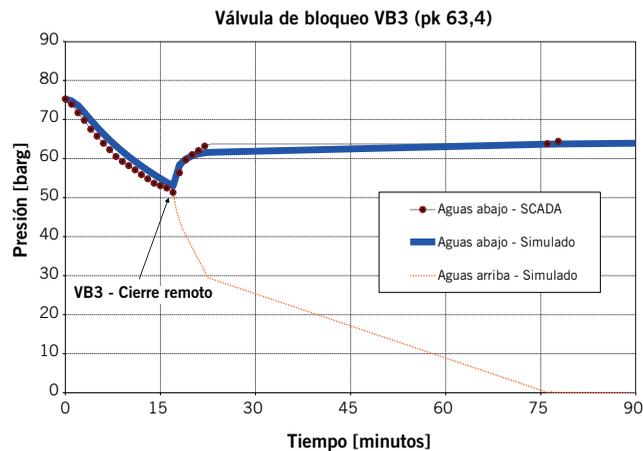


Figura 3.

Observamos que la diferencia entre “realidad y simulación” es mínima y, por lo tanto, serán confiables los resultados obtenidos de aquí en adelante.

A partir del instante de cierre, las presiones en ambos lados de la válvula evolucionaron de manera diferente; aguas abajo, la presión tiende a estabilizarse mientras que aguas arriba, cae a cero, dado que se encuentra del lado de la rotura.

### Primer resultado: instante en que se cierra VB2

La presión en la VB2 cae hasta alcanzar el valor de cierre que se da a los 34 minutos, de allí en más, sucede un fenómeno análogo al anterior, pero en este caso la falla se encuentra aguas abajo de la válvula, por eso la presión cae a cero (figura 4).

### Segundo resultado: volumen venteado

Sabiendo que en el minuto 17 se produjo la salida de servicio de la PC N.º 1, y en el 34, el cierre local de VB2, obtenido de la simulación, estamos en condiciones de calcular el volumen de gas venteado.

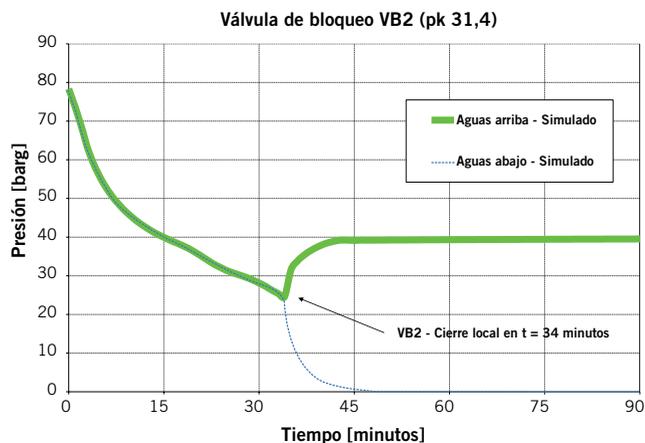


Figura 4.

El caudal a través de la rotura alcanza un pico para luego decrecer debido a la despresurización que ella misma provoca.

Se observan también cambios en la pendiente a raíz de que el tramo afectado involucra a todo el sistema en el minuto 0; al tramo VB1–VB3 a partir del 17, y por último, sólo al tramo VB2–VB3 a partir del 34 (figura 5).

Integrando los valores de caudal se obtiene el volumen venteado, por lo tanto, cuando el primero tienda a cero, el segundo tenderá a un valor constante, y dará como resultado 1,20 MSm<sup>3</sup> (millones de metros cúbicos estándares).

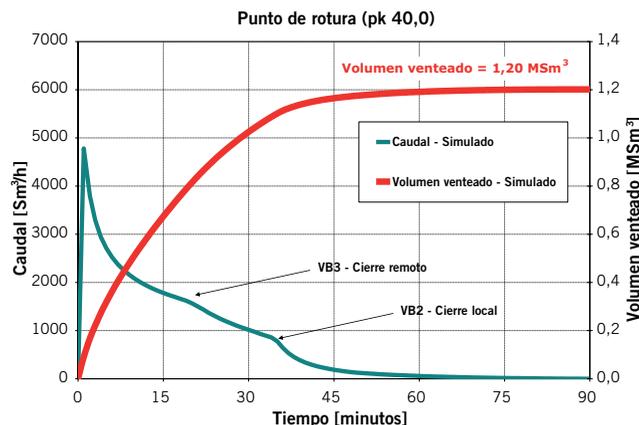


Figura 5.

### Perfiles de presión para distintos instantes

Conocemos el perfil en t=0 que utilizamos como condición inicial del problema, pero es interesante analizar cómo y con qué velocidad se fue modificando durante el transcurso de los acontecimientos.

La rotura provoca la inversión del sentido de circulación, ya que todo el gas disponible fluye hacia ella, y esto se pone de manifiesto en el cambio de pendiente de los sucesivos perfiles con respecto al inicial.

Apenas un minuto después del cierre remoto de la válvula VB3, la diferencia de presión entre ambos lados es de 15 barg, valor que ni siquiera se puede comparar con el de una operación normal (figura 6).

Tenemos ahora el estado del sistema en el instante t=34, cuando se cierra localmente la VB2, mientras que

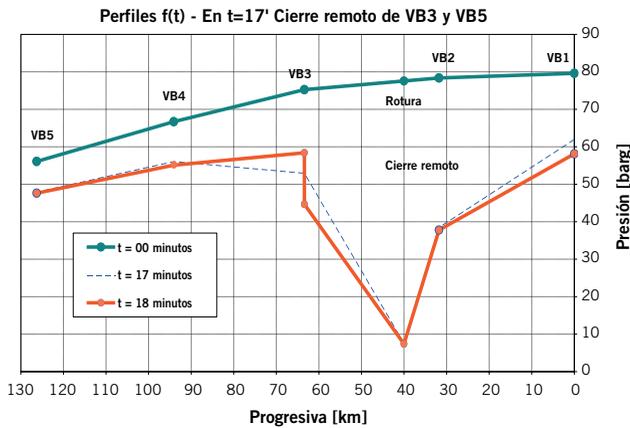


Figura 6.

en la VB3 la diferencia de presión continuó en aumento y llegó casi a 50 barg (figura 7).

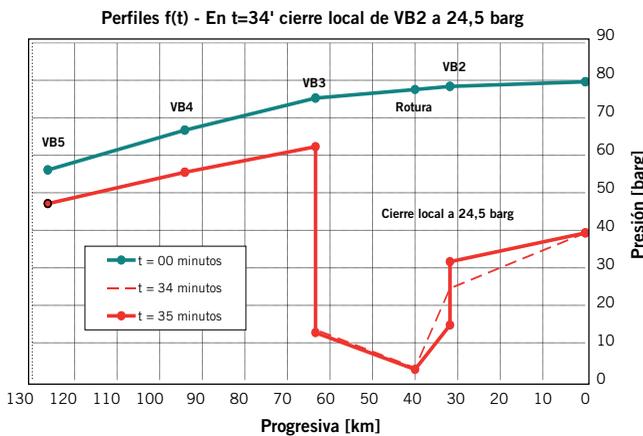


Figura 7.

Para finalizar, comparamos el perfil inicial con el final, donde ya tenemos el tramo VB2-VB3 totalmente despresurizado, mientras que el resto, al haber sido aislado oportunamente, permanecerá con gas entrampado (figura 8).

Es interesante hacer notar que a pesar de no existir circulación de gas, el perfil final entre VB3-VB5 no es plano y esto se debe a la marcada diferencia de altimetría entre ambos puntos.

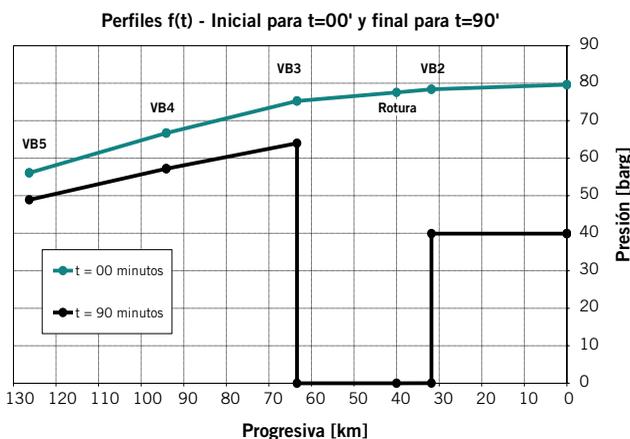


Figura 8.

## Balance de masa por tramos

Habíamos determinado que el volumen venteado era de  $1,20 \text{ MSm}^3$ , ahora analizaremos el aporte a este, tramo por tramo.

Sabemos que sólo el tramo VB2-VB3 pierde la totalidad de su *linepack*, mientras que los demás hacen aportes parciales en función de su cercanía a la falla y del instante en que fueron aislados (figura 9).

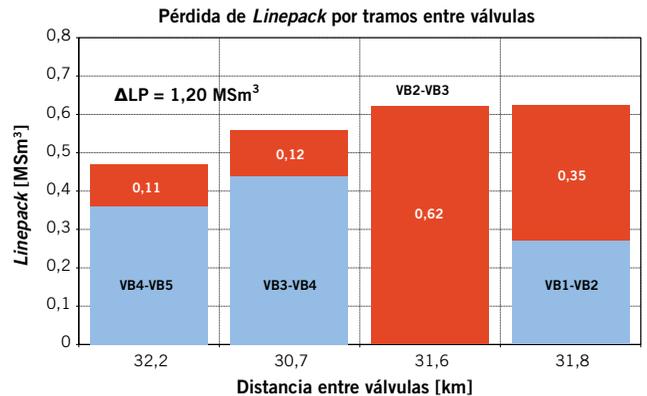


Figura 9.

## Caso 2: Revalidación de la MAPO de un gasoducto

### Introducción y objetivo

A continuación, analizamos un bloqueo programado de gasoducto, cuya motivación fue la necesidad de revalidarlo para restituir el valor de MAPO a su valor de diseño.

La MAPO se encontraba limitada a 79,0 barg, y el mecanismo de re prueba consistió en presurizarlo gradualmente hasta alcanzar el valor deseado de 93,1 barg.

Se trata del mismo gasoducto mencionado en el caso 1, sólo que ahora es mayor la longitud involucrada; comprende al tramo entre las dos plantas compresoras (figura 10).

Una característica distintiva de este gasoducto es el papel que juega la altimetría, cuestión para nada habitual y absolutamente despreciable en cualquier sistema argentino.

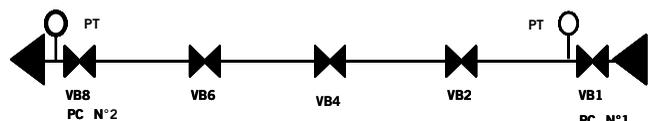


Figura 10.

### Descripción del sistema

En la tabla 3 figura la información del sistema que necesitamos para nuestro análisis, vemos que la PC N.º 1 se encuentra instalada a 320 m, mientras que la PC N.º 2 se encuentra a 3.655 m sobre el nivel del mar.

Esta diferencia hace que aunque alcancemos el valor deseado de 93,1 barg en la PC N.º 1, no podremos superar nunca los 68,9 barg en la PC N.º 2, y el motivo es el peso de la columna del gas entrampado entre ambas (no hay circulación).

Punto	Progresiva km	Altimetría m	SCADA PT?
PC N°1	0,0	320	Sí
VB1	0,0	320	Sí
VB3	63,4	784	Sí
VB5	126,2	3644	Sí
VB7	168,2	3326	Sí
VB8	188,2	3655	Sí
PC N°2	188,0	3655	Sí

Tabla 3.

### Necesidad de revalidación de una línea

Se aplica a aquellas que han operado en forma prolongada a presiones inferiores a las de diseño, y se trata de un tema de integridad que excede el alcance de este trabajo (ver NAG100 / MAPO o bien ASME B31.8 / *Uprating*).

Las tareas realizadas antes y durante el operativo son las siguientes y, como veremos, no involucran solamente a la empresa transportista, sino también a la comunidad vecina:

- Viviendas en el área de riesgo–Información personal.
- Difusión a la población en general–Diarios y radios.
- Apoyo para el operativo–Policía, Bomberos, ambulancias.
- Carteles–En cruces de rutas nacionales, provinciales y caminos
- Centro operativo–Para la concentración de las comunicaciones.

De lo expuesto se desprende que el objetivo consiste en cumplir con las tareas en el menor tiempo posible y recurrir a la simulación en régimen transitorio para programarlas.

El tipo de maniobras a realizar sobre el gasoducto son básicamente las dos que siguen:

- Incremento de presión a una velocidad menor a 2 barg/hora.
- Estabilización (detección de fugas a pie y sobrevuelo de la línea).

La tabla 4 establece, junto a las tareas programadas, los tiempos asignados a cada una, tenemos los tres perfiles: inicial, intermedio y final, como así también las dos rampas de presurización intermedias que permiten pasar de uno a otro, respetando la velocidad establecida.

Etapa	Período		Actividades/ Tareas	P <sup>1</sup> barg	P <sup>2</sup> barg	LP MSm <sup>3</sup>	ΔLP MSm <sup>3</sup>
	Inicio	Fin					
Inicial	-02:00	00:00	Estabilización	79,0	58,9	2,915	
Primera rampa	00:00	04:00	Incremento 2 barg / hora				0,325
Intermedia	04:00	08:30	Estabilización Detección de fugas sobrevuelo	87,0	64,6	3,240	
Segunda rampa	08:30	11:30	Incremento 2 barg / hora				0,550
Final	11:30	13:30	Estabilización Detección de fugas sobrevuelo	93,1	68,9	3,465	

Tabla 4.

## Perfiles de presión

Sea cual fuere la condición del sistema previa al operativo, se lo deberá acondicionar antes de iniciarlo.

Graficamos a los tres perfiles programados junto al de altimetría, donde queda de manifiesto que los primeros son un fiel reflejo del último (figura 11).

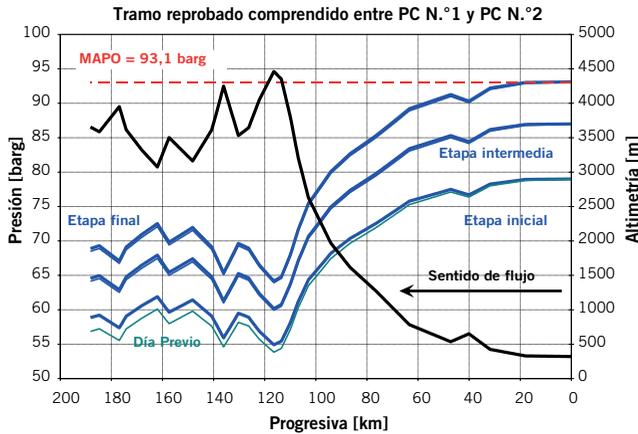


Figura 11.

Las líneas delgadas por debajo de las azules indican el momento en el cual finaliza cada rampa, es decir, se interrumpe un proceso sostenido de presurización para permitirle al sistema alcanzar cada estado de equilibrio programado.

Al tener bloqueado el ingreso a la PC N.º2 sólo tenemos control del sistema desde la PC N.º1

Esto es lo que vemos en la figura 12 que representa la evolución temporal de las variables donde vemos las tres etapas de estabilización y las dos rampas de presurización intermedias.

## Evolución de las variables en el tiempo

Asumimos un tiempo de acondicionamiento de dos horas durante la jornada previa de operación normal, seguido de otro anormal, donde tiene lugar el operativo que nos ocupa (por ello, la figura 12 tiene su origen en  $t=-2$ ).

Al bloquear al gasoducto en la PC N.º 2, sólo tenemos control del sistema desde la PC N.º 1; vemos ahora cómo

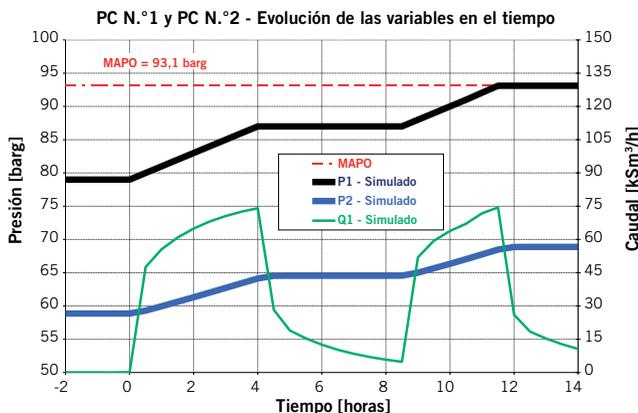


Figura 12.

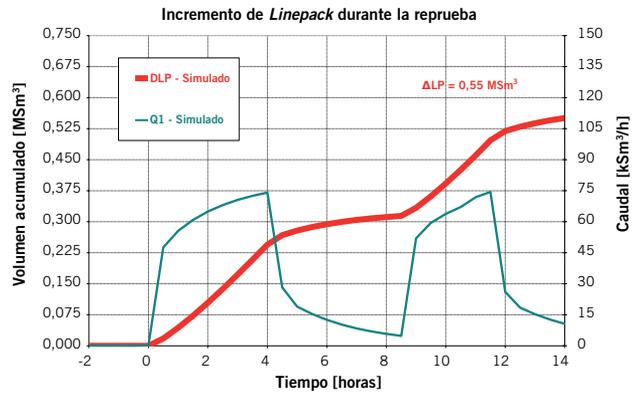


Figura 13.

evolucionan en el tiempo las variables, es decir, las tres etapas de estabilización junto a las dos de presurización.

El gas comprimido por PC N.º 1 será inyectado al sistema mientras sea necesario presurizarlo, pero deberá ser reciclado dentro de la planta para mantener constante la presión durante los períodos de estabilización.

La evolución del bloqueo de la cañería (*linepack*) guarda una relación directa con la evolución de las presiones ya que es directamente proporcional a ellas, en cambio, la relación con el caudal inyectado es la que existe entre una función y su derivada, como se observa en la figura 13.

Como cierre, comparamos los parámetros determinados del análisis previo con los obtenidos mediante el sistema SCADA, y, tal cual lo esperado, se encuentran en perfecta concordancia.

Mientras que es la PC N.º 1 la que impone la presión, el valor de esta en la PC N.º 2 será el que resulte de lo anterior y de las características del sistema.

Se observa la perfecta concordancia entre los valores calculados y los medidos, y, al tratarse de un análisis dinámico, esta debe darse tanto en los valores de presión como en los de tiempo (figura 14).

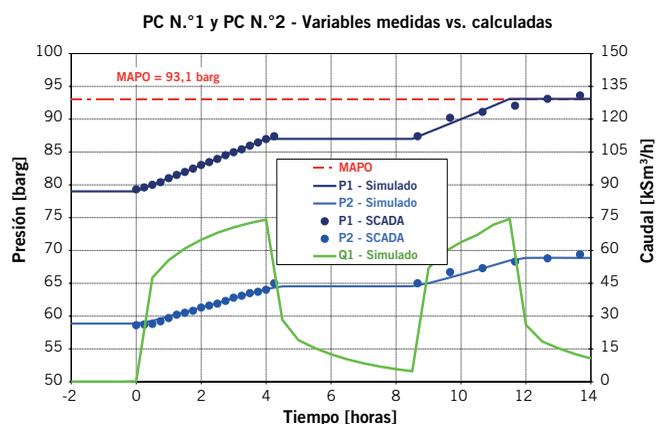


Figura 14.

## Cierre y conclusiones

Surge, entonces, la pregunta acerca de cuál es la utilidad de estudiar una rotura, si es un hecho aleatorio y de bajísima probabilidad.

Una respuesta es la que mencionamos: calcular el volumen de gas venteado a la atmósfera cuando hay eventos (cierre de válvulas) en tiempos desconocidos, que debemos determinar.

Otra, y mucho más importante, es que algunos sistemas tienen instaladas válvulas de línea que no bloquean en función de una presión mínima de calibración, sino que actúan cuando detectan la “velocidad” con que esta varía, es decir,  $\Delta P/\Delta t$ .

El proceso de calibración consiste en simular roturas en distintos puntos de la cañería para obtener de este modo los parámetros  $\Delta P/\Delta t$  para cada una.

Esto constituye el valor del primer caso analizado, ya que no es habitual conocer la *performance* de un modelo para simular condiciones de flujo adiabático y esto nos permite saber que lo hace satisfactoriamente.

Con respecto al segundo caso, la conclusión es obvia: la simulación es una herramienta importante, ya que no es posible programar un operativo de tal envergadura desconociendo el comportamiento dinámico del sistema involucrado, es decir, la posibilidad de alcanzar los parámetros previstos en los tiempos estipulados. ■

## Bibliografía

Santos, L., *Informática Aplicada a Gasoductos*. Gas del Estado.

Santos, L., *Optimización de Gasoductos en Estado Estacionario y Transitorio*. Gas del Estado.

Osciadacz, A., *Simulation and Analysis of Gas Networks*. Warsaw University.

Shames, I., *Mecánica de fluidos*. Mc Graw Hill.

Schulz, W., *Dinámica de gases*. Editorial Científica Universitaria.

**Rubén Librandi** es ingeniero electricista por la Universidad Tecnológica Nacional (1988), ha realizado estudios de posgrado Especialización en Gas en el Instituto de Gas y Petróleo de la Universidad de Buenos Aires (1990). Asimismo, cuenta con una experiencia de más de 20 años en el transporte de gas, tras asumir distintas responsabilidades en áreas operativas de planeamiento e ingeniería.

Se ha desempeñado como docente en el Departamento de Electrotecnia de la Escuela Nacional de Náutica y en la Universidad Tecnológica Nacional.

En la actualidad, es docente del curso de especialización en Economía de Gas y Petróleo en la Escuela de Postgrado del Instituto Tecnológico de Buenos Aires.