

# Estudio de fugas en una tubería para la mezcla de agua y glicerina

J. E. Pérez-Mota\*, C. Verde\*\* y  
J. G. Cervantes-de-Gortari\*

\**Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México,  
Ciudad Universitaria, 04510 México CDMX.*

\*\**Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México,  
Ciudad Universitaria, 04510 México CDMX.*

---

**Resumen:** Una de las maneras más eficientes para transportar mezclas de fluidos es el uso de tuberías, la detección de fugas o fallas ayuda a evitar accidentes que pudieran provocar daños económicos y/o medioambientales. En el presente trabajo, por medio de la dinámica de fluidos computacional, se analizaron en régimen transitorio distintas variables del flujo bifásico en un ducto con fugas localizadas de distintos diámetros. El flujo bifásico de agua y glicerina se estudió con el modelo de mezcla considerando diferentes fracciones de las fases. Para validar el código de DFC, se comparó el gasto que predice el software contra el gasto obtenido a partir de correlaciones para el factor de fricción de Fanning y se obtuvo una buena concordancia. En los extremos del ducto y en la fuga se plantearon condiciones de frontera basadas en la presión que permiten obtener comportamientos acordes con observaciones prácticas y que se ven reflejados en las curvas de presión-tiempo y de gasto-tiempo, dicha combinación de condiciones de frontera no ha sido reportada previamente en la literatura. Los resultados numéricos son fenomenológicamente correctos y dado que la glicerina tiene propiedades similares a las del crudo pesado, el conjunto de escenarios simulados puede ser empleado para alimentar de información a sistemas de detección de fallas de la industria petrolera.

*Palabras clave:* Fugas localizadas, Flujo multifásico, Dinámica de Fluidos Computacional, CFD, Fallas.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

En general, un sistema multifásico se define como una mezcla de fases (sólidos, líquidos y/o gases). De manera específica, el flujo multifásico en tuberías aparece frecuentemente en la industria petrolera, química y nuclear (Cheng, 2018). Debido a las interacciones entre las distintas fases y los patrones de flujo, hay situaciones que se deben explorar profundamente de manera experimental o a través de la Dinámica de Fluidos Computacional (DFC ó CFD por sus siglas en inglés).

Los flujos multifásicos se clasifican a menudo de acuerdo a su naturaleza como: flujos dispersos, flujos separados y flujos en transición (Ishii, 1975). Particularmente, los flujos dispersos se pueden estudiar de manera computacional por medio del modelo de mezcla, mismo que, de acuerdo con Manninen y Taivassalo (1996), es una aproximación suficientemente precisa en muchas aplicaciones prácticas en las que la naturaleza del flujo multifásico no se puede despreciar.

En relación al estudio de fallas en tuberías se han empleado muchas técnicas pero se ha considerado una sola fase. Por consiguiente, el efecto de fugas localizadas en las líneas de conducción de flujos multifásicos y su efecto en el comportamiento de una instalación recobra importancia para ser representadas mediante la DFC, se pueden señalar los trabajos de Ben-Mansour et al. (2012) y Santos et al. (2017) quienes estudiaron fugas de una sola fase y tres fases, respectivamente, haciendo uso de la DFC.

Para las investigaciones que utilizan la DFC como método de análisis es muy importante elegir las condiciones de frontera que representen adecuadamente las variables de flujo con las que opera un sistema físico. A pesar de la amplia variedad de condiciones de frontera que ofrecen los códigos de DFC comerciales, hay algunas de ellas que no se consiguen fácilmente en las situaciones de flujo cotidianas, p. ej., imponer un perfil de velocidad uniforme en la entrada de un ducto en el que se da el fenómeno transitorio de una fuga, como lo plantean, Araújo et al. (2014), Sousa et al. (2013) y Tavares et al. (2014), no representa el comportamiento físico del gasto porque cuando se provoca la fuga la resistencia hidrodinámica tiende a disminuir y esto conduce a que en la entrada del ducto se incremente el caudal. Otro aspecto a tener en cuenta en el flujo en tuberías es la longitud de desarrollo, misma que dependiendo del número de Reynolds, puede llegar a ser de 90 veces el diámetro de la tubería (White, 2011).

En el presente trabajo se estudiaron fugas localizadas del flujo homogéneo de dos líquidos en el que la fase disuelta tiene consecuencias directas en el comportamiento del flujo. Se empleó el modelo de mezcla porque toma en cuenta las fuerzas centrífugas y gravitacionales que a su vez producen diferencias de velocidades. Los líquidos de estudio fueron agua y glicerina porque no son inflamables, no son tóxicas, son amigables con el ambiente y se consiguen fácilmente. Otra virtud de la glicerina es que su densidad y viscosidad son similares a las de los crudos pesados lo que conduce a comportamientos hidrodinámicos similares a los de la mezcla de agua y crudo pesado, cabe señalar que el uso de dicha mezcla ayuda a economizar la operación de las bombas.

Se contemplaron dos tipos de mezcla: la mezcla glicerina-agua (el agua es la fase disuelta) y la mezcla agua-glicerina (la glicerina la fase disuelta). Para ambos tipos de mezcla se estudiaron 4 fracciones volumétricas distintas y se contempló una tubería de 50 m de longitud y  $76 \times 10^{-3}$  m de diámetro con 3 distintos diámetros de fuga. Estas variaciones generan un total de 24 escenarios diferentes. El conjunto de simulaciones con el que se cuenta actualmente ya puede ser usada para describir el flujo de una mezcla perfecta de un fluido moderadamente viscoso y agua ante la presencia de una fuga.

En resumen, las contribuciones de la presente investigación radican en que se consideró una mezcla que representa el comportamiento hidrodinámico de la mezcla agua y crudo pesado. Se obtuvieron comportamientos coherentes con la física de las fugas al considerar lo siguiente: en la entrada del ducto la condición de frontera de presión total, en la fuga una condición de frontera que emula la apertura de una válvula y una tubería con un factor de forma,  $L/D$ , mayor a 90 que garantiza que se tenga un flujo completamente desarrollado antes de la fuga.

## 2. MÉTODO

En este trabajo se empleó el paquete computacional ANSYS® Fluent Academic (R19.0) para resolver las ecuaciones que describen el flujo transitorio provocado por una fuga para una mezcla perfecta de agua y glicerina. Mediante el método de volumen finito se resolvieron las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento en promedios de Reynolds junto con el modelo de turbulencia  $k-\epsilon$ . De manera general, el dominio computacional se dividió en pequeños volúmenes de control (puntos nodales) y las ecuaciones señaladas se integraron en cada volumen de control para intervalos de tiempo, resultó un sistema de ecuaciones algebraicas que relacionan puntos nodales con puntos vecinos, luego, el conjunto de ecuaciones algebraicas se resolvió con métodos numéricos recurriendo a condiciones de frontera específicas.

### 2.1 Configuración de la geometría y mado

Para realizar la discretización espacial, primero se generó el modelo geométrico de una tubería de  $76 \times 10^{-3}$  m de diámetro con una fuga. La longitud de la tubería antes y después de la fuga es de 25 m, como se muestra en la Fig. 1 a). Los diámetros de fuga son  $3 \times 10^{-3}$  m,  $6 \times 10^{-3}$  m y  $13 \times 10^{-3}$  m.

Se generó una malla estructurada de poco más de un millón de celdas de tipo hexaedro. Se cuidaron distintos aspectos, entre ellos: que la malla pueda captar el crecimiento de la capa límite, lo que se logró haciendo la malla más fina cerca de las paredes, Fig. 1 b); y en el tamaño de los nodos se fijó un decremento lineal desde el inicio del tubo hasta antes de la fuga y un incremento lineal después de la fuga, esto para reducir el costo computacional sin perder detalles de las zonas en donde pudieran existir cambios drásticos en la dirección de flujo (detalles en las vecindades de la fuga).

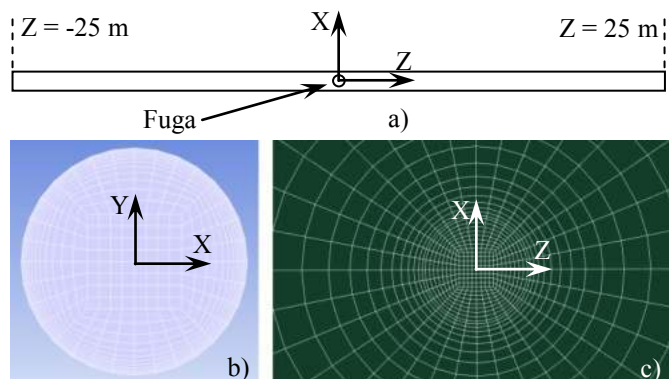


Fig. 1. a) Dimensiones de la geometría. b) Malla estructurada en la dirección transversal de la tubería. c) Malla en la fuga.

### 2.2 Detalles de la solución numérica

Se consideró un dominio computacional tridimensional con precisión doble. Se empleó el método de solución segregado, implícito y, dependiendo de la etapa de la simulación, se consideraron los estados estacionario y transitorio.

Para modelar dos fases perfectamente disueltas se empleó el modelo de mezcla con un esquema implícito para las fuerzas de cuerpo. Es importante mencionar que en el modelo de mezcla se considera a la fase disuelta como partículas esféricas para las que la velocidad de deslizamiento se calculó con el modelo de Manninen y el arrastre de dichas partículas se calculó con el modelo de Schiller-Naumann con un diámetro de  $1 \times 10^{-6}$  m.

Dado que en el presente estudio se investigaron las mezclas glicerina-agua y agua-glicerina, se tuvieron distintos números de Reynolds lo que condujo a distintos regímenes de flujo. Para la mezcla glicerina-agua se empleó el modelo laminar y en los casos relacionados con la mezcla agua-glicerina se fijó el modelo de turbulencia  $k-\epsilon$ .

Se estableció una presión atmosférica de  $77.5 \times 10^3$  Pa (promedio en el laboratorio en el que se tienen algunos experimentos relacionados a este tema) y se consideró que la gravedad actúa en dirección Y con un valor de  $-9,81 \text{ m/s}^2$ . Las propiedades para agua fueron  $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$  y  $\mu = 1.003 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Para la glicerina  $\rho = 1259.9 \text{ kg/m}^3$  y  $\mu = 0.799 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

Antes de iniciar el cómputo, en todos los casos la frontera que posteriormente representó a la fuga se fijó como pared y seguidamente se resolvió el flujo en estado estacionario en una tubería sin fuga. Es importante señalar que las situaciones simuladas se deben de inicializar con la fracción de la mezcla que se estudia. Una vez que se obtuvo la solución del estado estacionario, se prosiguió con la solución transitoria, misma que se dividió en dos etapas. En la primera etapa, en el intervalo de tiempo de 0 s a 0.1 s, se simuló el flujo en la tubería sin fuga. En la segunda etapa, de 0.1 s en adelante, se genera la fuga por medio de la condición de frontera de presión de salida.

El criterio de error en el proceso de cómputo fue  $1 \times 10^{-5}$  en los casos de una sola fase. En los casos con mezcla fue necesario aumentarlo. Las simulaciones tuvieron un paso de tiempo de 0.01 s que conduce a un número Courant de 4.3 para una celda con un tamaño promedio de  $6 \times 10^{-3}$  m por lado.

Las simulaciones requirieron de tiempos de procesamiento relativamente grandes comparados con la duración del transitorio de una falla. Tomó cerca de 1.5 días resolver, en una computadora con un procesador Intel i7-4770S @ 3.1 GHz y 32 GB de RAM, cada variante de simulación.

### 2.3 Condiciones de frontera

En  $Z = -25$  m se especificó la presión total (suma de la presión estática y la presión dinámica) con un valor de  $2.38 \times 10^5$  Pa, la presión estática fue  $2.34 \times 10^5$  Pa, con una intensidad de turbulencia de 3.48% para la mezcla agua-glicerina. En  $Z = 25$  m se especificaron  $1.80 \times 10^5$  Pa de presión estática y una intensidad de turbulencia de 3.48%. En las paredes del tubo, se estableció la condición de no deslizamiento y una rugosidad de 0.00015 m.

La frontera de la fuga, en todos los casos se consideró como una pared para los primeros 0.1 segundos, una vez transcurrido este tiempo dicha frontera se convirtió a una presión de salida en la que la presión estática cambió de acuerdo con la siguiente función (1). Los valores de presión estática que se imponen con dicha función cambian desde la presión manométrica en el centro de la tubería hasta una presión manométrica de cero, esto permite emular la formación de una fuga por medio de una válvula cuya apertura tarda 1 s.

$$p_{fuga} = \begin{cases} 2.07 & [1 \times 10^5 \text{ Pa}] & 0s \leq t < 0.1s \\ 3.63e^{-5.5t} - 0.0086 & [1 \times 10^5 \text{ Pa}] & 0.1s \leq t < 1.1s \\ 0 & [1 \times 10^5 \text{ Pa}] & 1.1s \leq t \end{cases} \quad (1)$$

### 2.4 Validación

Los estimados computacionales se verificaron con el gasto calculado con las correlaciones del factor de fricción de Faning disponibles en Welty (2014). En el caso de la glicerina pura en el que se presenta un flujo laminar, se tuvo un error relativo del 0.5 %; y para el flujo turbulento de agua pura el error relativo fue del 1%.

Dado que no se cuenta con datos experimentales referentes al transitorio de una fuga de la mezcla agua-glicerina, una vez adaptada una instalación experimental se pretende hacer una serie de pruebas con condiciones físicas similares a las presentadas en este reporte.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para las mezclas glicerina-agua y agua-glicerina se presentan a continuación una serie de gráficas en las que aparecen

comportamientos habituales, pero muy importantes, en el flujo transitorio de las fugas.

### 3.2 Mezcla glicerina-agua

#### 3.2.1 Efecto de la fuga sobre la presión de entrada

En la Fig. 2 se presenta la presión estática en la entrada vs. tiempo, salta a la vista la disminución gradual de la presión estática y para entender este comportamiento téngase en cuenta que en el momento en que se provoca la fuga el gasto aumenta debido a que existe una menor resistencia hidráulica, por consiguiente la presión dinámica en la entrada también aumenta, se mencionó en la sección 2.3 que en la entrada se impuso la presión total como condición de frontera, para mantener la presión total constante la presión estática debe disminuir. De cierta manera, el hecho de haber utilizado la presión total como condición de frontera representa una innovación en el estudio de las fugas ya que, p. ej., en el trabajo de Sousa et al. (2013) se utiliza un perfil de velocidad uniforme, mismo que no representa ni emula el comportamiento presión-flujo de una bomba.

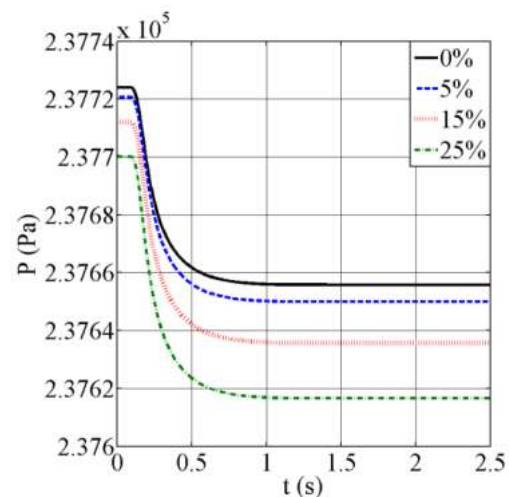


Fig. 2. Mezcla glicerina-agua. Presión estática en la entrada vs. tiempo para las fracciones volumétricas: 0%, 5%, 15% y 25%. Diámetro de la fuga de  $13 \times 10^{-3}$  m.

La Fig. 2 también incluye la variación de la presión estática en la entrada para las distintas fracciones volumétricas estudiadas, estas son: 0%, 5%, 15% y 25%. Nótese que la caída de presión es más fuerte para la fracción volumétrica de 25% que para la fracción volumétrica de 0%, la explicación de este fenómeno radica en que la viscosidad de la mezcla disminuye cuando se disuelve agua en la glicerina. Al ser la mezcla menos viscosa es más fácil que salga por la fuga y esto ocasiona que el caudal de fuga sea mayor para una fracción volumétrica del 25% que la de 0%, Fig. 4. Dado que la presión dinámica está directamente relacionada con el caudal y ya que se impuso que la presión total en la entrada permanezca constante se tiene como consecuencia que la caída de presión estática sea más notoria para la fracción volumétrica de 25% que para la de 0%.

### 3.2.2 Efecto de la fuga sobre el gasto en las fronteras

Un gráfico característico para el transitorio de una fuga es el que se presenta en la Fig. 3, en él se tienen los caudales en la entrada y en la salida del tubo para distintas fracciones volumétricas. Inicialmente se tiene un caudal constante y en  $t = 0.1$  segundos se provoca la fuga, entonces el caudal en la entrada aumenta debido a la reducción de la resistencia hidráulica y el de la salida disminuye por la presencia de la fuga. La Fig. 4 muestra el caudal de fuga, se puede notar que el gasto máximo se da para la mezcla del 25%, es decir, la que tiene la viscosidad más baja. Nótese que a mayor viscosidad de la mezcla se vuelve más difícil detectar una fuga.

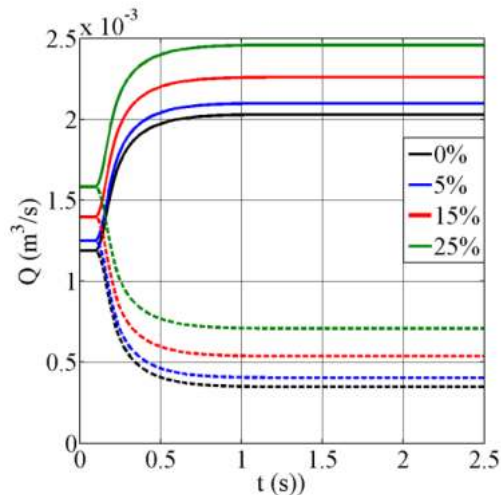


Fig. 3. Mezcla glicerina-agua. Caudales de entrada (línea continua) y de salida (línea punteada) vs. tiempo para las fracciones volumétricas: 0%, 5%, 15% y 25%. Diámetro de la fuga de  $13 \times 10^{-3}$  m.

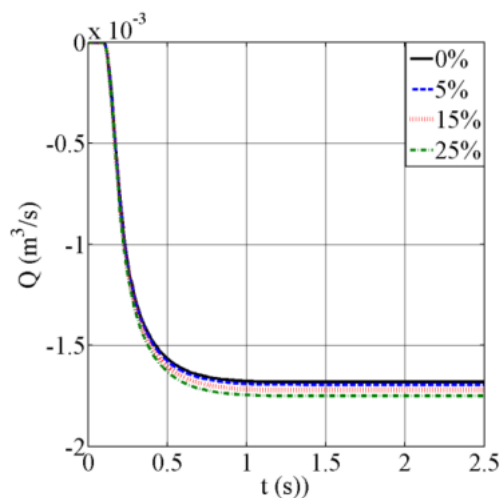


Fig. 4. Mezcla glicerina-agua. Caudal en la fuga vs. tiempo para las fracciones volumétricas: 0%, 5%, 15% y 25%. Diámetro de la fuga de  $13 \times 10^{-3}$  m.

### 3.2.3 Efecto del diámetro de fuga sobre el gradiente de presión

Una vez que el flujo alcanzó un nuevo estado estacionario después de que se generó la fuga, es decir en  $t = 2.5$  s, se graficó para las distintas fracciones volumétricas la presión estática a lo largo del tubo, Fig. 5; se aprecia que cerca de la fuga, es decir cerca de  $Z = 0$ , la pendiente cambia de negativa a positiva y de positiva a negativa, este comportamiento se da porque en la fuga existen fuertes cambios en la dirección del flujo y provoca que la presión dinámica disminuya, a su vez la presión estática aumenta. Este comportamiento ya ha sido descrito por Molina et al. (2013) y lo atribuyen a la pérdida de energía cinética.

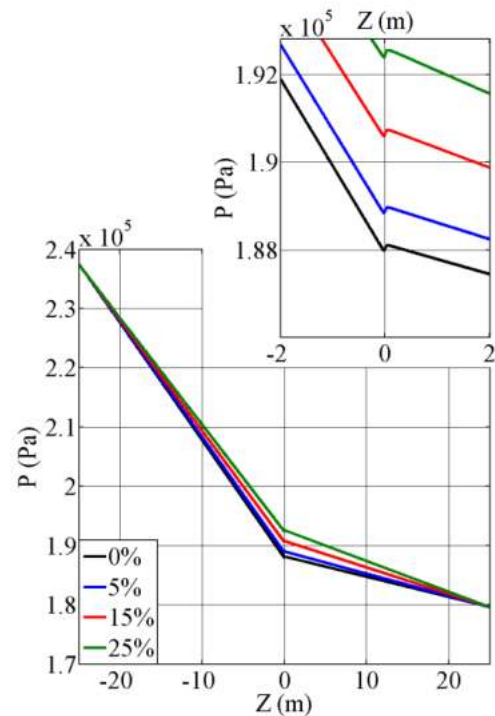


Fig. 5. Mezcla glicerina-agua. Presión estática en el centro del tubo vs.  $Z$  para las fracciones volumétricas: 0%, 5%, 15% y 25%. Diámetro de la fuga de  $13 \times 10^{-3}$  m.

## 3.3 Mezcla agua-glicerina

### 3.3.1 Efecto de la fuga sobre la presión de entrada

En la Fig. 6 se observa que la variación de la presión estática con respecto al tiempo para la fracción volumétrica de 0% es más pronunciada comparada con la fracción volumétrica del 25%, esto se da porque la mezcla con una fracción volumétrica de 25% es más viscosa y propicia un menor gasto de fuga; también es importante notar que la presión estática necesaria para mover al fluido debe ser mayor para la fracción del 25% que para la de 0%.



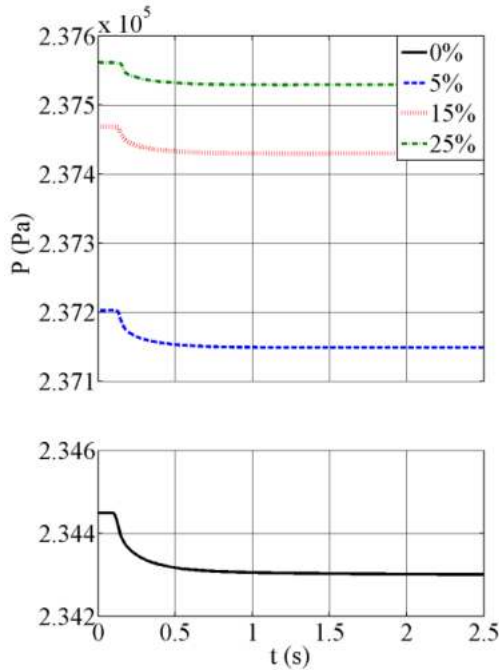


Fig. 6. Mezcla agua-glicerina. Presión estática en la entrada vs. tiempo para las fracciones volumétricas: 0%, 5%, 15% y 25%. Diámetro de la fuga de  $6 \times 10^{-3}$  m.

### 3.3.2 Efecto de la fuga sobre el gasto en las fronteras

En la Fig. 7 se aprecia que la mezcla con menor viscosidad, la que corresponde a una fracción de 0%, es la que presenta un mayor gasto, debido naturalmente a la menor resistencia de flujo.

Para la fracción volumétrica de 5% y los diámetros estudiados, en la Fig. 8 se presenta la relación de la presión de fuga con el gasto de fuga. Se aprecia un comportamiento que no es lineal debido a los cambios en la dirección del flujo cerca de la fuga. Es importante indicar que las curvas  $Q_{\text{fuga}}-P_{\text{fuga}}$  pueden ajustarse adecuadamente mediante un polinomio de grado mayor o igual a 5.

### 3.3.3 Efecto del diámetro de fuga sobre el gradiente de presión

En lo referente a la variación de la presión a lo largo del centro del conducto, Fig. 9 y Fig. 10, se observa que el efecto de la fuga se manifiesta aproximadamente 0.1 m antes de la fuga y persiste a 0.1 m después de la fuga. Este fenómeno se debe al cambio de energía cinética originado por el cambio de la dirección del flujo, en la Fig. 11 se presentan los vectores de velocidad cerca de la fuga, se puede apreciar muy bien que se ha perdido la condición de flujo completamente desarrollado característico del flujo en tuberías.

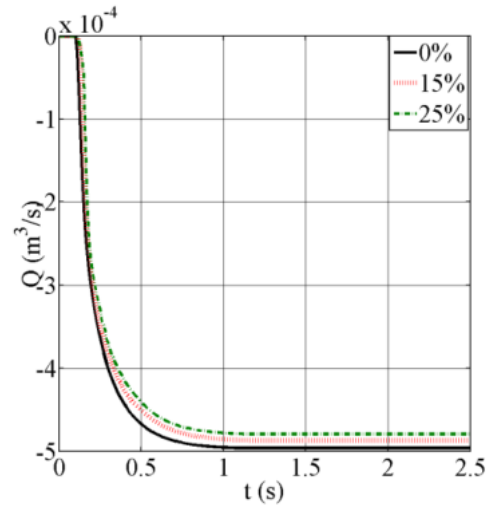


Fig. 7. Mezcla agua-glicerina. Caudal en la fuga vs. tiempo para las fracciones volumétricas: 0%, 15% y 25%. Diámetro de la fuga de  $6 \times 10^{-3}$  m.

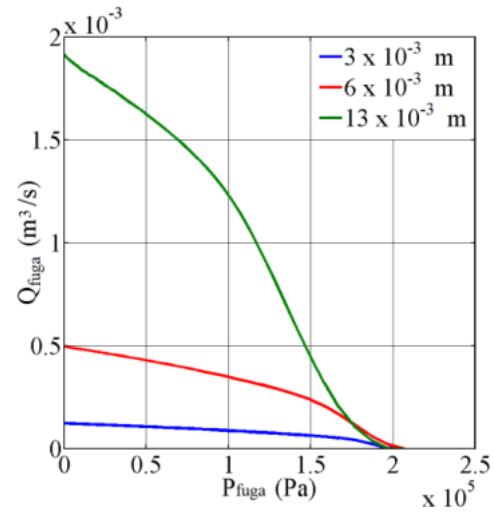


Fig. 8. Mezcla agua-glicerina. Caudal de fuga vs. Presión de fuga para la fracción volumétrica de 5%. Diámetros de la fuga de  $3 \times 10^{-3}$  m,  $6 \times 10^{-3}$  m y  $13 \times 10^{-3}$  m.

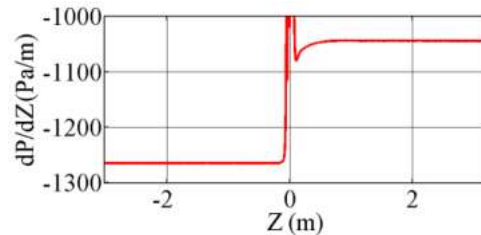


Fig. 9. Gradiente de presión estática ( $dP/dZ$ ) vs.  $Z$  para la fracción volumétrica de 15%. Diámetro de la fuga:  $6 \times 10^{-3}$  m.

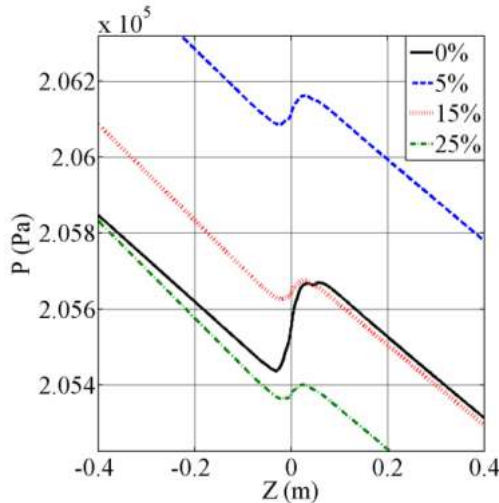


Fig. 10. Mezcla agua-glicerina. Presión estática en el centro del tubo vs. Z para las fracciones volumétricas: 0%, 5%, 15% y 25%. Diámetro de la fuga de  $6 \times 10^{-3}$  m.

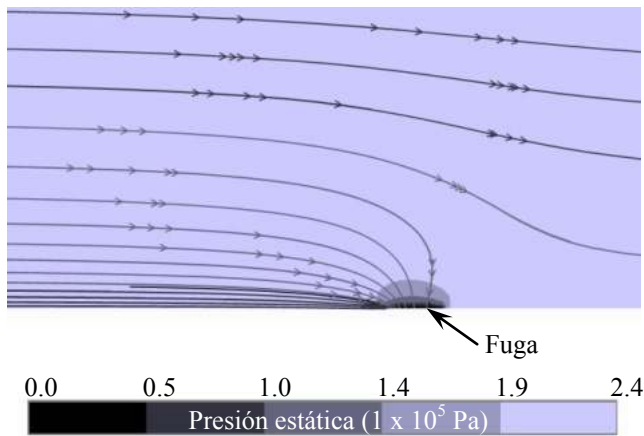


Fig. 11. Contornos de presión estática (Pa) y líneas de corriente cerca de la fuga de  $6 \times 10^{-3}$  m para la mezcla agua-glicerina con una fracción volumétrica de 15%.

#### 4. CONCLUSIONES

La DFC se puede emplear para estimar el caudal de fuga y emular un accidente en regiones donde pueda darse un daño ecológico o social. Además, ANSYS® Fluent Academic (R19.0) reproduce adecuadamente el fenómeno de fugas en tuberías que conducen mezclas perfectas de dos líquidos.

El cambio de pendiente detectado en las curvas de la presión estática como función de la coordenada longitudinal del tubo indica que se pierde la condición de flujo completamente desarrollado.

El gradiente de presión en la dirección longitudinal indica que la fuga tiene un efecto en la presión que se manifiesta en casi 0.2 m del conducto de 50 m.

Para la mezcla glicerina-agua, en las gráficas de presión estática vs. tiempo se aprecia que antes de que se provoque la fuga la presión estática es máxima para la glicerina pura. Esto implica que se puede añadir agua a la glicerina para reducir el costo de operación una bomba.

Para una tubería que conduce únicamente glicerina, se puede usar la mezcla glicerina-agua para mejorar la localización de la fuga ya que con dicha mezcla aumenta el caudal de fuga y tiene implicaciones directas en el gradiente de presión.

#### AGRADECIMIENTOS

Por el apoyo financiero concedido al proyecto 280170 conv 2016-3, los autores expresamos nuestra gratitud al Fondo Sectorial CONACyT-Secretaría de Energía-Hidrocarburos.

#### REFERENCIAS

- ANSYS® Academic, Release 19.0, Help System, Fluent User's Guide, ANSYS, Inc.
- Araújo, M.V. et al. (2014). Hydrodynamic Study of Oil Leakage in Pipeline via CFD. *Adv Mech Eng*, 2014 (170178), nine pages.
- Ben-Mansour, R. et al. (2012). Computational fluid dynamic simulation of small leaks in water pipelines for direct leak pressure transduction. *Comput Fluids*, 57, 110-123.
- Cheng, P. et al. (2018). Application of lattice Boltzmann methods for the multiphase fluid pipe flow on graphical processing unit. *JCMF*, 10 (3), 109-118.
- Ishii, M. (1975). *Thermo-fluid dynamic Theory of Two-phase flow*. Eyrolles, Paris.
- Manninen M. & Taivassalo V. (1996). *On the mixture model for multiphase flow*. VTT, Finland.
- Molina-Espinosa, L. (2013). Modeling of incompressible flow in short pipes with leaks. *J Petrol Sci Eng*, 109, 38-44.
- Santos, W. et al. (2017) Non-isothermal Three-phase Flow in a Circular Cylindrical Duct with Leak: A Numerical Study. *IJMSPI*, 10 (1), 1-10.
- Sousa, J.V.N. et al. (2013). Numerical Analysis of Heavy Oil-Water Flow and Leak Detection in Vertical Pipeline. *ACES*, 3 (1), 9-15.
- Tavares, D. et al. (2014). Evaluation of multiphase flow in the presence of leak in oil pipelines: modeling and simulation. *Defect and Diffusion Forum*, 348, 64-70.
- White, F.M. (2011). *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill, NY.
- Welty, J.R. (2014). *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*, Cap. 13. Wiley.