

Instalación experimental para el ensayo de fugas múltiples en ductos de gas/líquido

Ricardo Lopezlena Estrada Marcos Mondragón Bocanegra Jorge Alamilla Caballero
Instituto Mexicano del Petróleo, Exploración y Producción / Investigación y Posgrado
Eje Central Lázaro Cárdenas Norte 152, Distrito Federal, C.P. 07730
Apdo. Postal 14-805. Tel. +52-9175-7603.
{rlopezle, mmondra, jalami}@imp.mx

Resumen—Se describen pruebas en una instalación con infraestructura de tipo semi-industrial, que permite ensayar experimentalmente, en varias condiciones de gasto, presión y temperatura, 8 puntos de fugas individual, simultáneas y/o seriadas y con gastos variables, distribuidas a lo largo de un circuito experimental de tubería de 176 [m] de longitud y 2 [pg] de diámetro, cuyo fluido transportado puede consistir de gas, líquido o su combinación bifásica. Mientras que el líquido (Exxsol D80 y/o agua) es impulsado por un sistema de bombeo convencional, el gas (nitrógeno) es impulsado por un sistema de compresión industrial integrado al Lazo Multifásico de Pruebas incluido en la infraestructura del Laboratorio de Producción de Hidrocarburos del Instituto Mexicano del Petróleo. Los ensayos experimentales han sido automatizados. En particular, sus ocho puntos de fugas pueden ser actuados remotamente y los datos provenientes de los instrumentos de campo son coleccionados por un sistema de control distribuido (SCD) que los despliega con interfaces gráficas de diseño propio. La conexión externa al SCD se realiza empleando tecnología OPC. El ducto experimental ha sido empleado para probar tecnología de detección, localización y cuantificación de fugas y tomas clandestinas para ductos de transporte de los hidrocarburos mencionados.

Palabras Clave— Pipelines, Automatic test generation, Process automation, leak detection systems, Process equipment, Process simulators, Fault diagnosis, Fault location, Diagnóstico de fallas, Sistemas de detección de fugas.

I. INTRODUCCIÓN

Comparado con cualquier otro medio de transporte de hidrocarburos, los ductos son el medio más económico y seguro tanto para *aceite crudo*, LNG, LPG, gasolina, gasóleo (*diesel*) y otros productos. Para poder transportar estos productos a grandes distancias, los ductos deben satisfacer los más altos requerimientos de seguridad, confiabilidad y eficiencia operacional. Sin embargo, los riesgos en seguridad tanto para la población adyacente, el medio ambiente y también para las instalaciones de distribución, derivados de *derrames* y la problemática de *fugas y tomas clandestinas*, son objeto de gran preocupación para la industria de transporte de hidrocarburos en ductos. Por ello, los *Sistemas de Detección, Localización y Cuantificación de Fugas* (SDLCF) se han convertido con los años, en un aspecto muy relevante en la tecnología de ductos de transporte de hidrocarburos, hasta el punto que en algunos

países existen *prácticas recomendadas* para su evaluación y operación industrial (API, 1995). Y aunque existe una *amplia lista* bibliográfica de técnicas de diagnóstico (Billmann and Isermann, 1987; Scott and Barrufet, 2003), *muy pocas* técnicas superan la *prueba de fuego* de la ejecución práctica en campo, que justifique su escalamiento industrial. Generalmente, antes de probar el desempeño de una tecnología y proponer su escalamiento en las redes reales de *poliductos* (*i.e.* transporte multi-producto en *baches*), se requiere de la realización de pruebas intensivas de desempeño a nivel de laboratorio durante el desarrollo y depuración del código que implanta dicha tecnología. El *Laboratorio de Producción de Hidrocarburos (LPH)*, con superficie de 540 [m²], se ubica en el Centro IMP La Reforma (próximo a Pachuca, Hidalgo) y cuenta con un *circuito o lazo de pruebas multifásico*, útil para la evaluación de tecnología de instrumentos de medición, simulación, control y optimación de los procesos de producción y transporte de hidrocarburos. Entre sus funciones

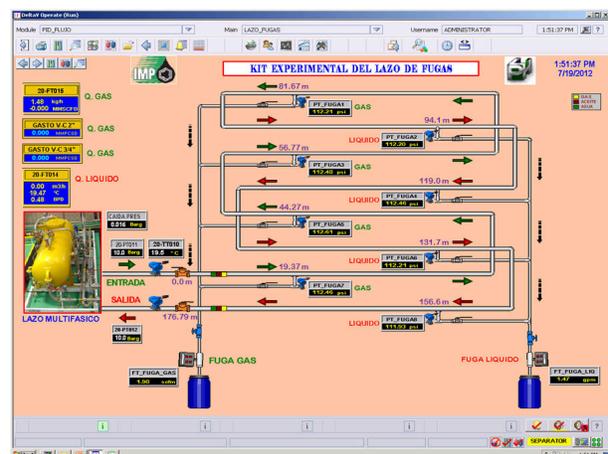


Imagen: M. I. Jorge Alamilla C., LPH, Centro IMP, La Reforma, Hgo.

Figura 1. Interfaz gráfica de usuario en el SCD DeltaV para operar el Ducto Experimental para simulación de Fugas Múltiples del IMP.

se incluyen la realización de ensayos experimentales y de laboratorio relacionadas al aseguramiento de la producción de hidrocarburos tanto en fase líquida como en fase gas, o para *mezclas multifásicas*.

Recientemente, el LPH-IMP completó los primeros ensayos de su *Ducto de ensayo Experimental para Simulación de Fugas Múltiples (DESFM)*, vea la Figura 1.

En la bibliografía hay descritas varias instalaciones experimentales de relativamente bajo costo para detección de fugas, generalmente restringidas al uso de agua (Wang *et al.*, 1993; Silva *et al.*, 1996). También se conoce de dos instalaciones experimentales en Centros de Investigación Mexicanos, en el Instituto de Ingeniería UNAM (Verde, 2001) y en el Cinvestav Guadalajara (Torres-Ortiz, 2011), ambos para agua. Sólo unas cuantas instalaciones fueron consideradas para detectar fugas de hidrocarburos (Siebert and Isermann, 1977), y de ellas, con excepción de (Watanabe *et al.*, 1993), no se conoce de instalaciones experimentales para ensayos con gas, probablemente debido al costo que implica. Más aún, aunque existen algunas instalaciones para simulación de flujo multifásico en ductos, *v. gr.* el *Laboratorio de Flujo Multifásico del SINTEF*, Noruega (Norris *et al.*, 1985), el costo del servicio de estas instalaciones es muy alto para usarlas en pruebas de tecnología de SDLCF. Por otro lado, en el estado actual de la tecnología en SDLCF, la problemática de fugas múltiples y/o simultáneas es todavía una línea de investigación sin resolver con las técnicas analíticas basadas en datos de campo e implantadas en software.

El objetivo de este documento es describir el diseño, funciones y operación del DESFM, para evaluar el desempeño de tecnologías de SDLCF en términos de *sensibilidad* (umbral de detección de fuga *v.s.* tiempo de diagnóstico), *confiabilidad* (repetibilidad de diagnóstico), *precisión* (tanto en cuantificación como en localización) y *robustez*, mediante ensayos experimentales que además permiten determinar su comportamiento ante fugas múltiples y secuenciales, facilitando el desarrollo y depuración de dichas tecnologías. El documento se encuentra organizado como sigue: En la sección II se describen en terminos generales las instalaciones del lazo de prueba multifásico del LPH, del cual el DESFM forma parte. En las secciones III y IV se especifican las características del ducto experimental. En las secciones V y VI se describen los ensayos de fugas realizadas en el DESFM-IMP empleando Exxsol D80 y Nitrógeno respectivamente. En la sección VII se discuten los resultados bajo la óptica del método de balances. En la sección VIII se concluye y se discute el trabajo futuro.

II. EL LAZO DE PRUEBAS MULTIFÁSICAS DEL LPH

Para llevar a cabo sus funciones, el LPH cuenta con un lazo de prueba multifásico que incluye el siguiente equipamiento (AS, 2003):

- 1) *Unidad de Compresión Hanover* tipo tornillos helicoidales, presión de succión 95.0 [lb/pg²], presión de descarga 200.0 [lb/pg²]. Volumen manejado 0.1- 2.1 [mm³].
- 2) *Equipo de bombeo* con capacidad de hasta 3500.0 [bpd] para aceite y de hasta 2500.0 [bpd] para agua.

- 3) *Separador trifásico Framo (con pierna de nivel) /Lazo multifásico*: Presión de operación 7.0-14.0 [kg/cm²]. Línea de transporte multifásico de 3 [pg], instrumentación inteligente *Fieldbus Foundation*, flujómetros para líquido Coriolis de 2 [pg] y Coriolis de 1 [pg], y para gas: V-Cone 2 [pg] y 3/4 [pg], Coriolis de 2 [pg] y Coriolis de 1 [pg]. Fase gas: Nitrógeno, fase aceite: Exxsol D80, 793 [kg/m³], fase agua: agua fresca, 997 [kg/m³].
- 4) *Instrumentación* (transmisores de presión, presión diferencial, temperatura, flujómetros, *etc.*).
- 5) *Ducto ascendente (riser)* para estudio de mezclas multifásicas en tuberías verticales, caracterización hidrodinámica y control del *slug severo*.
- 6) *Sistema de Control Distribuido (SCD) Delta-V* (™Emerson).
- 7) *El ducto de ensayo experimental para simulación de fugas múltiples (DESFM)*.

III. CARACTERISTICAS DEL DUCTO EXPERIMENTAL

Derivado del hecho que las instalaciones del LPH pueden manejar agua, aceite (Exxsol D80) y gas (Nitrógeno) en condiciones controladas de presión y velocidad por el SCD Delta-V, el ducto experimental conectado al lazo multifásico de pruebas del LPH, puede emplear líquido, gas o una combinación de ambos para la ejecución de sus simulaciones experimentales (suponiendo ocurrencia de fugas en una sola fase). En la Tabla I se presenta una lista de ensayos factibles de realizar en el ducto experimental del IMP.

El diseño del ducto experimental incluye lo siguiente:

TABLA I
ENSAYOS EXPERIMENTALES FACTIBLES EN EL DUCTO EXPERIMENTAL DE SIMULACIÓN DE FUGAS LPH-IMP

Ensayo Experimental	Fluido de operación			Cambio de condiciones de operación	
	Exxsol D80	Nitrógeno	Agua	ΔQ Nominal	ΔQ Fuga
Variación transitoria de condiciones del ducto sin fugas	✓	✓	✓	✓	×
Detección, localización o cuantificación en 4 × 2 localizaciones distintas	✓	✓	✓	✓	✓
Eventos de dos fugas simultáneas o aditivas	✓	✓	✓	✓	✓
Eventos de fugas secuenciales o seriadas	✓	✓	✓	✓	✓

- 1) *Un segmento protegido*, que consiste de una sección de tubería (serpentín) de 176 [m] cuyos extremos cuentan con medición de gasto volumétrico, presión y temperatura; y proporciona lecturas de presión en sus puntos intermedios. El segmento protegido se encuentra acoplado al Lazo Multifásico de Pruebas, que impulsa los fluidos a través de éste y proporciona las mediciones de las variables físicas requeridas, vea la Figura 1.
- 2) *Acoplamiento del ducto experimental al Lazo Multifásico de Pruebas* usando dos mangueras flexibles

bridadas de 2.0 [pg] en acero inoxidable para 300 [lb/pg²].

- 3) Con el objeto de simular la ocurrencia de fugas en el segmento protegido, en varios puntos intermedios (*puntos de fuga*) son colocados un arreglo de válvulas de derivación que conducen a un par de flujómetros (líquido o gas según sea el tipo de fluido transportado) con lo cual es posible estudiar la ocurrencia de hasta dos fugas simultáneas. Los puntos de fuga se encuentran dispuestos físicamente en forma vertical de manera que sean accesibles para el operador, que remotamente desde el cuarto de control, accionaría el arreglo de válvulas de derivación.
- 4) La instrumentación del ducto experimental se complementa con el sistema computacional de monitoreo y control que permite registrar y visualizar el comportamiento transitorio del ducto (serpentín) durante la ocurrencia fenomenológica de fugas simuladas cuantificables, en la forma de gráficas de tendencias de los perfiles de presión, temperatura y gasto volumétrico, así como sus registros en base de datos y reportes históricos. La instrumentación es interrogada por el sistema de monitoreo con señales continuas (analógicas) de 4-20 [mA].
- 5) Los equipos de cómputo externos, *con la tecnología SDLCF bajo prueba*, pueden acceder en tiempo real (via Ethernet) a los datos del SCD Delta-V empleando el estándar industrial de comunicación OPC (*Object-Link-Embedding for Process Control*).

Independientemente de la fase del fluido empleado, la evaluación experimental de un evento de fuga consiste de la siguiente secuencia de operaciones en el lazo:

- 1) Conexión del segmento protegido, purgado y arranque del Lazo Multifásico de Pruebas en condiciones de flujo y presión especificadas. Se debe verificar que no existan fugas en las conexiones. También se debe verificar que las lecturas provenientes de la instrumentación arroje valores consistentes.
- 2) Bajo instrucciones del operador en el sistema de monitoreo el sistema abre automáticamente, uno o dos válvulas en el arreglo de válvulas de derivación, en un porcentaje de apertura (o gasto volumétrico) predefinido.
- 3) El evento de apertura es registrado por el sistema de monitoreo así como el tiempo de respuesta transitorio del segmento protegido.
- 4) Bajo instrucciones del operador en el sistema de monitoreo, se cierran automáticamente las válvulas abiertas en el arreglo de válvulas de derivación.
- 5) Los incisos 2), 3) y 4) son repetidos secuencialmente tantas veces sea necesario en diferentes condiciones de operación, diferentes valores de gastos de fluidos fugados y en las diferentes localizaciones de cada punto de fuga.
- 6) Drenar el segmento protegido al concluir la operación.

IV. ESPECIFICACIONES DE LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE EXTRACCIÓN DEL DESFM-IMP

En la Figura 2 se presentan las localizaciones de los puntos de extracción del DESFM-IMP que corresponden a los puntos especificados en la Tabla II. En las siguientes

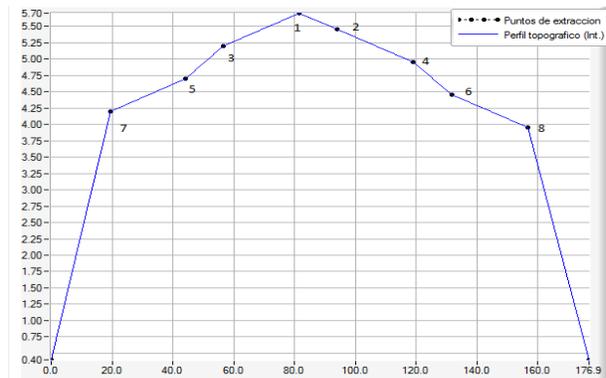


Figura 2. Localización de los puntos de extracción de fluidos (fugas).

TABLA II
LOCALIZACIONES DE PUNTOS DE EXTRACCIÓN Y TRANSMISORES DE PRESIÓN INTERMEDIOS DEL DESFM-IMP

Medición 1 de fluido extraído			Medición 2 de fluido extraído		
Dist. [m]	Elev. [m]	Transmisor Tag	Dist. [m]	Elev. [m]	Transmisor Tag
0.0	0.4	Entrada	176.9	0.4	Salida
19.37	4.2	PTF-7	156.6	3.95	PTF-8
44.27	4.7	PTF-5	131.7	4.45	PTF-6
56.77	5.2	PTF-3	119.0	4.95	PTF-4
81.67	5.7	PTF-1	94.1	5.45	PTF-2

secciones se presentan brevemente los resultados de simulación en tres modalidades de fugas:

- *Fugas individuales*: Del conjunto de posibles puntos de fuga (en la Tabla II), se selecciona secuencialmente una de ellas y se abre y cierra respetando un intervalo de tiempo preestablecido. El propósito de esta clase de fuga es contar con información para evaluar la *precisión* tanto en cuantificación de fuga como en localización de fuga, así como evaluar la *sensibilidad* del diagnóstico de fuga.
- *Fugas simultáneas*: Del conjunto de posibles puntos de fuga (en la Tabla II), se seleccionan dos localizaciones diferentes y se abren y cierran simultáneamente respetando un intervalo de tiempo preestablecido. El propósito de esta clase de fuga es tratar de *eludir o engañar* tanto al algoritmo de cuantificación de fuga como al de localización de fuga.
- *Fugas secuenciales/seriadas*: Del conjunto de posibles puntos de fuga (en la Tabla II), se selecciona secuencialmente una de ellas y se abre respetando un intervalo de tiempo preestablecido. Posteriormente, se selecciona una segunda localización y mientras esta última localización se abre, se cierra la anterior. Como

en el caso anterior, el propósito de esta clase de fuga es tratar de eludir o engañar tanto al algoritmo de cuantificación de fuga como al de localización de fuga.

V. ENSAYOS DE FUGAS EN EL DESFM-IMP CON EL HIDROCARBURO EXXSOL D80

Los ensayos de fugas en el DESFM-IMP con el hidrocarburo Exxsol D80 (TMExxonMobil) se realizaron el 27 de Noviembre, 2012, como se describe a continuación:

- 1) *Ensayo de fugas individuales con Exxsol D80*: Consistió en abrir y cerrar secuencialmente la válvula asociada a una de las cuatro localizaciones definidas para líquido, especificados en la Tabla II, como se muestra en la Tabla III, donde se presentan esquemáticamente

TABLA III

ENSAYO DE FUGAS INDIVIDUALES CON EXXSOL EN EL DESFM-IMP, Nov. 27, 2012

Condiciones de operación		Localización de fuga ¹ en [m]				Condición de fuga		
Gasto [bpd]	Vel. bomba [rpm]	PTF-2 94.1	PTF-4 119.0	PTF-6 131.7	PTF-8 156.6	Tiempo [s]	Gasto [gpm]	Relativo ⁴ %
575	500	(1)	(2)	(3)	(4)	10	2.0	12.0
1143	1000	(5)	(6)	(7)	(8)	15	1.5	4.5
1690	1500	(9)	(10)	(11)	(12)	20	1.0	2.0
2210	2000	(13)	(14)	(15)	(16)	25	0.5	0.78
575	500	(17)	(18)	(19)	(20)	25	0.5	3.0

¹El valor entre paréntesis indica el orden secuencial de ejecución. ⁴Magnitud de fuga relativa al gasto nominal.

las condiciones de operación y la forma como se desarrollaron los ensayos de fugas individuales con Exxsol en el DESFM-IMP. Los resultados obtenidos fueron graficados en la Figura 3, a partir de los datos adquiridos por el SCD Delta-V del LPH.

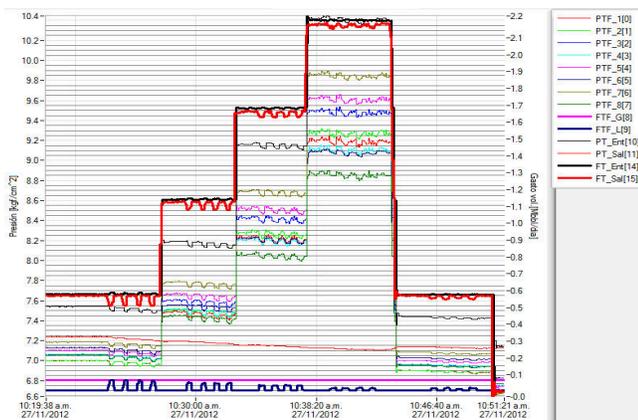


Figura 3. Resultados del ensayo del ducto experimental con fugas individuales de líquido.

- 2) *Ensayo de fugas simultáneas con Exxsol D80*: Con base en la secuencia de apertura y cierre de válvulas especificada en la Tabla IV, los datos adquiridos por el SCD son graficados en la Figura 4.
- 3) *Ensayo de fugas secuenciales/seriadas con Exxsol D80*: Con base en la secuencia de apertura y cierre de válvulas especificada en la Tabla V, los datos adquiridos por el SCD se grafican también en la Figura 4.

TABLA IV

ENSAYO DE FUGAS SIMULTÁNEAS CON EXXSOL EN EL DESFM-IMP, Nov. 27, 2012

Condiciones de operación		Localización de fuga ¹ en [m]				Condición de fuga		
Gasto [bpd]	Vel. Bomba [rpm]	PTF-2 94.1	PTF-4 119.0	PTF-6 131.7	PTF-8 156.6	Tiempo [s]	Gasto [gpm]	Relativo ⁴ %
575	500	(1)	×	(1)	×	20	1.0	6.0
575	500	×	(2)	×	(2)	20	1.0	6.0
575	500	(3)	×	×	(3)	20	1.0	6.0
575	500	×	(4)	(4)	×	20	1.0	6.0
1690	1500	(5)	×	(5)	×	20	1.0	2.0
1690	1500	×	(6)	×	(6)	20	1.0	2.0
1690	1500	(7)	×	×	(7)	20	1.0	2.0
1690	1500	×	(8)	(8)	×	20	1.0	2.0

¹El valor entre paréntesis indica el orden secuencial de ejecución. ⁴Magnitud de fuga relativa al gasto nominal.

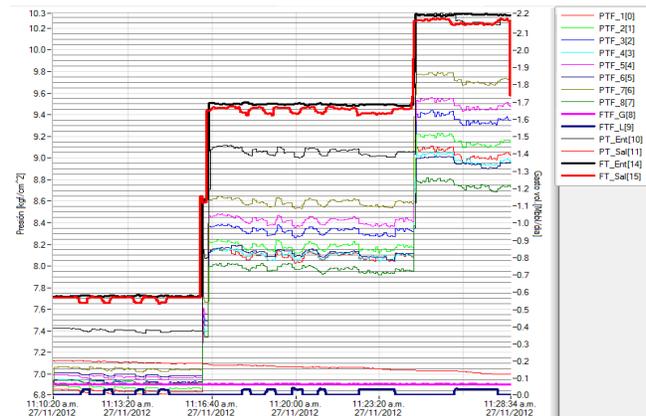


Figura 4. Resultados del ensayo del ducto experimental con fugas simultáneas y secuenciales/seriadas.

VI. ENSAYOS DE FUGAS EN EL DESFM-IMP CON NITRÓGENO

Los ensayos de simulación de fugas en el DESFM-IMP con Nitrógeno se realizaron el 10 de Diciembre, 2012. Para este propósito, se inició el separador con una presión interior de 8.5 [barg] \approx 123.3 [lb/pg²] y se procedió a suministrar diferentes gastos de Nitrógeno sin fugas (vea la Figura 5), con el objeto de determinar el rango de gastos en los cuales es posible realizar las simulaciones de fugas posteriores. Con lo anterior, se determinó que el mejor desempeño del control del compresor se presenta dentro de un rango de apertura inferior al 45% en la válvula Fisher, por lo cual todas las pruebas con gas se realizaron con presiones inferiores al 40% de apertura, resultando en gastos dentro del rango 0.3-0.6 [mm³/scd].

El comportamiento transitorio del ducto transportando gas es muy diferente al mismo ducto transportando líquido, como se aprecia en los siguientes ensayos:

- 1) *Ensayo de fugas individuales con gas Nitrógeno*: Consistió en abrir y cerrar secuencialmente la válvula asociada a una de las cuatro localizaciones definidas para gas, especificados en la Tabla II, como se muestra en la Tabla VI, donde se presentan esquemáticamente las condiciones de operación y la forma como se desarrollaron los ensayos de fugas individuales. Los

TABLA V

ENSAYO DE FUGAS DE LOCALIZACIÓN SECUENCIAL/SERIADA CON EXXSOL EN EL DESFM-IMP, NOV. 27, 2012

Condiciones de operación		Localización de fuga ¹ en [m]				Condición de fuga		
Gasto [bpd]	Vel. bomba [rpm]	PTF-2 94.1	PTF-4 119.0	PTF-6 131.7	PTF-8 156.6	Tiempo [s]	Gasto [gpm]	Relativo ⁴ %
1690	1500	(9)	×	×	×	20	1.0	2.0
1690	1500	(10)	(10)	×	×	20	1.0	2.0
1690	1500	×	(11)	(11)	×	20	1.0	2.0
1690	1500	×	×	(12)	(12)	20	1.0	2.0
2210	2000	(13)	×	×	×	20	1.0	1.6
2210	2000	(14)	(14)	×	×	20	1.0	1.6
2210	2000	×	(15)	(15)	×	20	1.0	1.6
2210	2000	×	×	(16)	(16)	20	1.0	1.6
2210	2000	×	×	×	(17)	20	1.0	1.6

¹ El valor entre paréntesis indica el orden secuencial de ejecución. ⁴ Magnitud de fuga relativa al gasto nominal.

TABLA VI

ENSAYO DE FUGAS INDIVIDUALES CON NITRÓGENO EN EL DESFM-IMP, DIC. 10, 2012

Condiciones de operación				Localización de fuga ² en [m]				Cond. de fuga		
Gasto ¹ [MMPCSD]		% Aper. vál.		PTF-1 81.67	PTF-3 56.77	PTF-5 44.27	PTF-7 19.37	Tiempo [s]	Gasto ³ [SCFM]	Relativo ⁴ %
0.340	0.340	0.337	20	(1)	×	×	×	180	5.97	2.53
0.341	0.344	0.344	20	×	(2)	×	×	180	4.79	2.02
0.343	0.344	0.342	20	×	×	(3)	×	180	8.40	3.52
0.345	0.349	0.338	20	×	×	×	(4)	180	11.53	4.81
0.504	0.506	0.493	30	(5)	×	×	×	180	11.31	3.23
0.509	0.518	0.510	30	×	(6)	×	×	180	4.72	1.34
0.507	0.505	0.508	30	×	×	(7)	×	180	8.40	2.39
0.513	0.506	0.504	30	×	×	×	(8)	180	11.8	3.31

¹ Gastos nominales medidos con 3 flujómetros: V-Cone (VC), Endress&Hauser (E-H) y Micromotion (Mm) expresado en condiciones estándar (1 [atm] y 15 °C). ² El valor entre paréntesis indica el orden secuencial de ejecución. ³ Gasto de fuga medido con flujómetro Dwyer. ⁴ Magnitud de fuga relativa al gasto nominal.

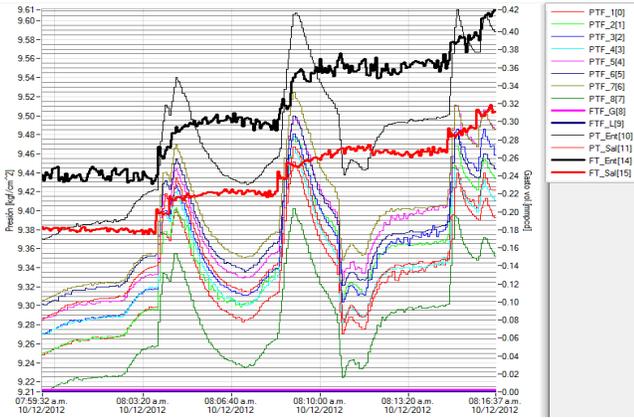


Figura 5. Prueba transitoria sin fugas del ducto experimental transportando Nitrógeno (gastos de gas en [mmpcsd]).

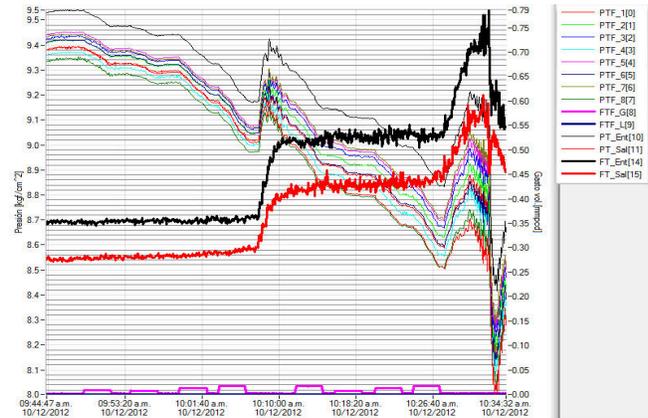


Figura 6. Resultados del ensayo con gas del ducto experimental con fugas individuales (gastos de gas en [mmpcsd]).

datos adquiridos por el SCD son graficados en la Figura 6.

- 2) *Ensayo de fugas simultáneas con gas Nitrógeno:* Con base en la secuencia de apertura y cierre de válvulas especificada en la Tabla VII, los datos adquiridos por el SCD son graficados en la Figura 7.
- 3) *Ensayo de fugas secuenciales/seriadas con gas Nitrógeno:* Con base en la secuencia de apertura y cierre de válvulas de la Tabla VIII, en la Figura 8 se grafican los datos adquiridos por el SCD.

VII. EL MÉTODO DE BALANCE DE MASA/VOLUMEN

El método de balance de masa/volumen, atribuido a T. Dupont y H. Rachford (Nicholas, 1987) es válido para redes de ductos. Suponga la preservación de la ecuación de masa en forma integral aún con la existencia de una fuga con gasto másico Q_m^{fuga} en algún punto indeterminado a lo largo de un ducto. La ecuación balance de masa en forma integral se expresa como $\frac{dm_{ducto}}{dt} = Q_m^{entrada} - Q_m^{salida} - Q_m^{fuga}$, por lo cual, la masa fugada total en el intervalo de tiempo $[0, t]$ está dada como $m_{fuga} = \int_0^t Q_m^{fuga} dt$, donde Q_m^{fuga} se obtiene de despejar la ecuación anterior, agrupada como:

$$Q_m^{fuga} = \underbrace{(Q_m^{entrada} - Q_m^{salida})}_{\text{Balance de gastos } (Q_B)} - \underbrace{dm_{ducto}/dt}_{\text{Tasa de empaque } (P_k)}$$

Tasa de balance (V_B)

La tasa de empaque P_k o empaque incluye efectos transitorios de *compresibilidad volumétrica* del fluido y de *elasticidad del material* del ducto y se determina empleando *modelos transitorios*. Sea $\Theta \in \mathbb{R}^+$ una *cota de detección* en un horizonte de tiempo definido como $[t_0, t_1]$, $t_1, t_0 \in \mathbb{R}^+ | t_1 > t_0$. Entonces se diagnostica un evento de fuga si se satisface que $\frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_1} V_B dt > \Theta$, $\Delta t \stackrel{\text{def}}{=} t_1 - t_0$. Mas aún, la incertidumbre cuadrada de V_B está dada por $(\Delta V_B)^2 \stackrel{\text{def}}{=} (\Delta Q_B)^2 + (\Delta P_k)^2$ indicando que la incertidumbre cuadrada del diagnóstico (y de cuantificación) de fuga depende aditivamente de los cuadrados de la *incertidumbre de medición* ΔQ_B y la *incertidumbre del modelo* ΔP_k .

En todos los ensayos mostrados se emplearon flujómetros másicos. El balance de gastos Q_B de las Figuras (3)-(4) permite apreciar fugas cuantificables en el rango de 0.78% – 12.0% con respecto al gasto nominal (por tratarse de líquido y un ducto relativamente corto, $P_k \approx 0$). El *verdadero reto de detección de fugas* parece encontrarse en el transporte de gas, ya que los desbalances por fugas en el rango de 1.34% – 4.8% (c. r. gasto nominal) en las Figuras (6)-(7)-(8) son casi indistinguibles (excepto en las curvas de presión). Claramente $P_k > 0$ debido a los efectos transitorios de compresibilidad del gas, justificando la *necesidad de usar modelos transitorios* para calcular P_k .

TABLA VII
ENSAYO DE FUGAS SIMULTÁNEAS CON NITRÓGENO EN EL
DESFM-IMP, DIC. 10, 2012

Condiciones de operación				Localización de fuga ² en [m]				Condición de fuga		
VC	Gasto ¹ [MMPCSD] E&H	Mm	% Apert. válv.	PTF-1 81.67	PTF-3 56.77	PTF-5 44.27	PTF-7 19.37	Tiempo [s]	Gasto ³ [SCFM]	Relativo ⁴ %
0.359	0.364	0.358	20	(1)	×	(1)	×	180	11.73	4.7
0.360	0.370	0.360	20	×	(2)	×	(2)	180	11.60	4.64
0.366	0.368	0.363	20	(3)	×	×	(3)	180	11.60	4.56
0.370	0.374	0.366	20	×	(4)	(4)	×	180	11.53	4.49
0.541	0.538	0.541	30	(5)	×	(5)	×	180	11.25	2.99
0.550	0.543	0.545	30	×	(6)	×	(6)	180	11.38	2.90
0.547	0.548	0.543	30	(7)	×	×	(7)	180	11.38	2.99
0.555	0.556	0.550	30	×	(8)	(8)	×	180	11.66	3.02

¹ Gastos nominales medidos con 3 flujómetros: V-Cone (VC), Endress&Hauser (E-H) y Micromotion (Mm) expresado en condiciones estándar (1 atm) y 15 °C). ² El valor entre paréntesis indica el orden secuencial de ejecución. ³ Gasto de fuga medido con flujómetro Dwyer. ⁴ Magnitud de fuga relativa al gasto nominal.

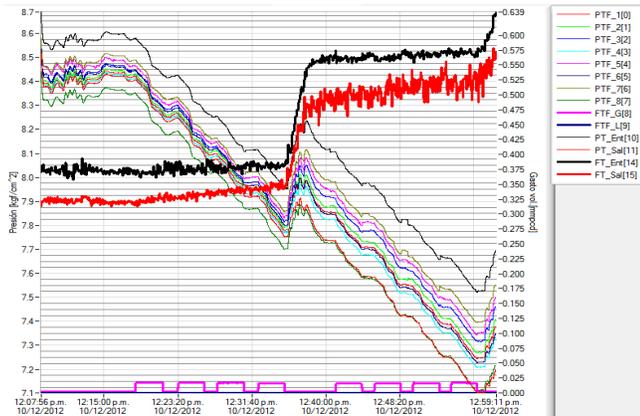


Figura 7. Resultados del ensayo con gas del ducto experimental con fugas simultáneas (gastos de gas en [mmpcsd]).

VIII. CONCLUSIONES

Hasta donde los autores conocen, las instalaciones del DESFM (LPH-IMP) son las únicas, actualmente accesibles a nivel nacional, capaces de proporcionar todos los servicios de ensayos experimentales y de laboratorio descritos en este documento.

Se espera que el DESFM facilite la evaluación futura de tecnologías de SDLCF desarrolladas en el IMP y en otros Centros de Investigación. De particular interés son las fugas múltiples, simultáneas y/o aditivas, debido a que constituyen problemas de relevancia práctica.

Finalmente, puesto que con la misma infraestructura es posible producir baches intermitentes aceite-nitrógeno-agua, el DESFM puede evaluar tecnología SDLCF con seguimiento de baches multiproducto para poliductos.

Agradecimientos: Los autores agradecen a A. Lopez Lena E. (IMP) por verificar el desempeño del diseño del DESFM en simulación numérica y a G.K.A. Ballhausen D. por el desarrollo de código en LabWindows/CVI (™ National Instruments) de varias interfaces para la comunicación OPC y por su asistencia durante los ensayos.

REFERENCIAS

API (1995). "Evaluation methodology for software based leak detection systems". American Petroleum Inst., API 1155 (repl. API RP 1130). AS, Framo Engineering (2003). Operator Training Course IMP Multiphase Test Loop. Mexico City, June.

TABLA VIII
ENSAYO DE FUGAS DE LOCALIZACIÓN SECUENCIAL/SERIADA CON
NITRÓGENO EN EL DESFM-IMP, DIC. 10, 2012

Condiciones de operación				Localización de fuga ² en [m]				Condición de fuga		
VC	Gasto ¹ [MMPCSD] E&H	Mm	% Apert. válv.	PTF-1 81.67	PTF-3 56.77	PTF-5 44.27	PTF-7 19.37	Tiempo [s]	Gasto ³ [SCFM]	Relativo ⁴ %
0.414	0.398	0.372	20	(9)	×	×	×	60	11.38	3.9
0.411	0.396	0.382	20	(10)	(10)	×	×	60	11.25	3.8
N/D	N/D	N/D	20	×	(11)	(11)	×	60	12.0	N/D
N/D	N/D	N/D	20	×	×	(12)	(12)	60	12.0	N/D
N/D	N/D	N/D	20	×	×	×	(13)	60	12.0	N/D
0.562	0.549	0.557	30	(14)	×	×	×	60	12.0	2.9
0.560	0.563	0.560	30	(15)	(15)	×	×	60	12.0	2.98
0.562	0.563	0.557	30	×	(16)	(16)	×	60	12.0	2.95
0.564	0.569	0.556	30	×	×	(17)	(17)	60	11.52	2.94
0.563	0.577	0.567	30	×	×	×	(18)	60	11.46	2.93

¹ Gastos nominales medidos con 3 flujómetros: V-Cone (VC), Endress&Hauser (E-H) y Micromotion (Mm). ² El valor entre paréntesis indica el orden secuencial de ejecución. ³ Valor de gasto de fuga ajustado manualmente de la carátula del flujómetro Dwyer. ⁴ Magnitud de fuga relativa al gasto nominal. N/D= Dato no disponible.

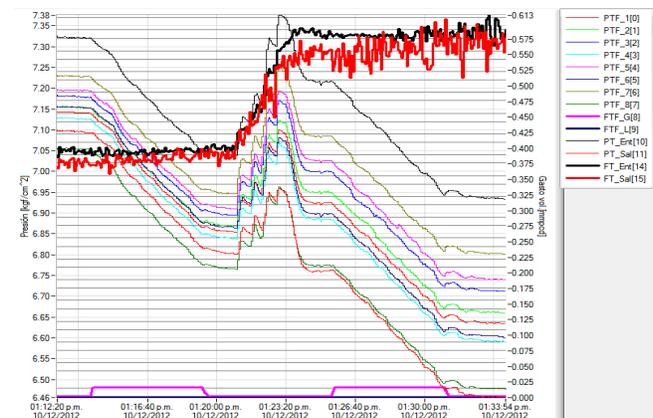


Figura 8. Resultado del ensayo con gas del ducto experimental con fugas secuenciales/seriadas (gastos de gas en [mmpcsd]).

Billmann, L. and R. Isermann (1987). "Leak Detection Methods for Pipelines". *Automatica* **23**(3), 381–385.

Nicholas, R.E. (1987). "Leak detection by model compensated volume balance". In: *ASME Pipeline Engineering Symp.-ETCE 1987*. Dallas, Texas USA, February 15-18. pp. 13–20.

Norris, H.L., P. Fuchs, D. Malnes and S. Klemp (1985). "Developments in the Simulation and Design of Multiphase Pipeline Systems". In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Las Vegas USA. pp. 1–15. Sept. 22-25, SPE 14283.

Scott, S.L. and M. A. Barrufet (2003). Worldwide assessment of industry leak detection capabilities for single & multiphase pipelines. Report OTRC 8/03A120. Offshore Technology Research Center. Texas A&M Univ., August 6.

Siebert, H. and R. Isermann (1977). "Pipeline leak detection and localisation by on-line correlation with a process computer". *Regelungstechnik* **25**(3), 69–100. (in German).

Silva, R.A., C.M. Buiatti, S.L. Cruz and J.A.F.R. Pereira (1996). "Pressure Wave Behaviour and Leak Detection in Pipelines". *Computers & Chem. Engng* **20**(Suppl.), S491–S496.

Torres-Ortiz, F.L. (2011). Modèles et observateurs pour les systèmes d'écoulement sous pression. Extension aux systèmes chaotiques. Ph. D. Thesis. Univ. de Grenoble.

Verde, C. (2001). "Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines". *Control Engineering Practice* **9**, pp673–682.

Wang, G., D. Dong and C. Fang (1993). "Leak Detection for Transport Pipelines Based on Autoregressive Model". *IEEE Trans on Instrum. and Meas.* **42**(1), 68–71.

Watanabe, K., H. Koyama, H. Tanoguchi, T. Ohma and D.M. Himmelblau (1993). "Location of Pinholes in a Pipeline". *Computers & Chem. Engng* **17**(1), 61–71.