

# Sistemas de diagnóstico para ductos LPG (ΣDX-LPG)

Dra. Lizeth Torres

[ftorreso@iingen.unam.mx](mailto:ftorreso@iingen.unam.mx)

<http://www.lizeth-torres.info/>

# ¿Porqué es importante tener sistemas de supervisión y diagnóstico de tuberías?



# Beneficios de contar con un ΣDX



## Beneficios de contar con un ΣDX en México: Proteger nuestra gran red de ductos

México cuenta con un total de 12,678 km de ductos los cuales se desglosan por el producto que transportan de la siguiente forma:

- 9,037 km que transportan gas natural;
- 1,815 km que transportan gas licuado del petróleo;
- 1,294 km de petroquímicos básicos;
- 490 km de petroquímicos secundarios y 40 km que transportan agua.

<http://www.gas.pemex.com.mx/PGPB/Conozca+Pemex+Gas/Infraestructura/>





## Mapa de las tuberías en México

Códigos de color verde para petróleo, rojo para el gas y azul para productos como la gasolina, el propano y el etileno.

### Leyenda:

- Oleoducto
- - - Oleoducto, proyecto o en construcción
- Gasoducto
- - - Gasoducto, proyecto o en construcción
- Tuberías de productos
- - - Tuberías de productos, proyecto o en construcción
- B12 Etiqueta del oleoducto entre un país
- B12 Etiqueta del oleoducto a través de países
- B12 Etiqueta del gasoducto entre un país
- B12 Etiqueta de un gasoducto a través de países
- B12 Etiqueta del poliducto entre un país
- B12 Etiqueta de un poliducto a través de países



[http://www.theodora.com/pipelines/north\\_america\\_oil\\_gas\\_and\\_products\\_pipelines.html](http://www.theodora.com/pipelines/north_america_oil_gas_and_products_pipelines.html)

# ¿Qué tipo de eventos no deseados (fallas o daños) se busca diagnosticar en un tubería?





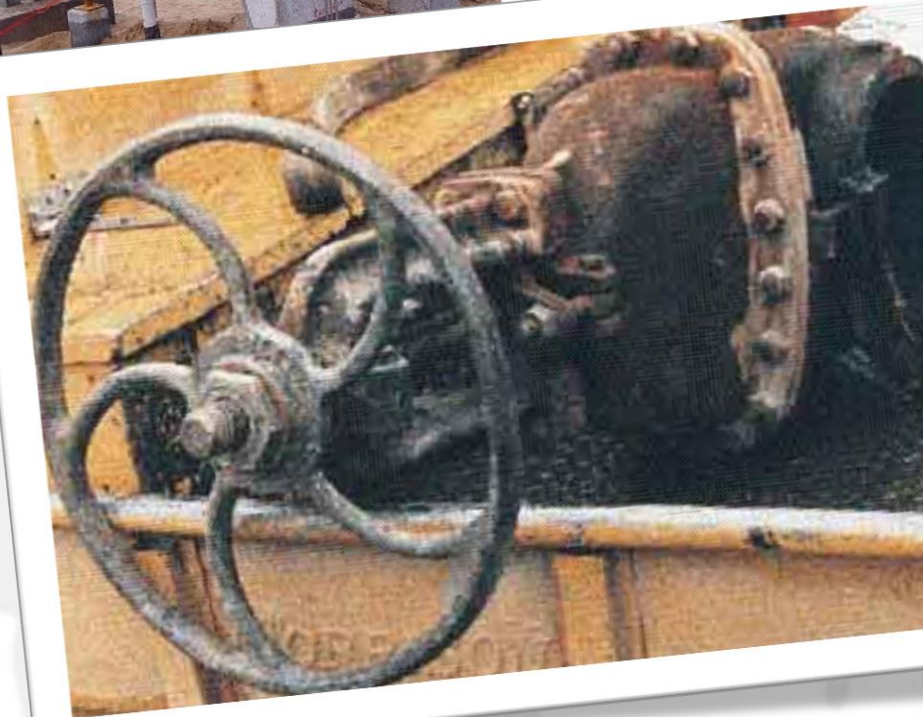


## **INSTRUMENTACIÓN AVERIADA/DESCALIBRADA**





## ACTUADORES DAÑADOS



## CORROSIÓN







Tubería bloqueada con alfastenos y cera.



## BLOQUEOS





## FUGAS





## TOMAS CLANDESTINAS



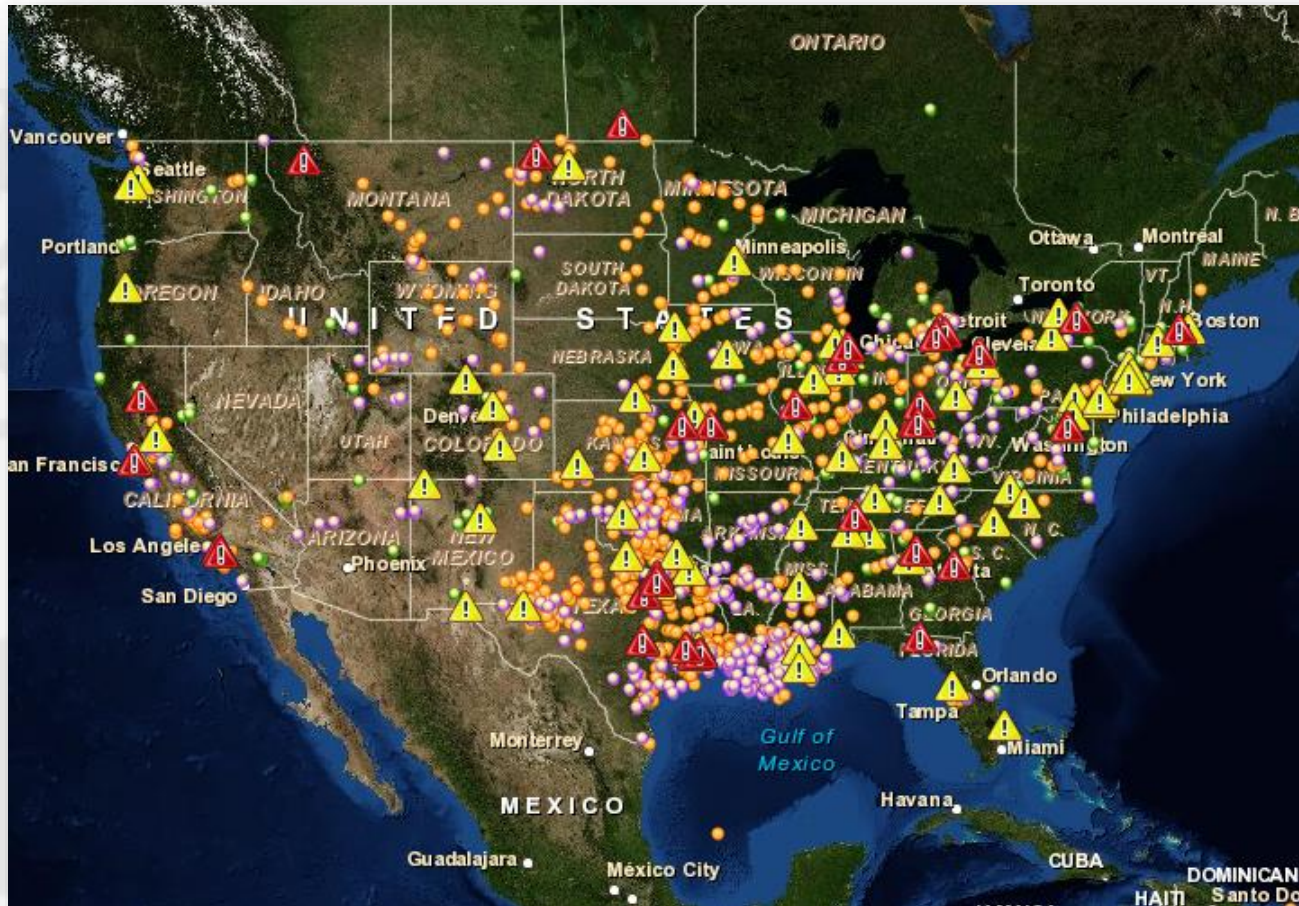
**¿Cuáles son los eventos no deseados que más daño causan a la población civil y al medio ambiente?**

**En EUA: ¡FUGAS!**





## Gráfica de incidentes - EUA - 1/1/2010 - 3/29/2013



<http://www.nolngexports.org/the-risks/>  
<http://fracdallas.org/docs/pipelines.html>

**¿Cuáles son los eventos no deseados que más daño causan a la población civil y al medio ambiente?**

**En México: ¡TOMAS CLANDESTINAS!**



## Las cifras de PEMEX:

- El número de tomas clandestinas en el 2012 fueron de mil 635.
- En el 2013, dos mil 612
- De septiembre de 2013 a agosto de 2014, Pemex perdió 7.5 millones de barriles por tomas clandestinas, lo que representa \$15 mil 300 millones.
- Al cierre de 2014 se registraron al menos 3 mil 674.
- Sólo en lo que va del 2015, se han detectado 2 mil **932 tomas clandestinas**

<http://www.elfinanciero.com.mx/politica/alarmente-crecimiento-en-el-robo-de-combustibles-admite-pemex.html>

<http://www.excelsior.com.mx/nacional/2015/07/14/1034643>

<http://www.excelsior.com.mx/nacional/2015/02/18/1008966>



## LA TRAGEDIA DE SAN JUANICO



## LA TRAGEDIA DE SAN JUANICO



## La tragedia de San Juanico

- La explosión de un gasoducto en la central de almacenamiento de PEMEX de San Juan Ixhuatepec, en Tlalnepantla, desató una de las peores tragedias en la Zona Metropolitana del Valle de México.
- Los pobladores de San Juanico despertaron el 19/11/1984 con una explosión desatada por una fuga de LPG.
- La emergencia ocurrió cuando la línea de tubería de 20 cm de diámetro, que corría en el parque, se quebró y provocó una fuga.
- Al momento de la explosión, la central de San Juanico almacenaba alrededor de seis mil 500 toneladas métricas de butano y propano, que alimentaron durante horas las llamas.



## La tragedia de San Juanico

- La primera explosión detonó una serie de fallas sistémicas, que resultaron en la detonación de cuatro de las seis esferas de almacenamiento y 15 de los 48 cilindros que había en la central.
- Las llamas alcanzaron hasta 300 metros de altura, y arrasaron con todo lo que encontraron en un área de 20 hectáreas a la redonda.
- Como consecuencia de la explosión al menos 600 personas perdieron la vida calcinadas, y se desconoce el número de víctimas que desaparecieron entre las cenizas.
- Además, se reportaron alrededor de dos mil 500 heridos y tres mil 500 personas tuvieron que ser evacuadas a diferentes albergues.

<http://www.excelsior.com.mx/2011/11/19/comunidad/785425>

# ¿Cómo evaluar el desempeño de un sistema de detección de fugas?

- API RP 1130 “Computational Pipeline Monitoring for Liquids” (USA)
- TRFL “Technische Regel für Fernleitungsanlagen” (Technical Rule for Pipeline Systems) (Reglamento técnico para sistemas de tuberías) (Alemania)
- ASME B31.8 “Gas Transmission and Distribution piping System”
- ASME B31.4 “Pipeline Transportation System for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids”
- BS 14161 “Petroleum and natural gas industries Pipeline transportation systems ”

# ¿Cómo evaluar el desempeño de un sistema de detección de fugas?

- 49 CFR 195 “Transportation of Hazardous Liquids by Pipeline”
- 49 CFR 192 “Transportation of Natural Gas and other Gas by Pipeline”
- ASME B31.8 “Gas Transmission and Distribution piping System”
- 49 CFR 195 Subpart F 195.450 y 195.452 “Pipeline Safety: Liquid Pipeline Integrity Management in High consequences Areas”
- 49 CFR 192 Subpart O “Pipeline Safety: “Pipeline Integrity Management in High consequences Areas” (Gas Transmission Pipeline)



# ¿Cómo evaluar el desempeño de un sistema de detección de fugas?

- API 1160 “Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines”
- ASME B31. 8 S “Managing System Integrity of Gas Pipelines”
- NACE STANDARD RP0502-2002 “Pipeline External Corrosion Direct Assessment”
- NOM-027-SESH-2010 “Norma Oficial Mexicana para la administración de la Integridad de Ductos de recolección y Transporte de Hidrocarburos”

## ¿Cómo evaluar el desempeño de un sistema de diagnóstico de fugas?

- **Sensibilidad:** Un  $\Sigma$ DX-Fugas debe asegurar que la pérdida de fluido como consecuencia de una fuga sea lo más pequeña posible. Esto significa que el SDF debe cumplir dos requisitos: debe detectar fugas pequeñas y debe hacerlo rápidamente.
- **Fiabilidad:** Mide el número de falsas alarmas que el  $\Sigma$ DX-Fugas generará y cuántas fugas reales detectará . En la mayoría de los  $\Sigma$ DX-Fugas existe un equilibrio entre la sensibilidad y falsas alarmas: cuanto mayor sea la sensibilidad, más falsas alarmas

## ¿Cómo evaluar el desempeño de un sistema de diagnóstico de fugas?

- **Precisión:** Este índice evalúa el desempeño de un  $\Sigma DX$ -Fugas para calcular de manera precisa parámetros como: la tasa del flujo de fuga, el volumen total de pérdida, el tipo de fluido perdido y la ubicación de la fuga.
- **Robustez:** mide la capacidad del  $\Sigma DX$ -Fugas para seguir funcionando y proporcionando información útil, incluso bajo condiciones de operación cambiantes, o en situaciones en que los datos se pierden o son sospechosos.

**API RP 1130**



# Clasificación de $\Sigma$ DX-Fugas

## Métodos externos

Cables digitales

Pruebas de  
termografía  
infrarroja

Detectores de  
emisión acústica

Tubos de sensado  
de vapor

Fibra óptica

## Métodos internos

Monitoreo de flujo  
y presión

Medición de la  
onda de presión

Sistemas  
estadísticos

Métodos RTTM

Métodos E-RTTM

## **$\Sigma$ DX-UNAM (Métodos Internos - Realizados)**

- Fuga equivalente (ecuación estática) para detección de una fuga
- Fuga equivalente (ecuación estática) para tuberías con ramales
- Observadores de estado para una fuga (algoritmo dinámico)
- Residuos para aislamiento de fallas (algoritmo dinámico)
- Observadores de estados para estimar fallas en sensores (algoritmos dinámicos)

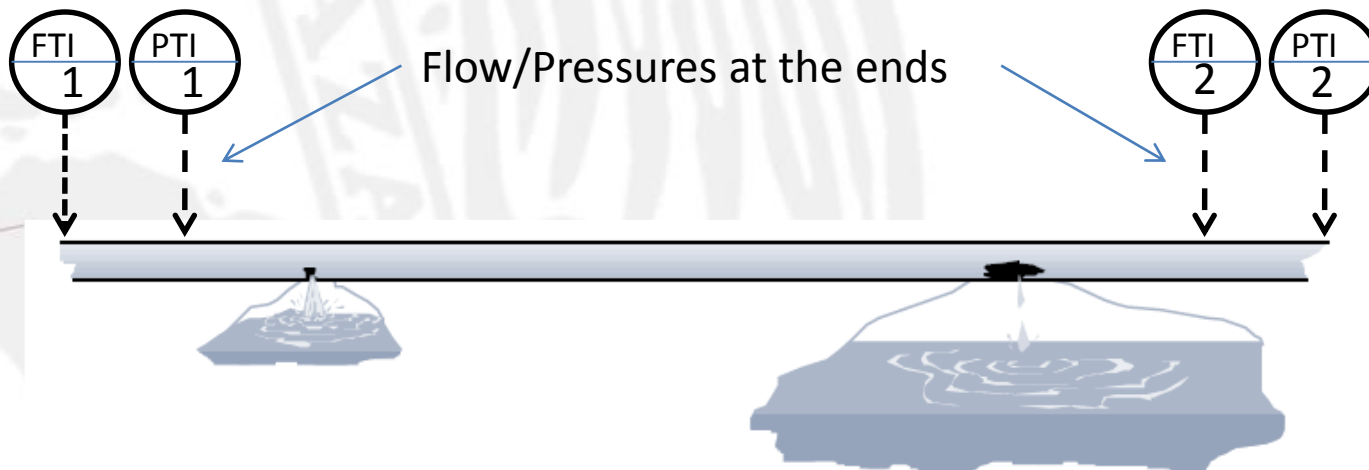
## Clasificación de $\Sigma$ DX-Fugas

- **Monitoreo de flujo y presión:** Una fuga cambia la dinámica del fluido de la tubería, y por tanto cambia las lecturas de la presión o de flujo. Por ende, monitoreando la presión o el flujo entre dos puntos de la tubería, se puede detectar y localizar una fuga.



## $\Sigma$ DX-UNAM

Algunos de los métodos desarrollados en el II-UNAM se basan en (1) la medición de la presión y el gasto en los extremos de la tubería (2) y en el modelo de la dinámica del fluido en la tubería.



# ΣDX-UNAM

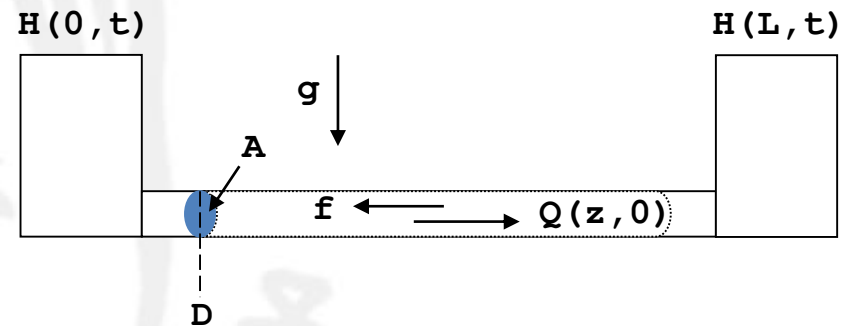
$$\frac{\partial Q(z,t)}{\partial t} + gA \frac{\partial H(z,t)}{\partial z} + \frac{f}{2DA} Q(z,t) |Q(z,t)| = 0$$

Momentum Equation

$$\frac{\partial H(z,t)}{\partial t} + \frac{b^2}{gA} \frac{\partial Q(z,t)}{\partial z} + a_2 \delta(z - z_L) u(t - t_L) Q_L(t) = 0$$

Continuity Equation

- Q = Flow rate
- H = Pressure
- A = Pipe transversal area
- g = Gravity
- f = Friction factor
- D = Pipe diameter



# ΣDX-UNAM: Matriz de fallas

$$r_1 = Q_i - Q_o$$

$$r_2 = -\dot{Q}_i - \mu Q_i |Q_i| + \frac{a_1}{L} (H_i - H_o)$$

$$r'_1 = \int_{t_0}^T (Q_i - Q_o) dt$$

$$r_3 = -\dot{Q}_o - \mu Q_o |Q_o| + \frac{a_1}{L} (H_i - H_o)$$

$$r_4 = -\dot{Q}_i - \mu Q_i |Q_i| + \frac{a_1}{L} H_i - \frac{a_1 a_2}{L^2} r'_1 + c_1$$

$$r_5 = -\dot{Q}_o - \mu Q_o |Q_o| - \frac{a_1}{L} H_o + \frac{a_1 a_2}{L^2} r'_1 + c_2$$

- $S1(\Delta_{Q_i})$ : A fault in the upstream flow rate sensor  $\Delta_{Q_i}$ .
- $S2(\Delta_{Q_o})$ : A fault in the downstream flow rate sensor  $\Delta_{Q_o}$ .
- $S3(\Delta_{H_i})$ : A fault in the upstream pressure sensor  $\Delta_{H_i}$ .
- $S4(\Delta_{H_o})$ : A fault in the downstream pressure sensor  $\Delta_{H_o}$ .
- $S5(Q_f)$ : A leak at some unknown position  $z_f$  and outflow  $Q_f$ .

	$S1(\Delta_{Q_i})$	$S2(\Delta_{Q_o})$	$S3(\Delta_{H_i})$	$S4(\Delta_{H_o})$	$S5(Q_f)$
$r_1$	*	*			*
$r_2$	*		*	*	*
$r_3$		*	*	*	*
$r_4$	*	*	*		*
$r_5$	*	*		*	*

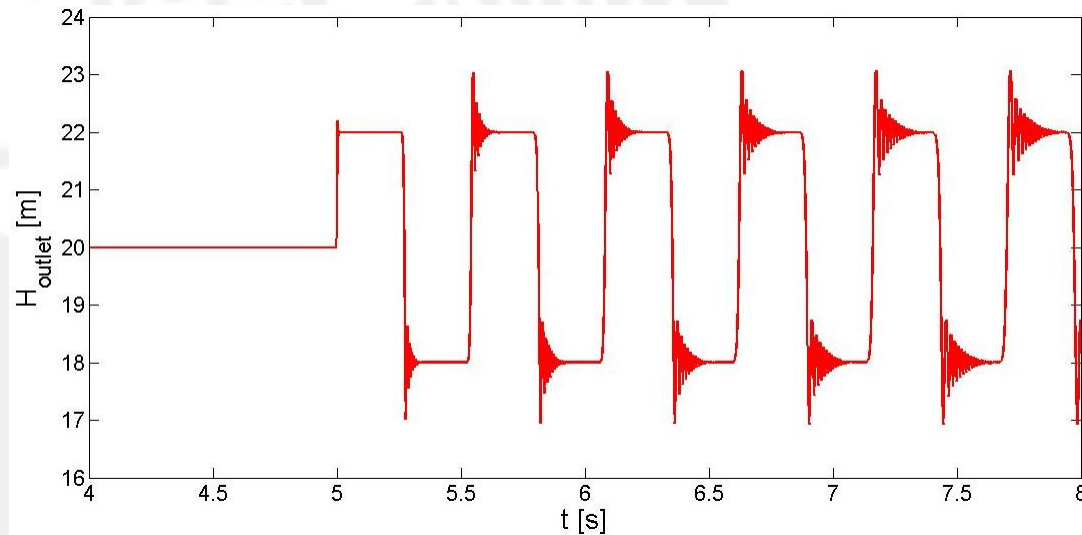


# **ΣDX-UNAM (Métodos externos - En diseño)**

- **Análisis de la onda de presión utilizando wavelets para detección de múltiple fugas.**
- **Parche de monitoreo con sensores embebidos.**
- **Detección de tomas clandestinas con drones.**

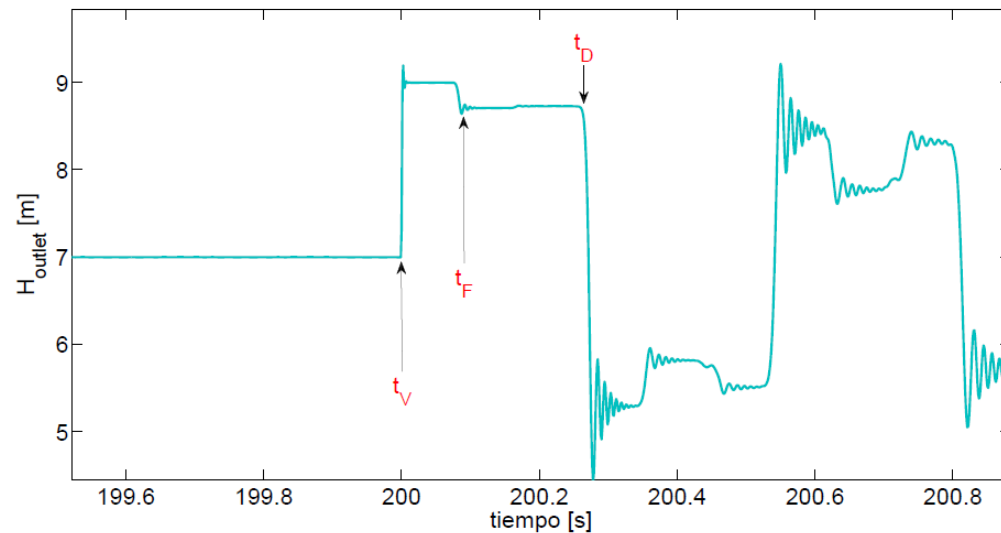
## Medición de la onda de presión

- Para verificar si hay una fuga: se genera un evento transitorio (e.g. el cierre de un válvula, el apagado de una bomba).



## Medición de la onda de presión

- Cuando una fuga se produce, el fluido se escapa a alta velocidad. Esto produce ondas de presión negativas que se propagan en ambas direcciones dentro de la tubería y que pueden ser detectadas y analizadas.





## Medición de la onda de presión

- Este método se basa en que las ondas de presión viajan a grandes distancias a la velocidad del sonido guiadas por las paredes de la tubería.

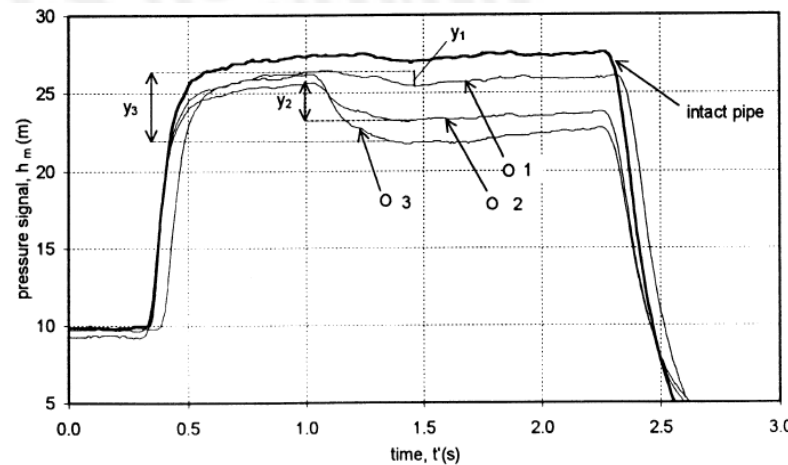
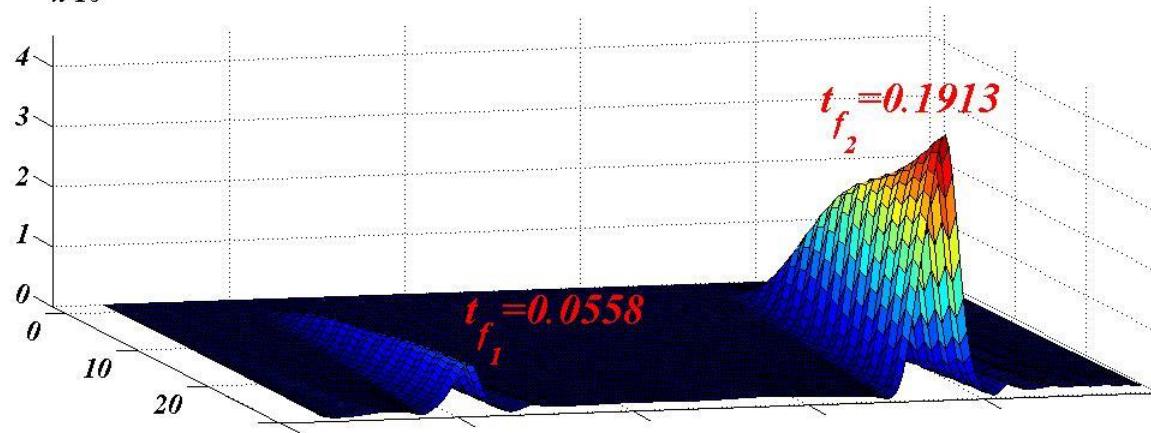
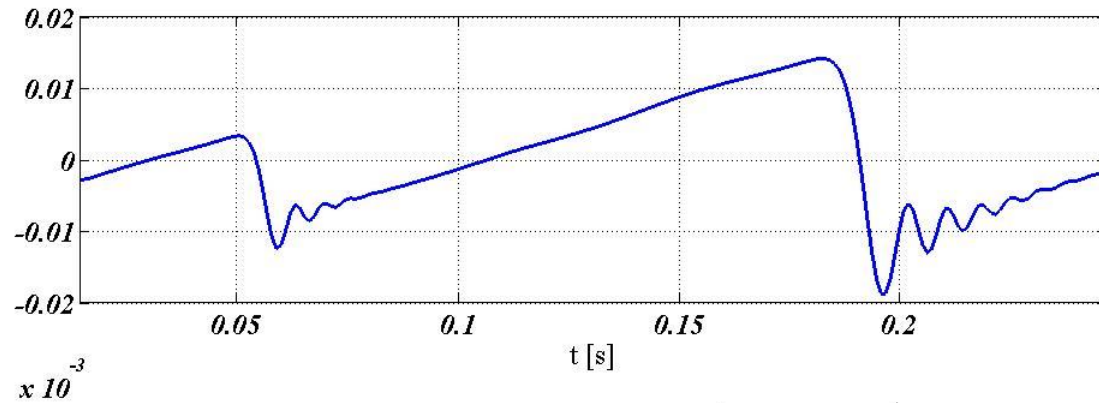


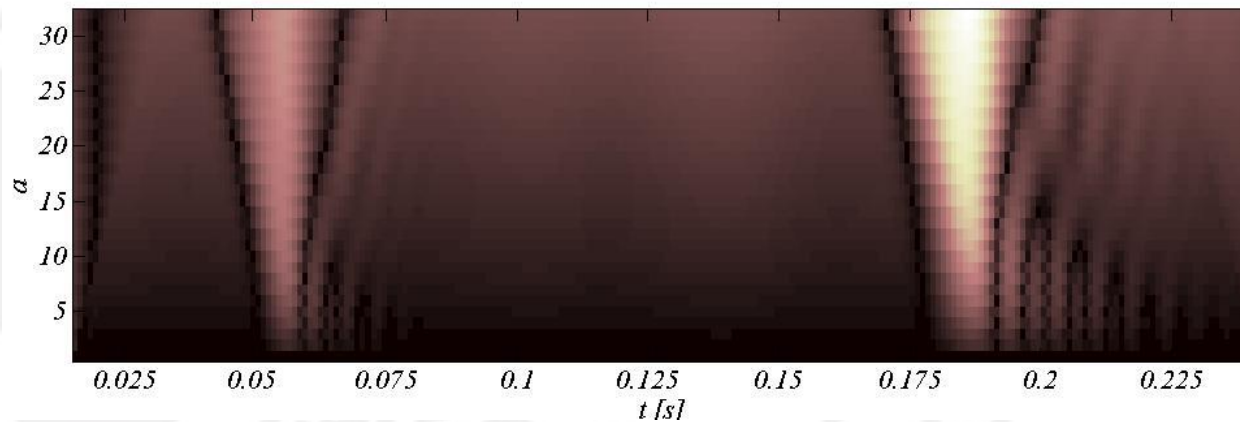
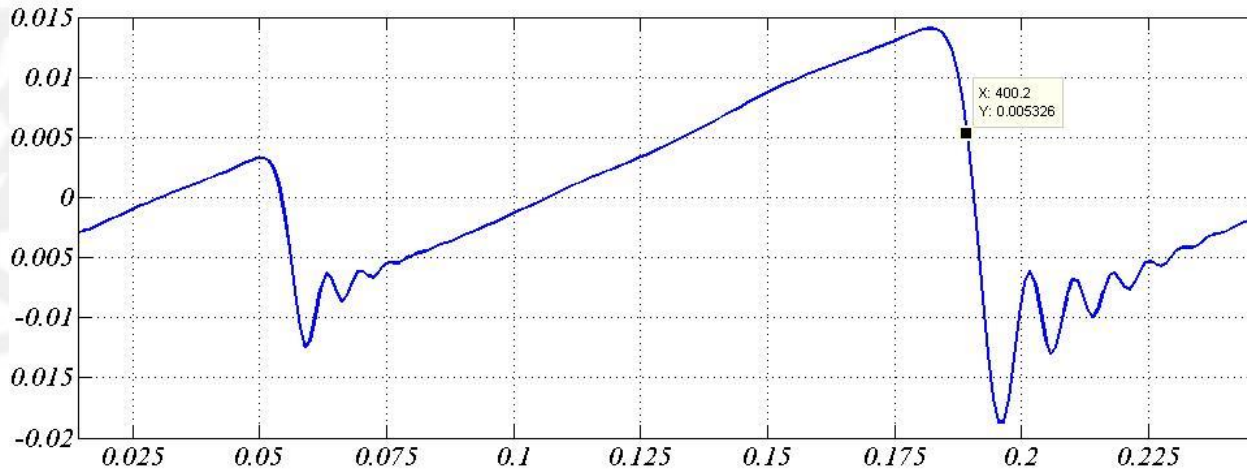
Fig. 2. Pressure signal for both intact and damaged (with a leak) pipe (test series I: circular orifice of different area discharging in air).

Brunone, B., & Ferrante, M. (2001). Detecting leaks in pressurized pipes by means of transients. *Journal of hydraulic research*, 39(5), 539-547.

# Medición de la onda de presión

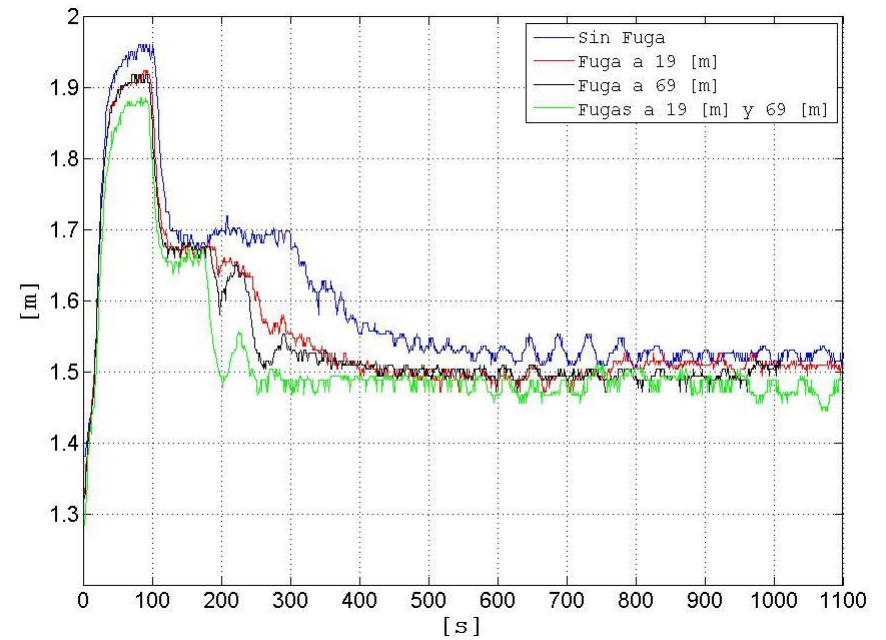


# Medición de la onda de presión





# Medición de la onda de presión





## $\Sigma$ DX-Fugas con drones

Vehículos aéreos no tripulados (UAV) equipados con cámaras, GPS, detectores de gas, sensores infrarrojos o sensores láser de metano.

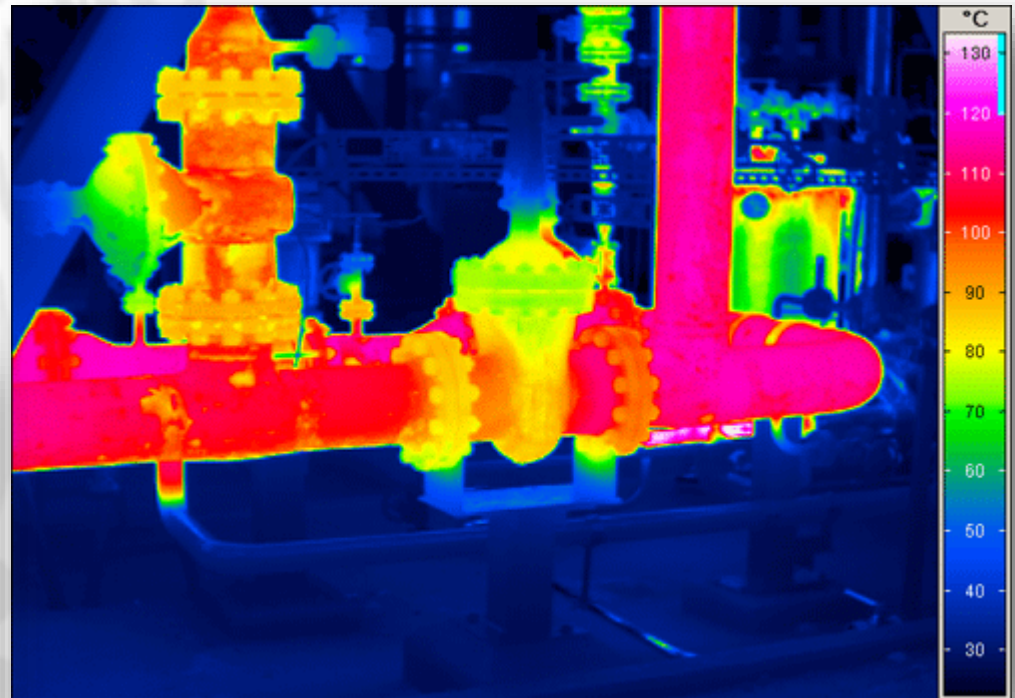
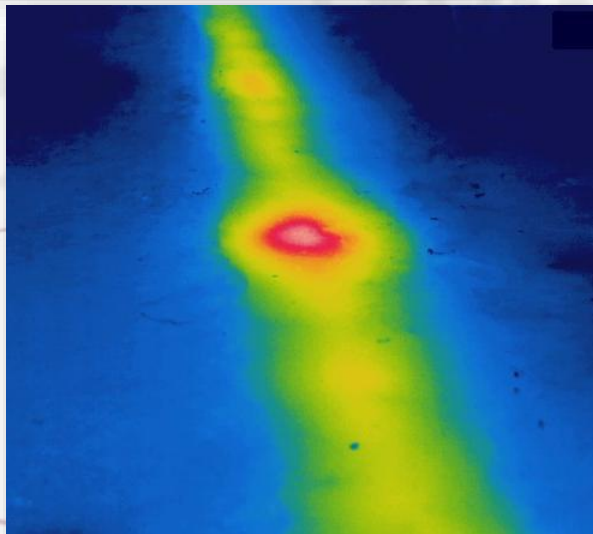
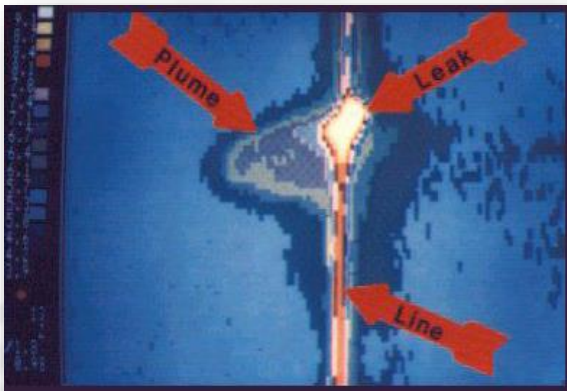


## Clasificación de $\Sigma$ DX-Fugas

- **Pruebas de termografía infrarroja:** Precisas y eficientes en la detección y localización de fugas subterráneas.
- Una fuga provoca hilos de fluido con conductancia térmica diferente a la del suelo seco. Esto provoca diferentes patrones de temperatura superficial.
- Con una cámara infrarroja se pueden escanear áreas enteras y con los datos obtenidos se pueden crear imágenes con zonas a diferentes temperaturas identificadas por diferentes tonos de grises en una imagen B/N o en varios colores en una imagen a color.



# Pruebas de termografía infrarroja



# Clasificación de $\Sigma$ DX-Fugas

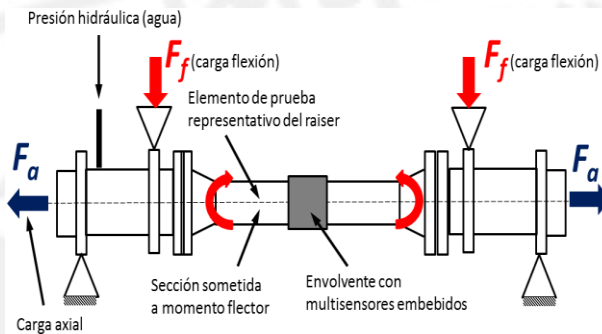
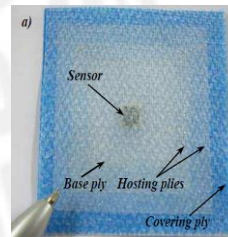


Figure 1. (a) Sección del ducto a instrumentar, (b) Parche de Monitoreo, (c) Esquema del ducto con el parche, (d) Tubería piloto del II-UNAM y (d) Pruebas de carga a la sección del ducto instrumentado.

# **ΣDX-UNAM**

**(Algunos otros métodos a explorar)**



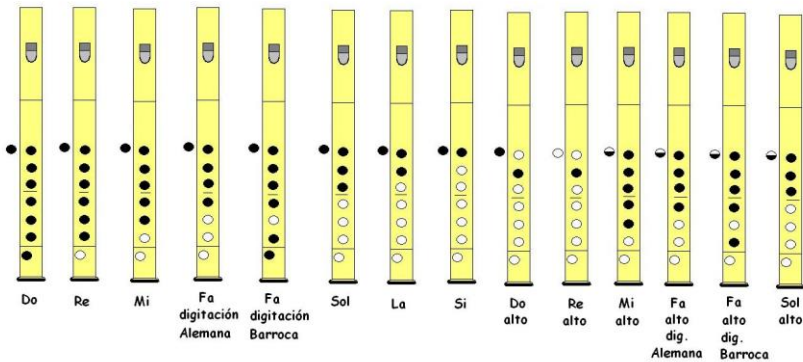


# Detección acústica

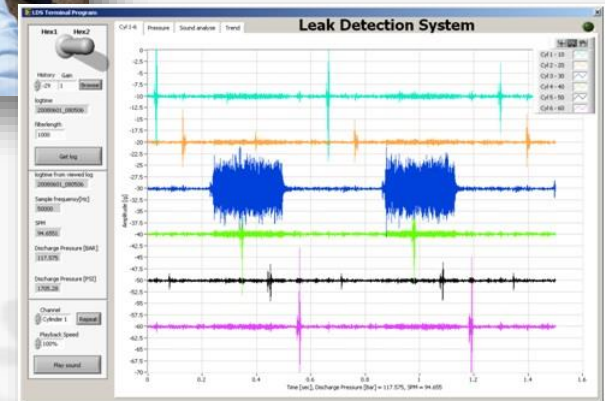


Posiciones de las notas en la Flauta Dulce

agujero cerrado: ●  
 agujero abierto: ○  
 agujero semicerrado: ◐

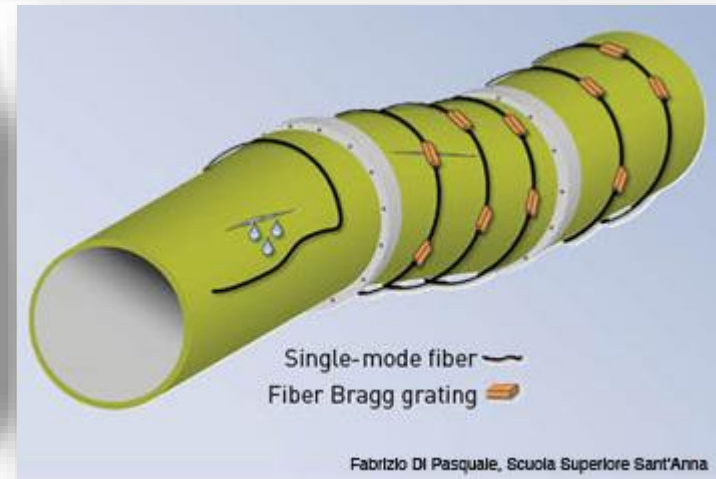
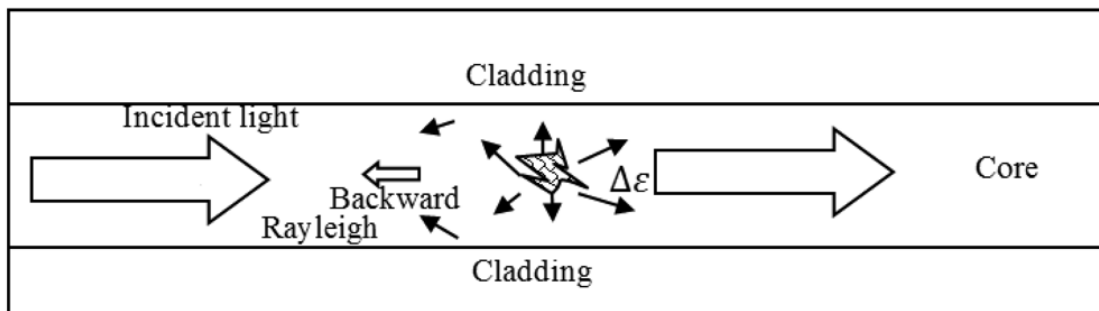
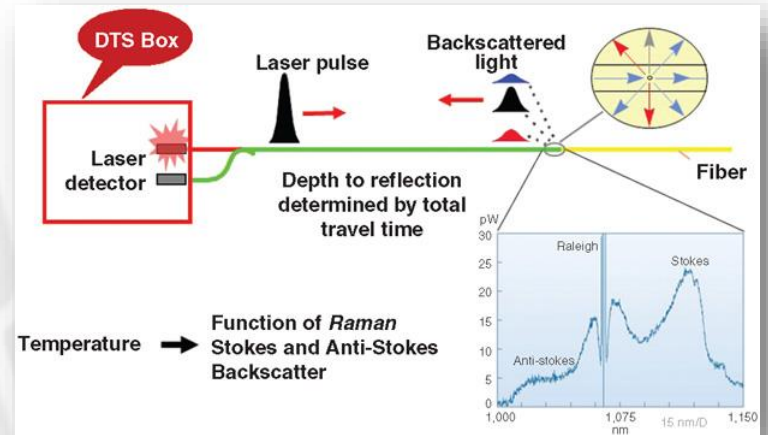
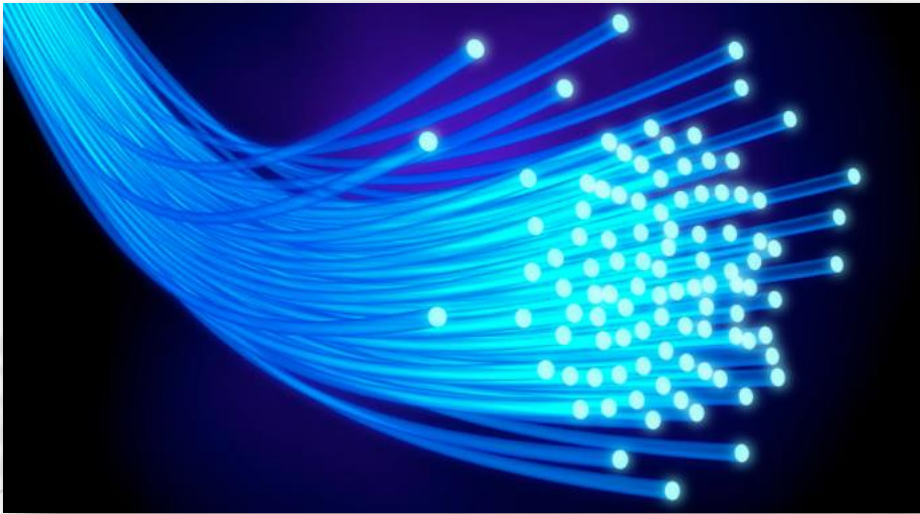


(El agujero pintado a un costado del instrumento, corresponde al pulgar de la mano izquierda)





# Fibra óptica





**Gracias por su atención**

Dra. Lizeth Torres

[ftorreso@iingen.unam.mx](mailto:ftorreso@iingen.unam.mx)  
<http://www.lizeth-torres.info/>