



Sistemas de diagnóstico para ductos (Σ-DX)

Dra. Lizeth Torres

ftorreso@iingen.unam.mx
http://www.lizeth-torres.info/





Motivos para hacer investigación científica

RUY PÉREZ TAMAYO

DIEZ RAZONES Para ser científico





Para mejorar el mundo





Motivos para hacer investigación







¿Cómo elegir un tema de investigación?

Que te guste

Que tenga relevancia

- Factible

- Interesante

- Novedoso

- Ético

- Relevante

Que te permita aportar nuevo conocimiento

Que te permita dar soluciones trascendentales

Que tenga aplicabilidad práctica

Que sea de interés regional y nacional



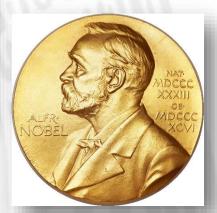


¿Cómo elegir un tema de

Qué te instinción?









Computer Engineering

Clay Millennium Prize Problems

- P = NP Problem
- Riemann Hypothesis
- Birch and Swinnerton-Dyer Conjecture
- Navier-Stokes Problem
- Poincaré Conjecture ☑
 - o solved by Grigori Perelman; declined the award in 2010
- Hodge Conjecture
- Yang-Mills Theory

each one is worth US \$1,000,000







¿Cómo elegir un tema de l'Oiréetis? l'ispaire!



Mi principal línea de investigación:

Diseño de \(\subseteq DX \)
para ductos





¿Por qué es importante?





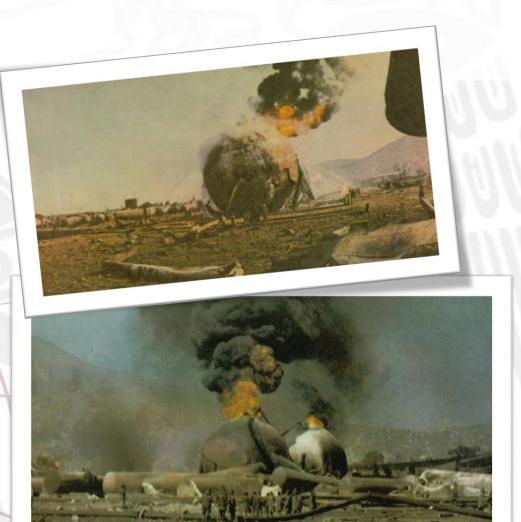


LA TRAGEDIA DE SAN JUANICO





¿Por qué es importante?



LUGAR: Central de almacenamiento de PEMEX de San Juan Ixhuatepec, en Tlalnepantla.

FECHA: 19/11/1984

MOTIVO: explosión desatada por una fuga de LPG en la tubería de 20 cm de φ que corría en el parque.

CONSECUENCIAS: 600 personas calcinadas, dos mil 500 heridos y ¿? desaparecidos.

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

LA TRAGEDIA DE SAN JUANICO





663 M Personas que viven sin acceso a agua potable

:90 Cada 90 segundos muere un niño de una enfermedad relacionada con el agua

1 M Personas muertas por agua, saneamiento y enfermedades relacionadas con la

higiene cada año

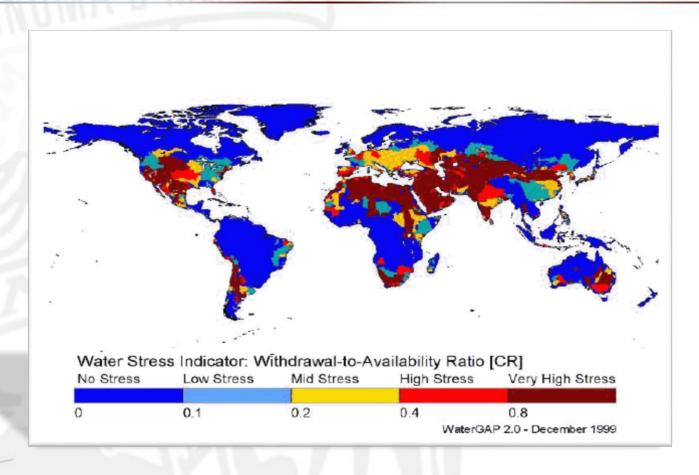
3rd Principal causa de muerte infantil es la diarrea, la mayoría de los cuales está relacionada con el agua

https://water.org/our-impact/water-crisis/



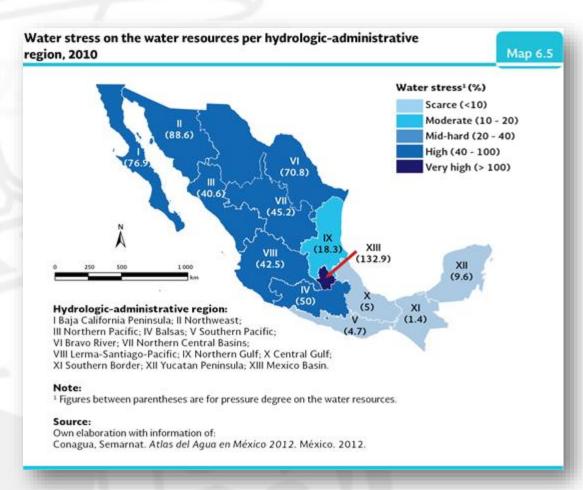






El indicador de estrés hídrico mide la proporción del consumo de agua con respecto al total de recursos renovables.



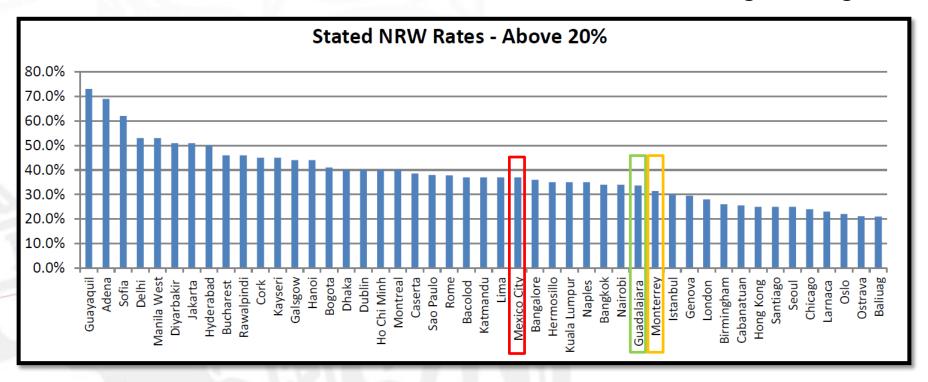


http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe 12eng/06 agua/cap6 2.html





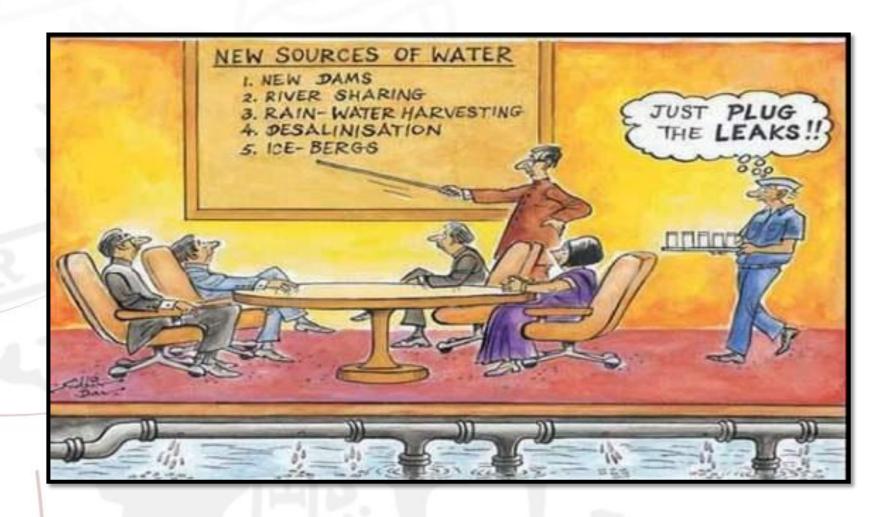
Non-revenue water: Consumo de agua sin ingresos



- **%** Consumo autorizado no facturado
- X Las pérdidas aparentes (robo de agua y imprecisiones de medición)
- Las pérdidas reales (de las redes de transmisión, instalaciones de almacenamiento, redes de distribución o conexiones de servicio)











Beneficios de contar con un SDX 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:

- 1 9,037 km que transportan gas natural;
- 1,815 km que transportan gas licuado del petróleo;
- 1,294 km de petroquímicos básicos;
- 3490 km de petroquímicos secundarios y 40 km que transportan agua.

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



el etileno.





http://www.geografiainfo.es/tuberias/mapa_tuberias_mexico.html

Etiqueta de un gasoducto a través de paises

H12 Etiqueta de un poliducto a través de países

812 Etiqueta del poliducto entre un país

--- Gasoducto, proyecto o en construcción

Tuberías de productos, proyecto o en

Tuberías de productos

construcción





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







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







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



En México: Deslaves y ¡TOMAS CLANDESTINAS!





¿Cómo evaluar el desempeño de un <code>\SDX</code>?

Detectar una falla Determinar el tipo de falla Localizar y reconstruir la falla

Predecir una falla

- Sensibilidad
- Fiabilidad
- Precisión
- Robustez





Clasificación de **SDX** para ductos

Métodos off-line

Medición de la onda de presión

Pruebas de termografía infrarroja

Detectores de emisión acústica

Métodos on-line

Fibra óptica

Métodos basados en un modelo del fluido en el ducto y en el monitoreo de flujo y presión





Clasificación de **SDX** para ductos

Métodos off-line

Medición de la onda de presión

Pruebas de termografía infrarroja

Detectores de emisión acústica

Métodos on-line

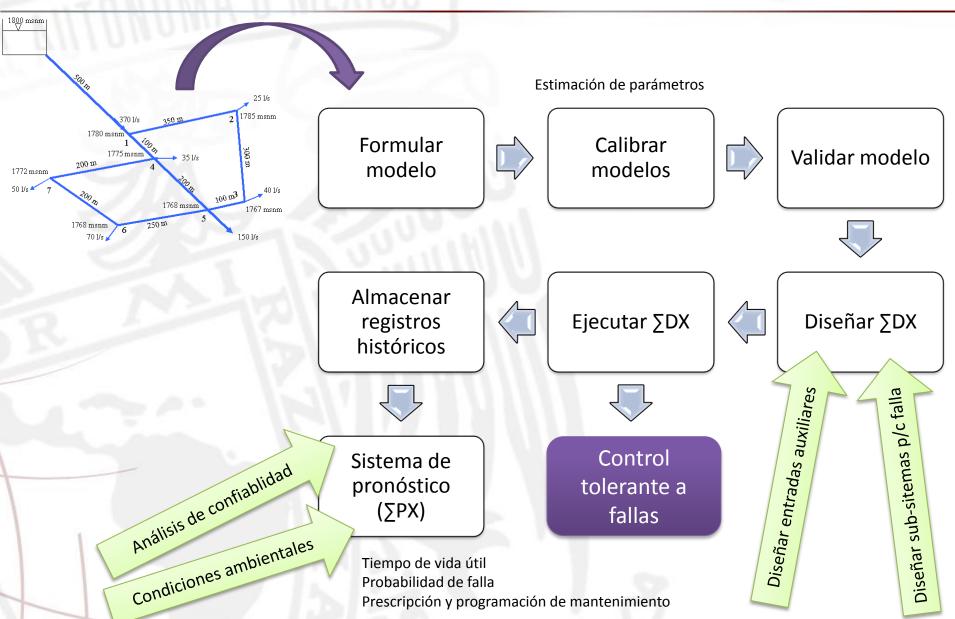
Fibra óptica

Métodos basados en un modelo del fluido en el ducto y en el monitoreo de flujo y presión



Diseño y ejecución de un ΣDX basado en un modelo del fluido en el ducto y en el monitoreo de flujo y presión

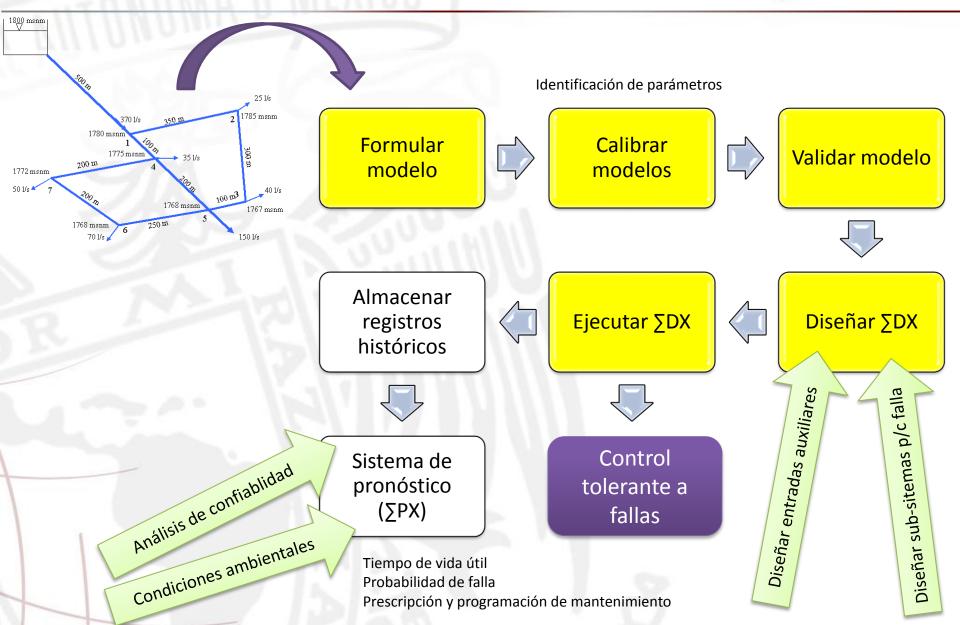






Diseño y ejecución de un ΣDX basado en un modelo del fluido en el ducto y en el monitoreo de flujo y presión

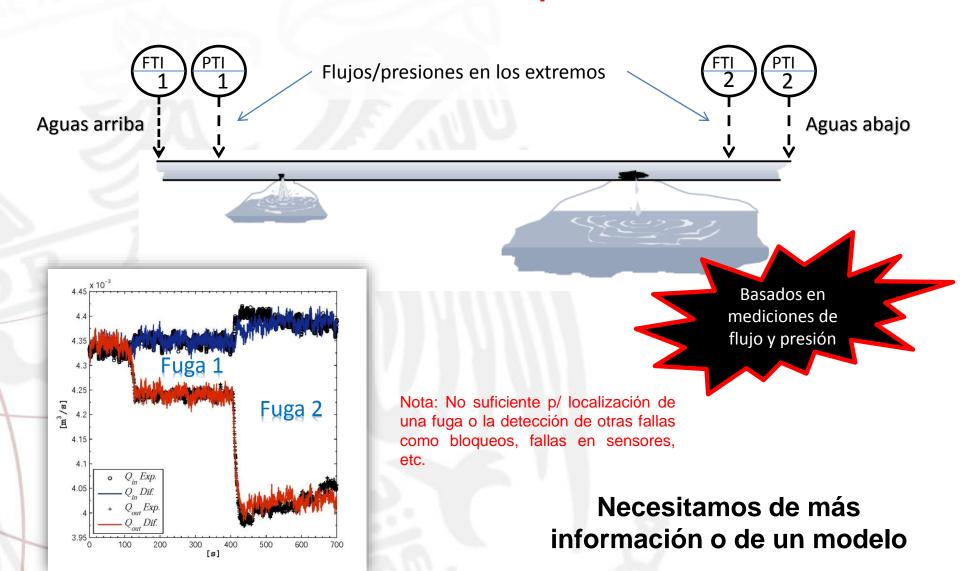








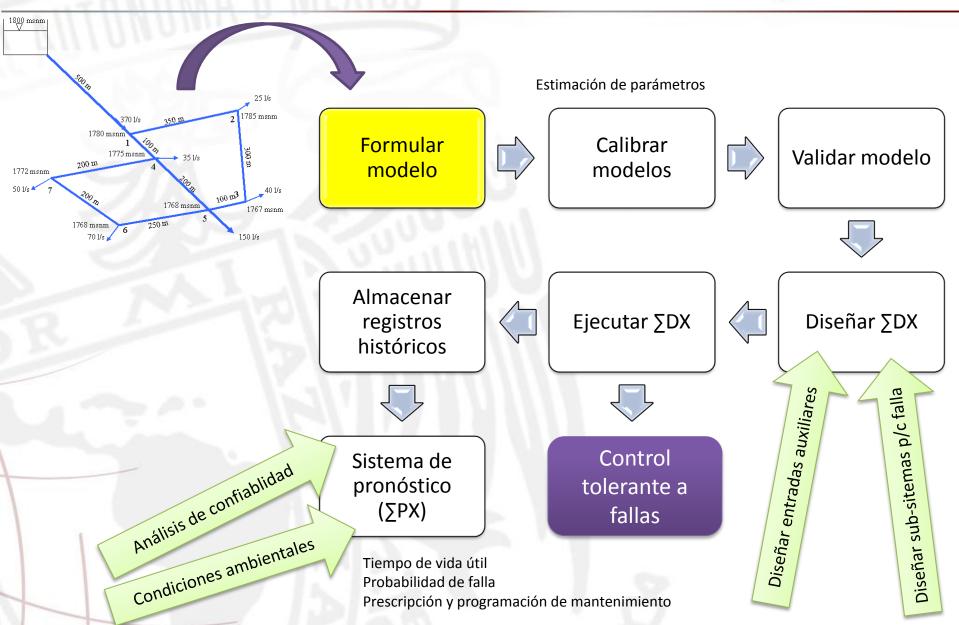
ΣDX-On-Line-II-UNAM para un ducto





Diseño y ejecución de un ΣDX basado en un modelo del fluido en el ducto y en el monitoreo de flujo y presión









ΣDX-On-Line-II-UNAM: Basado en un modelo

$$\frac{\partial Q(z,t)}{\partial t} + gA_{r} \frac{\partial H(z,t)}{\partial z} + \frac{f}{2DA_{r}} Q(z,t) |Q(z,t)| = 0$$

$$\frac{\partial H(z,t)}{\partial t} + \frac{b^{2}}{gA_{r}} \frac{\partial Q(z,t)}{\partial z} + \frac{b^{2}}{gA_{r}} \delta(z-z_{L}) u(t-t_{L}) Q_{L}(t) = 0$$
Continuity Equation

b: velocidad del sonido [m/s] *g*: aceleración gravitacional $[m/s^2]$ A_r : área de sección transversal $[m^2]$ *f*: factor de fricción ϕ : diámetro interno de la tubería [m]

Condiciones iniciales

$$H(z,0) = H^{0}(z), Q(z,0) = Q^{0}(z)$$

Condiciones de frontera

$$H(0,t) = H_{in}(t), H(L,t) = H_{out}(t)$$

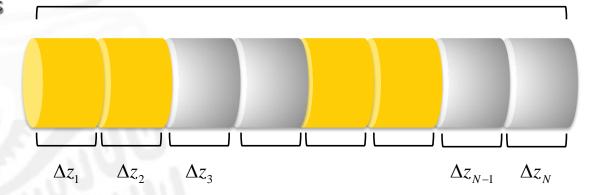
 $Q(0,t) = Q_{in}(t), Q(L,t) = Q_{out}(t)$





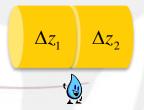
Método de diferencias finitas

$$\frac{\partial H(z,t)}{\partial z} \approx \frac{\Delta H_i(t)}{\Delta z_i} = \frac{H_i(t) - H_{i+1}(t)}{\Delta z_i}$$
$$\frac{\partial Q(z,t)}{\partial z} \approx \frac{\Delta Q_i(t)}{\Delta z_i} = \frac{Q_i(t) - Q_{i+1}(t)}{\Delta z_i}$$



 \boldsymbol{L}

$$\begin{split} \dot{Q}_{1}(t) &= -\frac{f}{2\phi A_{r}} Q_{1}(t) | Q_{1}(t) | + \frac{gA_{r}}{\Delta z_{f}} (H_{in}(t) - H_{2}(t)) \\ \dot{H}_{2}(t) &= \frac{b^{2}}{gA_{r}\Delta z_{f}} (Q_{1}(t) - Q_{2}(t)) \\ \dot{Q}_{2}(t) &= -\frac{f}{2\phi A_{r}} Q_{2}(t) | Q_{2}(t) | + \frac{gA_{r}}{L - \Delta z_{f}} (H_{2}(t) - H_{out}(t)) \end{split}$$

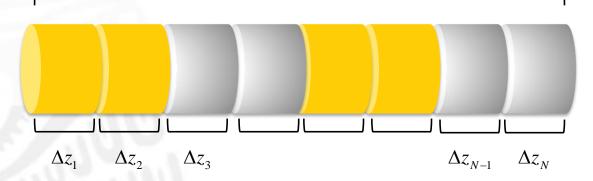






Método de diferencias finitas

$$\frac{\partial H(z,t)}{\partial z} \approx \frac{\Delta H_i(t)}{\Delta z_i} = \frac{H_i(t) - H_{i+1}(t)}{\Delta z_i}$$
$$\frac{\partial Q(z,t)}{\partial z} \approx \frac{\Delta Q_i(t)}{\Delta z_i} = \frac{Q_i(t) - Q_{i+1}(t)}{\Delta z_i}$$



L

Modelo mínimo p/ 1 fuga

$$\begin{split} \dot{Q}_{1}(t) &= -\frac{f}{2\phi A_{r}} Q_{1}(t) | Q_{1}(t) | + \frac{gA_{r}}{\Delta z_{f}} (H_{in}(t) - H_{2}(t)) \\ \dot{H}_{2}(t) &= \frac{b^{2}}{gA_{r}\Delta z_{f}} (Q_{1}(t) - Q_{2}(t) - \lambda_{f} \sqrt{H_{2}(t)}) \\ \dot{Q}_{2}(t) &= -\frac{f}{2\phi A_{r}} Q_{2}(t) | Q_{2}(t) | + \frac{gA_{r}}{L - \Delta z_{f}} (H_{2}(t) - H_{out}(t)) \end{split}$$

$$\begin{split} \dot{Q}_{1}(t) &= -\frac{f}{2\phi A_{r}}Q_{1}(t) \mid Q_{1}(t) \mid + \frac{gA_{r}}{\Delta z_{1}}(H_{in}(t) - H_{2}(t)) \\ \dot{H}_{2}(t) &= \frac{b^{2}}{gA_{r}\Delta z_{1}}(Q_{1}(t) - Q_{2}(t) - \lambda_{f1}\sqrt{H_{2}(t)}) \\ \dot{Q}_{2}(t) &= -\frac{f}{2\phi A_{r}}Q_{2}(t) \mid Q_{2}(t) \mid + \frac{gA_{r}}{\Delta z_{2}}(H_{2}(t) - H_{3}(t)) \\ \dot{H}_{3}(t) &= \frac{b^{2}}{gA_{r}\Delta z_{2}}(Q_{2}(t) - Q_{3}(t) - \lambda_{f2}\sqrt{H_{3}(t)}) \\ \dot{Q}_{3}(t) &= -\frac{f}{2\phi A_{r}}Q_{3}(t) \mid Q_{3}(t) \mid + \frac{gA_{r}}{\Delta z_{3}}(H_{3}(t) - H_{out}(t)) \end{split}$$

Modelo mínimo p/ 2 fugas





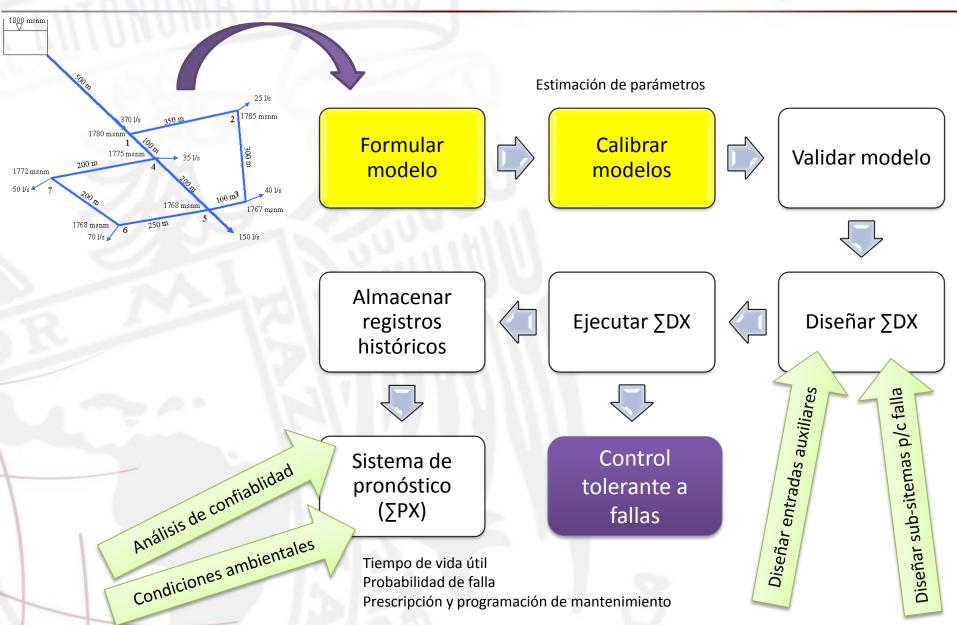






Diseño y ejecución de un ΣDX basado en un modelo del fluido en el ducto y en el monitoreo de flujo y presión









b: velocidad del sonido [m/s]

f: factor de fricción

φ: diámetro interno de la tubería [m]

ε: Rugosidad [mm]

v: Viscosidad [m²/s]







Técnica utilizada: Técnica de estimación de parámetros basada en observadores de estado.

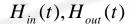




Sensor Virtual

Observador de estados

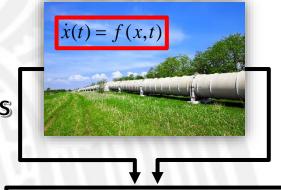




$$H_{in}(t), Q_{out}(t)$$

$$Q_{in}(t), H_{out}(t)$$

$$Q_{in}(t), Q_{out}(t)$$



Salidas

$$H_{in}(t), H_{out}(t)$$

$$H_{in}(t), Q_{out}(t)$$

$$Q_{in}(t), H_{out}(t)$$

$$Q_{in}(t), Q_{out}(t)$$

Observador de estados

Modelo+Término de corrección

$$\dot{\hat{x}}(t) = f(\hat{x},t) + K(y(t) - h(\hat{x}(t)))$$

Variables estimadas

$$\hat{f},\hat{b},\hat{L}_{eq}$$





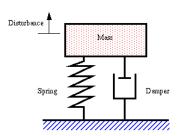
$$\frac{\partial^{2}Q(z,t)}{\partial^{2}t} + \mu[|Q(z,t)| + Q(z,t)\text{sign}(Q(z,t))] \frac{\partial Q(z,t)}{\partial t} - b^{2}\frac{\partial^{2}Q(z,t)}{\partial^{2}z} = 0$$
Amortiguamiento

Rigidez

 $\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0$ Sistema masa resorte amortiguador

 $\ddot{x}(t) + 2\varsigma\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = 0$ Oscilador armónico amortiguado — Forma canónica

$$\ddot{x}(t) + F_0(x(t))\dot{x}(t) + G_0(x(t)) = 0$$
 Sistema de Liénard







$$\ddot{x}(t) + F_0(x(t))\dot{x}(t) + G_0(x(t)) = 0$$

$$(\zeta_1(t) \quad \zeta_2(t)) = \Phi(x_1(t) \quad x_2(t))$$

$$\Phi: (x_1(t) \quad x_2(t)) \rightarrow (x(t) \quad \dot{x}(t) + F(x(t)))$$

$$\dot{\zeta}_{1}(t) = \zeta_{2}(t) - F(\zeta_{1}(t))$$

$$\dot{\zeta}_{2}(t) = -G_{0}(\zeta_{1}(t)), y(t) = \zeta_{1}(t)$$



$$F(x(t)) = \int_{0}^{x} F_{0}(\sigma) d\sigma$$

$$\frac{\partial Q_l^a(z,t)}{\partial t} = Q_l^b(z,t) - \frac{f}{2\phi A_r} Q_l^a(z,t) | Q_l^a(z,t) |$$

$$\frac{\partial Q_l^b(z,t)}{\partial t} = b^2 \frac{\partial^2 Q_l^a(z,t)}{\partial z^2}$$

Modelo tipo Liénard de flujo





Ecuaciones del telegrafista

Calibración del modelo: Estimación de los parámetros

$\frac{\partial Q_l^a(z,t)}{\partial t} = Q_l^b(z,t) - \frac{f}{2\phi A_r} Q_l^a(z,t) | Q_l^a(z,t) |$ $\frac{\partial Q_l^b(z,t)}{\partial t} = b^2 \frac{\partial^2 Q_l^a(z,t)}{\partial z^2}$

Modelo tipo Liénard de flujo

$$\frac{\partial Q^{a}(z,t)}{\partial t} = Q^{b}(z,t) - \frac{f}{2\phi A_{r}} |Q^{a}(z,t)| Q^{a}(z,t)$$

$$\frac{\partial Q^{b}(z,t)}{\partial t} = -gA_{r} \frac{\partial \dot{H}(z,t)}{\partial z}$$

Modelo tipo Liénard híbrido

$$\frac{\partial \zeta_1(z,t)}{\partial t} = \zeta_2(z,t) - \left(\frac{\mathcal{R}}{\mathcal{L}}\right) \zeta_1(z,t)$$

$$\frac{\partial \zeta_2(z,t)}{\partial t} = \left(\frac{1}{\mathcal{L}\mathcal{C}}\right) \frac{\partial^2 \zeta_1(z,t)}{\partial z^2}$$

Modelo tipo Liénard lineal flujo ó presión

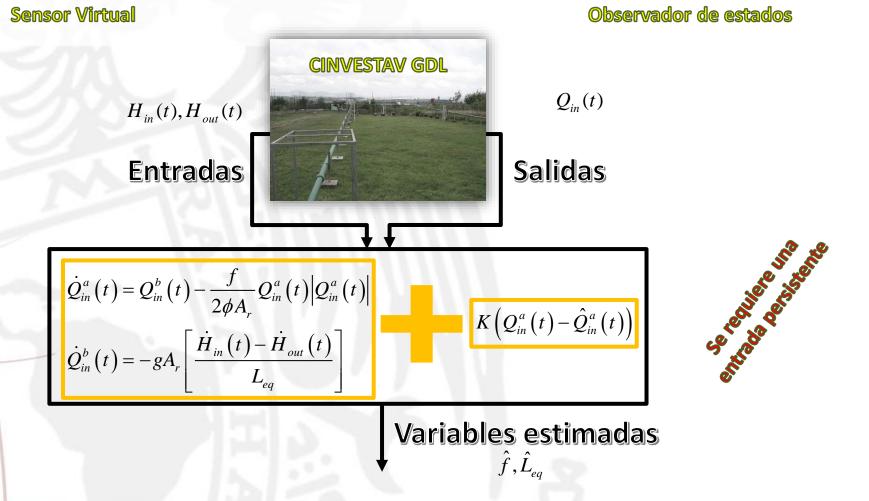
$$\mathcal{R} = \frac{f \mid Q_0 \mid}{gA_r^2 \phi}, \ \mathcal{L} = \frac{1}{gA_r}, \ \mathcal{C} = \frac{gA_r}{b^2}$$



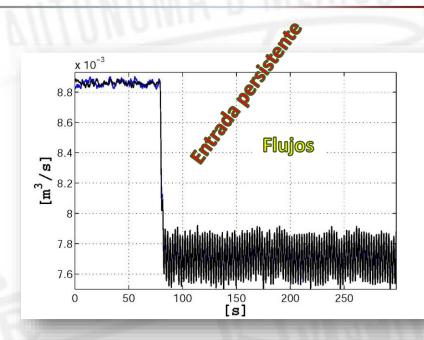


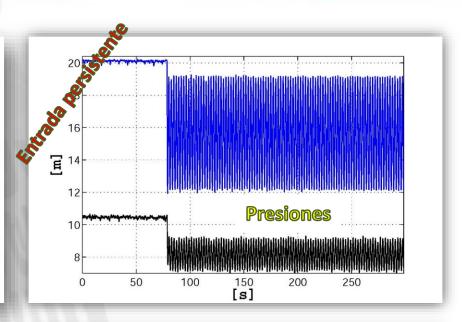
ΣDX-On-Line-II-UNAM: Basado en un modelo

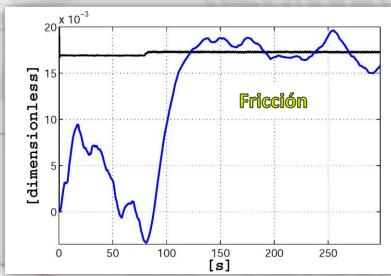


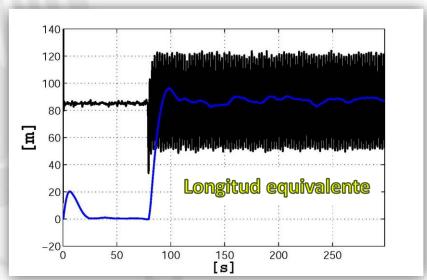






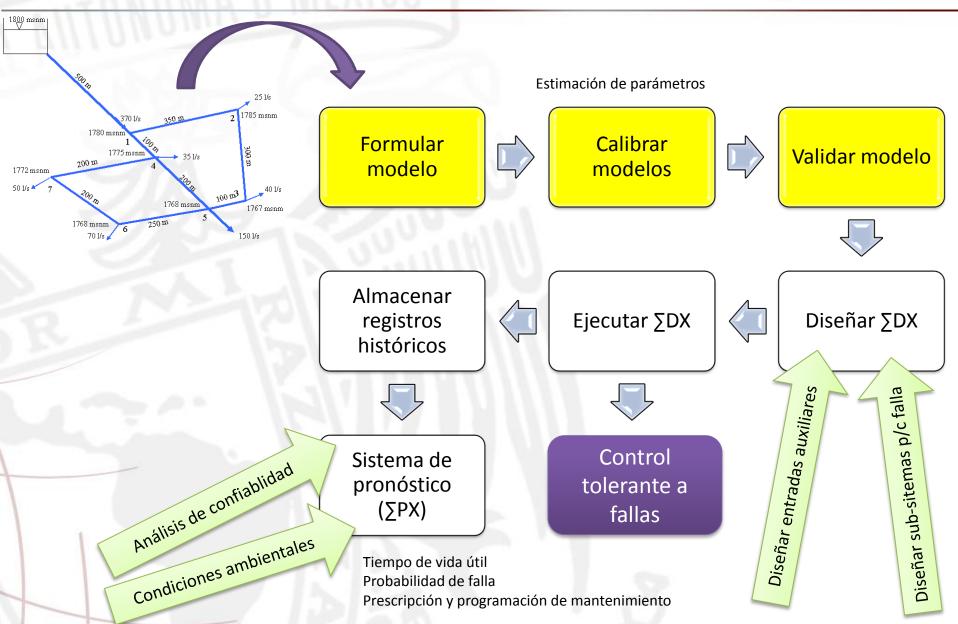






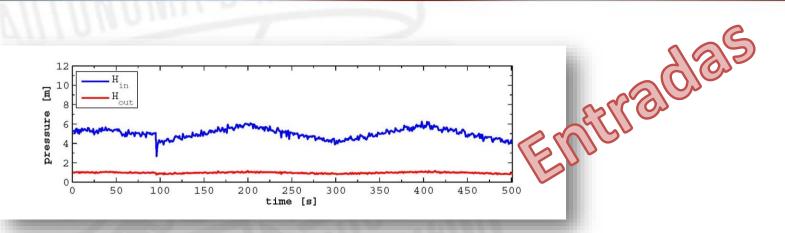




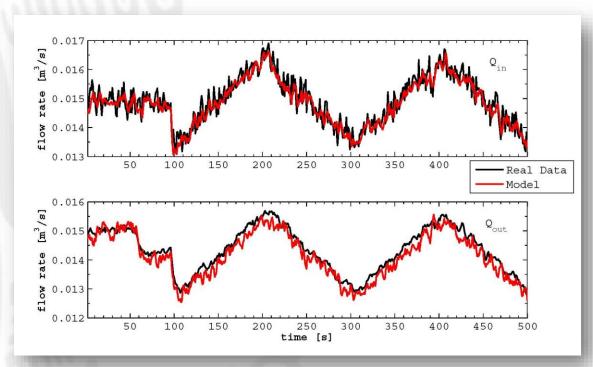






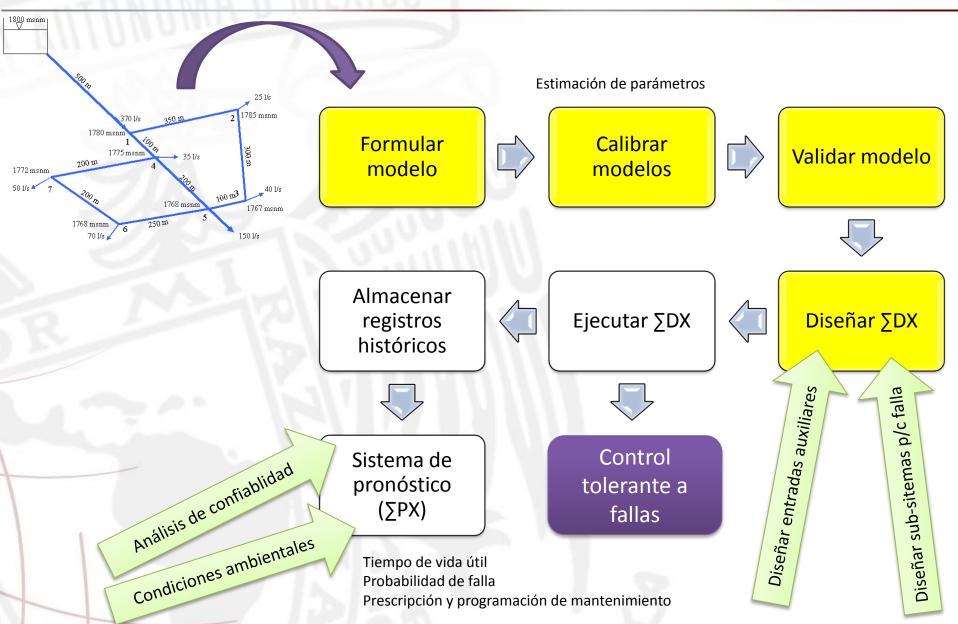














Generación de señales auxiliares para la estimación de parámetros.

- ** Para sistemas no lineales la observabilidad puede depender de las entradas.
- 🔀 Es difícil encontrar dichas entradas de manera analítica.
- **%** Una manera de hacerlo es heurísticamente.

Algoritmo de optimización para encontrar una secuencia de entrada óptima que asegure la observabilidad de un sistema no lineal.



Una entrada que asegure que todos los eingenvalores del gramian de observabilidad sean > 0

$$E = \sum_{l=0}^{N} ||y||^{2} =: x_{0}^{T} \Gamma(N, N) x_{0}$$

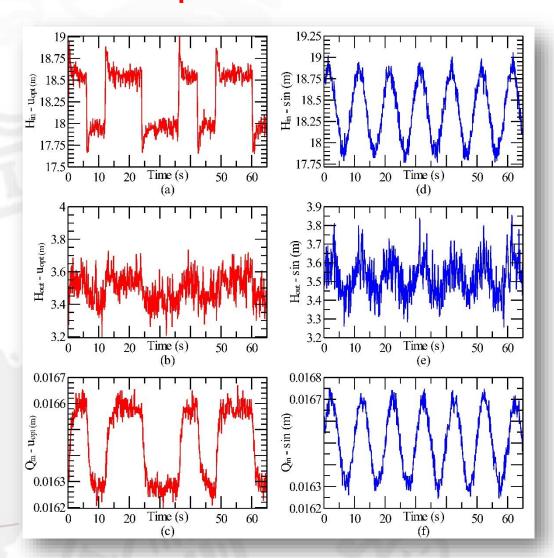
¿Qué es el gramian de observabilidad?

Es una medida de la energía visible en la señal de salida de un sistema. La observabilidad del sistema puede caracterizarse a través del gramian.





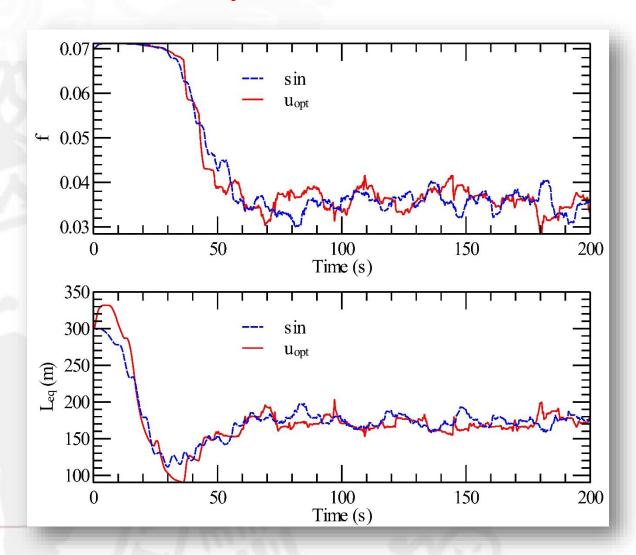
Generación de señales auxiliares para la estimación de parámetros.





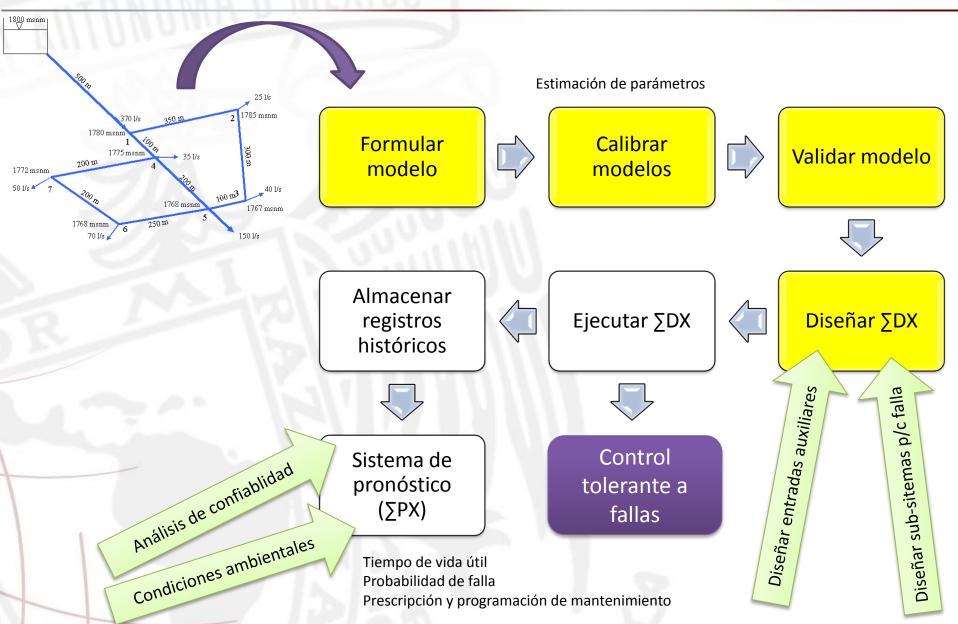


Generación de señales auxiliares para la estimación de parámetros.









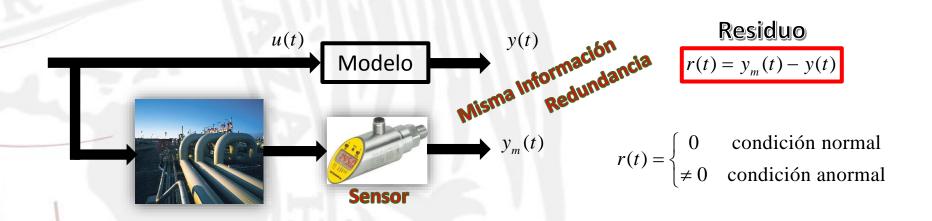




Selección de fallas a determinar

Fallas consideradas: Fallas en los sensores de flujo aguas arriba, aguas abajo, fallas en los sensores de presión aguas arriba, aguas abajo y fugas.

Técnica utilizada: Generación de residuos. Matriz de residuos.







$$r_1 = Q_{in} - Q_{out}$$

$$r_2 = -\dot{Q}_{in} - \mu Q_{in} | Q_{in} | + \frac{a_1}{L} (H_{in} - H_{out})$$

$$r_3 = -\dot{Q}_{out} - \mu Q_{out} | Q_{out} | + \frac{a_1}{L} (H_{in} - H_{out})$$

$$r_4 = -\dot{Q}_{in} - \mu Q_{in} | Q_{in} | + \frac{a_1}{L} H_{in} - \frac{a_1 a_2}{L^2} r_1' + c_1$$

$$r_5 = -\dot{Q}_{out} - \mu Q_{out} | Q_{out} | + \frac{a_1}{L} H_{out} - \frac{a_1 a_2}{L^2} r_1 + c_2$$

⊗ ≠ **0**

 $S_1(\Delta_{Q_{in}})$: Falla en el sensor de flujo Qin

 $S_1(\Delta_{Q_{out}})$: Falla en el sensor de flujo Qout

 $S_1(\Delta_{H_{in}})$: Falla en el sensor de flujo Hin

 $S_1(\Delta_{H_{out}})$: Falla en el sensor de flujo Hout

 $S_1\left(\Delta_{Q_f}\right)$: Fuga

$$r_1 = \int_{t_0}^T (Q_{in} - Q_{out}) dt$$

	$S_1(\Delta_{Q_{in}})$	$S_2(\Delta_{Q_{out}})$	$S_3(\Delta_{H_{in}})$	$S_1(\Delta_{H_{out}})$	$S_1\left(\Delta_{Q_f}\right)$
r_1	③	\odot			\odot
r_2	\odot		③	③	③
r_3		③	③	③	③
r_4		\odot	\odot		\odot
r_5	\odot	\odot		\odot	\odot



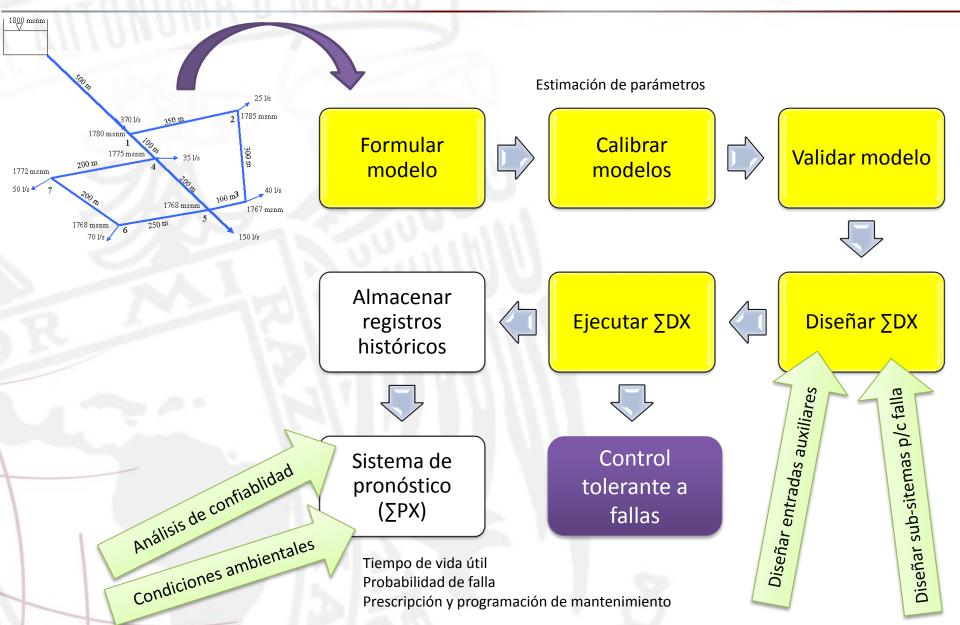


Localización y reconstrucción de las fallas

- 🔀 1 Fuga
- 💥 1 Fuga (utilizando sólo sensores de flujo)
- Fugas secuenciales
- K Fugas simultaneas (Sólo en Simulación)
- Kallas en sensores de presión y flujo
- 1 Fuga en una tubería con un ramal











ΣDX-1Fuga-II-UNAM











Fuga en GdI (SIAPA)

Observador de estados



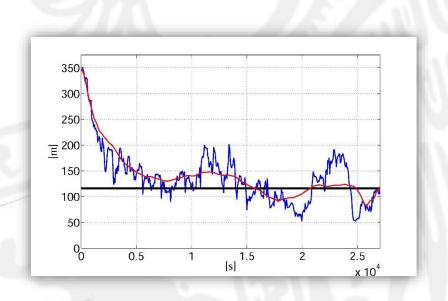
$$\begin{split} \dot{\hat{Q}}_{1} &= -\frac{f}{2\phi A_{r}} \hat{Q}_{1} \, | \, \hat{Q}_{1} \, | + \frac{g A_{r}}{\Delta z_{f}} (H_{in} - \hat{H}_{2}) \\ \dot{\hat{H}}_{2} &= \frac{b^{2}}{g A_{r} \Delta z_{f}} (\hat{Q}_{1} - \hat{Q}_{2} - \lambda_{f} \sqrt{\hat{H}_{2}}) \\ \dot{\hat{Q}}_{2} &= -\frac{f}{2\phi A_{r}} \hat{Q}_{2} \, | \, \hat{Q}_{2} \, | + \frac{g A_{r}}{L - \Delta z_{f}} (\hat{H}_{2} - H_{out}) \\ \dot{\hat{\Delta}}_{Z_{f}} &= 0 \\ \dot{\hat{\lambda}}_{f} &= 0 \end{split}$$

Filtro de Kalman Extendido

Variables estimadas $\hat{\Delta}z_f, \hat{\lambda}_f$











¿Qué nos falta por hacer?

- ** Localización de fugas en redes de ductos
- Localización de diferentes fallas en redes de ductos
- Fugas simultaneas (¡Qué funcione!)
- Sistemas de pronóstico para ductos
- Sistema de diagnóstico para redes de ductos
- Control tolerante a fallas para evitar pérdidas en redes de ductos
- \nearrow Desarrollar \sum DX basados en un parche de monitoreo





¿Qué nos falta por hacer?











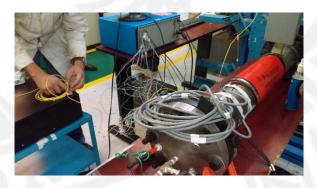








¿Qué nos falta por hacer?



















Gracias por su atención

Dra. Lizeth Torres

ftorreso@iingen.unam.mx
http://www.lizeth-torres.info/