

MONITOREO DE DUCTOS CON SENSORES DE FIBRA ÓPTICA DISTRIBUIDOS

C. VERDE Y D. CEBALLOS

El monitoreo y la rápida detección e identificación de incidentes en redes de fluidos, es imprescindible, pues las consecuencias ante eventos anormales van desde pérdidas monetarias, hasta daños irreversibles a los ecosistemas y a la salud. La Coordinación de Eléctrica y Computación del Instituto de Ingeniería ha abordado el problema de monitorear ductos de forma automática en tiempo real, usando mediciones de presión y gasto, cuyas series de tiempo son procesadas con modelos analíticos. Sin embargo, ante daños múltiples en el sistema se presenta una incapacidad de localización de eventos, con solo mediciones en los extremos del ducto. Así que es de gran interés tecnológico desarrollar dispositivos digitales usando sensores distribuidos con capacidad de monitorear múltiples fallas en los ductos.

Por otro lado, una fibra óptica tiene la potencialidad de detectar tensiones y presiones estáticas y dinámicas causadas por vibraciones y otros tipos de perturbaciones externas. Para el caso del monitoreo de ductos hidráulicos, estos sensores pueden detectar las vibraciones de las paredes del ducto provocadas por variaciones en el flujo circulante, y permiten en principio detectar vibraciones atípicas causadas por fugas o fracturas en los ductos. Esta propuesta, novedosa en nuestro país, busca responder preguntas sobre su viabilidad y cómo varía su funcionamiento con el tipo de material del ducto, la intensidad del haz de luz, y la colocación de la fibra óptica en el ducto, etc.

Para responder las preguntas arriba planteadas se realiza con apoyo de la DGAPA-PAPIIT IT100424 un proyecto sobre

la factibilidad de construir un sistema novedoso de monitoreo integral de ductos considerando la fibra óptica como un sensor instalado externamente en los ductos y que permita potencializar al Vigilante Virtual-UNAM (VIVI-UNAM) desarrollado con sensores convencionales. El estudio es fundamentalmente experimental y cubre tres etapas: el diseño y construcción de un dispositivo optoelectrónico denominado radar láser, la instalación física de la fibra óptica en el ducto y el procesamiento de la respuesta de la fibra óptica ante pulsos con diferentes escenarios de operación. La primera etapa asociada a la construcción y pruebas del radar láser se ha terminado y actualmente se estudian opciones viables de colocación de la fibra en el ducto para maximizar el registro de la señal reflejada asociada con las vibraciones percibidas por la fibra. La Figura 1 muestra el ducto hidráulico piloto de pruebas donde se puede observar la fibra óptica ya instalada sin recubrimiento. Se hace notar que el material y espesor del ducto y tipo de fluido transportado juegan un papel importante en la respuesta dinámica de la fibra provocada por el fenómeno de transporte del fluido. Los estudios realizados en el laboratorio reportan a la fecha que la sensibilidad de la fibra es mucho menor en un ducto de acero que en caso de un ducto de acrílico, para iguales condiciones de operación del fluido. Actualmente, se busca determinar la relación gasto de fluido con intensidad de la señal reflejada para diversas condiciones del ducto.



Figura 1. Ducto hidráulico piloto con fibra óptica enrollada alrededor de una sección

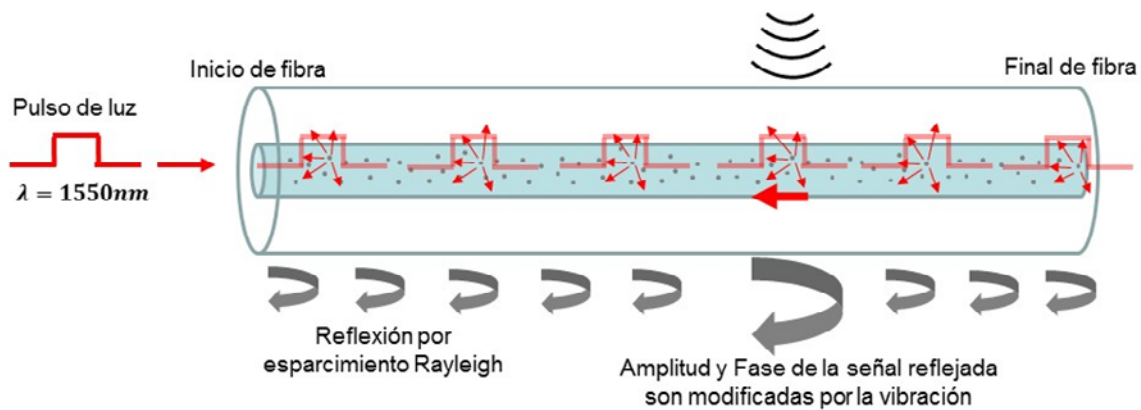


Figura 2. Reflexiones del pulso de luz causados por esparsamiento Rayleigh

El principio de funcionamiento del sensor de fibra óptica distribuido se basa en el fenómeno de retro-esparsamiento Rayleigh, que puede entenderse con ayuda de la Figura 2. En esta se muestra cómo los pulsos de luz producidos por el radar óptico, al propagarse en la fibra generan una reflexión de luz en cada posición o punto de la fibra. Esta reflexión se debe a imperfecciones y partículas que se encuentran en el interior de la fibra distribuidas en forma aleatoria a lo largo de ella y cuyos tamaños son menores a la longitud de onda de la luz transmitida que es de 1550 nm [1].

Cuando la fibra está sometida a esfuerzos mecánicos, tanto la fase como la amplitud de la luz reflejada se ven afectadas. De esta forma, se puede detectar la presencia de una perturbación en cualquier punto o posición de la fibra. En particular, cuando se coloca una fibra óptica alrededor del ducto, el gasto del fluido produce vibraciones que se manifiestan alterando el comportamiento de la onda de luz reflejada en las zonas de contacto. De ahí que sea posible monitorear y estimar el estado del fluido en el ducto, incluyendo diagnosticar eventos como son las fallas a través de la onda reflejada del pulso de luz.

El dispositivo optoelectrónico diseñado en el Instituto permite variar la intensidad y duración del pulso y está constituido por un radar láser que envía pulsos de luz a través de la fibra óptica enrollada en el ducto. La Figura 3 muestra el radar láser diseñado, el cual está formado por 1) el emisor de láser de alta coherencia, y 2) el modulador óptico que bloquea el haz en forma periódica para generar pulsos de luz con duración de 10 ns a 100 ns.

Además, el radar incluye 3) un amplificador óptico y 4) un filtro óptico para eliminar el ruido. Por otro lado, la recuperación del haz reflejado se logra a través de 5) un circulador óptico el cual redirige la luz reflejada hacia un detector conformado por 6) un fotodiodo de alta sensibilidad que registra la potencia de luz en la forma de un voltaje continuo que es digitalizado por una tarjeta de adquisición de datos A/D con frecuencia de muestreo del orden de 10^8 Hz. Cabe mencionar que este dispositivo se encuentra ubicado en un cuarto de control o monitoreo alejado del ducto y aislado de vibraciones para evitar interferencias con las señales de interés.

Para poder analizar la repuesta de la fibra ante variaciones en el estado del fluido, se ha seleccionado una sección de 20 m del ducto que incluye elementos mecánicos como bridas y soportes, tratando de emular condiciones reales de un ducto. La instalación de la fibra óptica se ha llevado a cabo enrollando la fibra óptica alrededor del ducto, conservando un patrón constante en cada vuelta. Durante el enrollado de la fibra óptica se ha procurado mantener entre cada vuelta una tensión constante, fijando la fibra en cada vuelta. En todos los experimentos se usa una fibra óptica sin recubrimiento de plástico para maximizar la transferencia de vibración entre las paredes del ducto y los puntos de contacto de la fibra óptica.

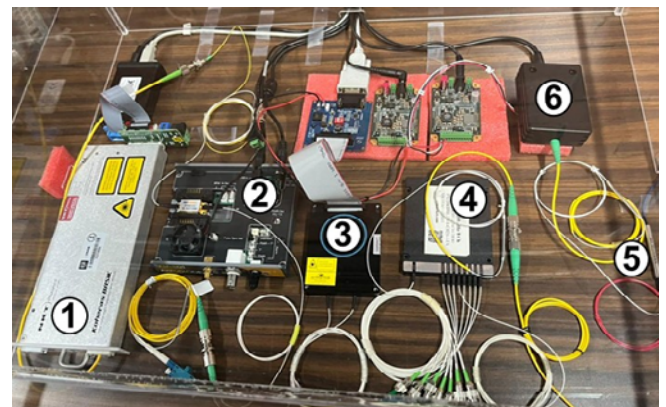


Figura 3. Radar láser con sus componentes optoelectrónicos clave: 1) Láser coherente, 2) Modulador óptico, 3) Amplificador óptico, 4) Filtro, 5) Circulador, 6) Fotodetector APD

El radar láser se ha configurado para transmitir pulsos de luz con 20 ns de duración, una potencia óptica de 10 dBm, y una tasa de repetición de 10 KHz. Esta tasa de repetición permite transmitir a cada 0.1 ms un pulso de luz. Es decir, durante 1 s se envían 10,000 pulsos. Como resultado de este tren de pulsos, se obtienen los reflejos de luz en cada punto de la fibra óptica. Seleccionando un punto arbitrario de la fibra, la Figura 4 presenta la potencia de luz reflejada en dicho punto considerando tres valores de flujo nominal en el ducto.

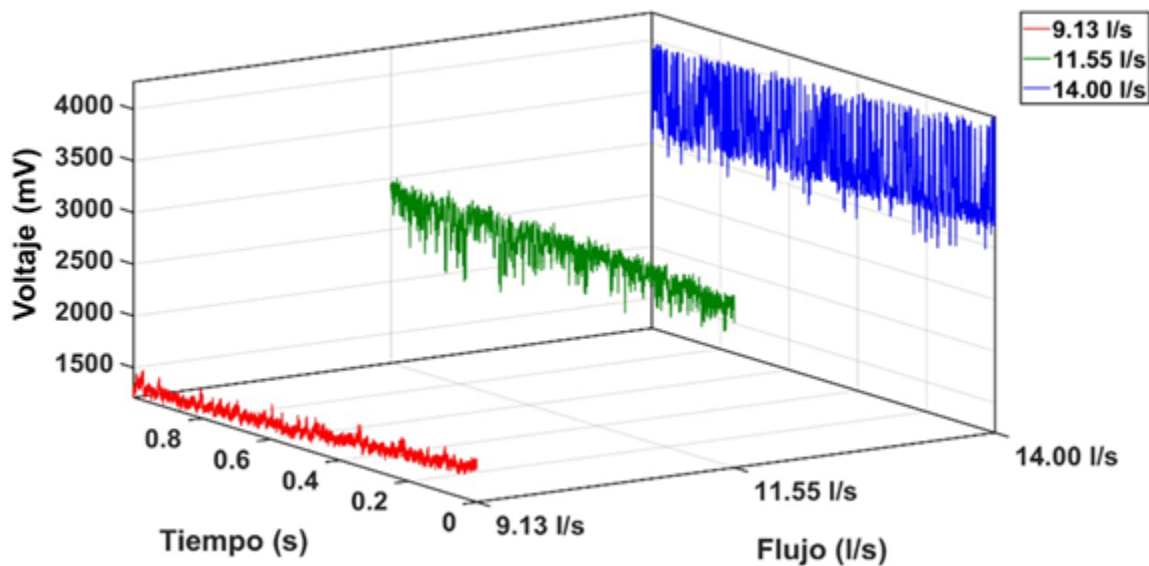


Figura 4. Serie de tiempo del voltaje capturado por el fotodiodo durante 1 s para un punto de la fibra óptica usando valores de flujo: 9.13 l/s, 11.55 l/s, y 14 l/s

Las variaciones temporales de la Figura 4 permiten afirmar que a mayor flujo se tiene una mayor potencia reflejada. Para analizar de una manera cuantitativa la potencia reflejada se estimaron las medias μ_T y las desviaciones estándar σ_T de las series temporales de 50 puntos de la fibra equivalentes a una sección de 4 m de ducto. El análisis estadístico de estos datos nos llevó a seleccionar como parámetro más representativo del flujo a la media.

Para caracterizar el flujo con un solo parámetro por secciones del ducto Δ_L , se ha propuesto agruparlos de acuerdo al valor medio espacial denotado por $\mu_{\Delta L}$. Este tratamiento estadístico permite caracterizar el flujo por secciones del ducto. En particular, tomando una sección $\Delta_L=4m$ y llevando a cabo cinco experimentos para tres valores de flujo de 9.13 l/s, 11.55 l/s y 14 l/s se obtienen los valores medios mostrados en la Figura 5.

En primer lugar, se observa que los valores de $\mu_{\Delta L}$ para cada experimento mantienen un valor estable para cada flujo. En segundo lugar, se evidencia la tendencia de que, a un mayor flujo, mayor es el valor de $\mu_{\Delta L}$. Estos resultados permiten validar que $\mu_{\Delta L}$ es un buen parámetro para caracterizar flujos por secciones; sin embargo, está en estudio la búsqueda de la mejor relación que caracterice la potencia con el flujo y la sensibilidad con respecto a la longitud de la sección Δ_L . De manera paralela, con los datos adquiridos vía el sensor óptico distribuido se realiza: a) el análisis de correlación temporal entre puntos del ducto a través de la fibra óptica, con el objeto de identificar patrones del haz reflejado para detección de fugas, y b) el estudio de la sensibilidad del sistema empleando diferentes materiales del ducto.

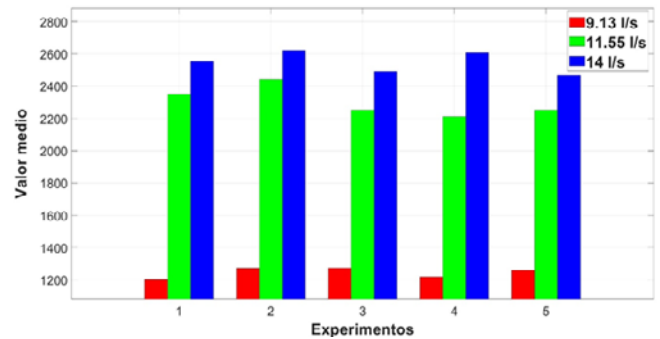


Figura 5. Valores medios $\mu_{\Delta L}$ de la señal reflejada para cinco experimentos considerando tres flujos: 9.13 l/s, 11.55 l/s, y 14 l/s

Como fortaleza de este proyecto, se considera que el sensor óptico ha generado sinergias en la coordinación de eléctrica y computación y es un punto de partida para disponer de un sistema de monitoreo distribuido integral de fugas si se complementa con el VIVI UNAM, cuyo método de funcionamiento ya ha sido patentado por el Instituto de Ingeniería.

Referencias

- [1] Liu, X., Jin, B., Bai, Q., Wang, Y., Wang, D. and Wang, Y. (2016). Distributed Fiber-Optic Sensors for Vibration Detection. *Sensors*,16(8), pp.1164–1164.