

## SENSORES ACÚSTICOS DISTRIBUIDOS DAS: UNA TECNOLOGÍA EMERGENTE

MATHIEU PERTON

Y FRANCISCO J. SÁNCHEZ SESMA

Los sensores acústicos distribuidos o sistema DAS (por las siglas en inglés de *Distributed Acoustic Sensing*), utilizado recientemente para estudiar la criósfera, el fondo marino y los volcanes, constituye una tecnología emergente que transforma un cable de fibra óptica en un arreglo denso de sensores sísmicos (ver Figura 1). Lo fantástico es que el cable mismo es el detector del movimiento. Para recabar la información debe considerarse que el DAS se compone de una fuente láser impulsiva, que emite de manera regular pequeños pulsos de luz (en la sección 2 se describe este funcionamiento en detalle) y un dispositivo interrogador (un sensor opto electrónico) que analiza la luz que regresa debida a reflexiones ópticas a lo largo de la fibra. Cuando una onda elástica (perturbación transitoria en un sólido) o acústica (perturbación transitoria en un fluido) se propaga en una porción de la fibra, esta última se deforma, consecuentemente, cambia la fase óptica entre el principio y el final del pulso de luz. El resultado es una interferencia óptica dentro del

pulso de luz que implica un cambio de fase óptica directamente proporcional a la deformación de la fibra. La información obtenida también puede ser la tasa de deformación, dependiendo de ajustes de la medición óptica.

Esta tecnología presenta varias ventajas: 1) permite una medición económica de alta densidad en algunos metros, en varias decenas o centenas de kilómetros (como se discute en la sección 3); 2) las mediciones son realizadas espacial y temporalmente de manera continua; además, son accesibles en tiempo real con una tasa de funcionamiento de casi 100% (a diferencia de los sismómetros no permanentes que generalmente funcionan menos de 80% del tiempo instalado); 3) el DAS permite mediciones en lugares donde no se podrían dejar sismómetros convencionales: cerca de lugares con altas temperaturas, con altas presiones (p. ej. en el fondo del mar), donde no hay fuente de alimentación eléctrica o exposición al sol, excluyendo el uso de paneles solares, donde no se recibe señal GPS para sincronizar los aparatos, en ciudades o lugares con mucha inseguridad. Existe también un inconveniente mayor, la medición es de un solo componente: la deformación a lo largo de la fibra. La deformación es un tensor de seis componentes independientes, se mide entonces un solo grado de libertad sobre seis. Comparado con muchos sismómetros de velocidad que miden tres grados de libertad de tres, la técnica DAS no permite el análisis de la polaridad de las ondas y tiene menos sensibilidad al efecto de las ondas según sus incidencias.

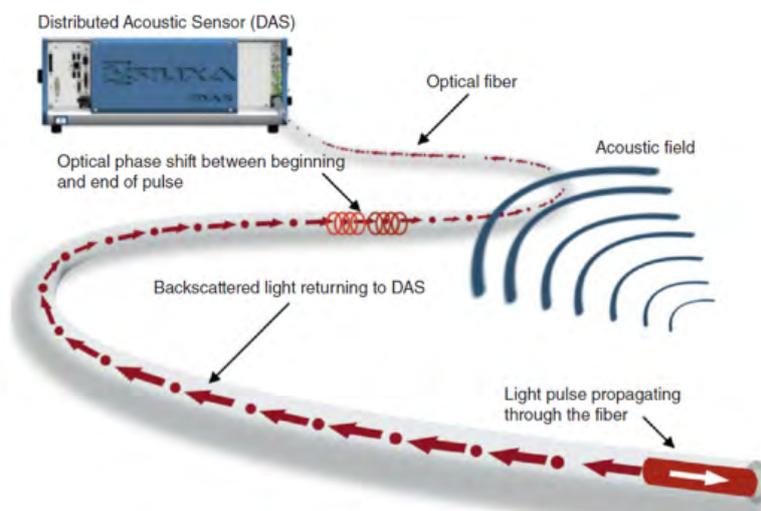


Figura 1. Principio de funcionamiento del DAS (tomado de Shatalin *et al.*, 2021). El DAS se compone de un láser y de un interrogador. El láser envía un pulso de luz que rebota sobre pequeñas imperfecciones; cuando el pulso ha rebotado regresa al interrogador lo que determina la deformación a lo largo de la fibra óptica.

No obstante, los beneficios que aporta la abundancia de mediciones compensan los problemas, lo que ha permitido numerosas aplicaciones. Por ejemplo, es posible obtener con DAS imágenes del subsuelo con una precisión sin precedentes, además de hacer el monitoreo de microsismicidad en los sitios de producción de energía o de secuestro de bióxido de carbono; esto es, dentro de los mismos pozos. La primera etapa reportada en la literatura fue de validar la técnica y comprender mejor la respuesta del sistema: En efecto, los arreglos DAS han registrado microtemores, terremotos regionales, telesismos y señales en puntos críticos de infraestructura, tal y como se hace con sismómetros tradicionales. Se demostró que, a pesar de medir diferentes cantidades, se podían integrar espacialmente las deformaciones para comparar con uno de los componentes de la velocidad (la derivada del desplazamiento de una partícula en un punto dado). Ese movimiento usualmente se registra con sensores tradicionales. Además, el análisis de estos campos de ondas está permitiendo estudiar terremotos donde los sensores tradicionales son escasos. También, se benefician los estudios de identificación de estructuras geológicas, de fallas y de imágenes del subsuelo. La técnica DAS se ha utilizado recientemente para estudiar la criósfera, el fondo marino y los volcanes.

### ¿Cómo funciona el DAS?

Un láser impulsivo es un láser diferente al láser continuo que ocupamos en tareas cotidianas (lectura de CD, escanear código de barras, etc.). Este láser manda pulsos con una alta tasa de repetición (generalmente del orden del kHz, o sea, miles de pulsos por segundo). El pulso es un tren continuo de luz coherente durante algunos nanosegundos ( $\approx 10\text{ns} \rightarrow 10\text{e-9s}$ ), lo que corresponde a un tren de luz que mide aproximadamente dos metros de largo dentro de la fibra. Aunque las fibras ópticas tendrían que transmitir la luz de manera perfecta, existe en realidad una cantidad infinita de imperfecciones adentro del material que la constituye (vidrio de sílice). Como la longitud de onda del láser es generalmente del orden del micrómetro ( $1\ \mu\text{m} = 10\text{e-6m}$ ), esto es ya en la banda del infrarrojo, y es de un tamaño del mismo orden que las imperfecciones, la luz rebota en éstas. El rebote es elástico (desde un punto de vista óptico), lo que significa que la luz no cambia de longitud de onda. Así, el pulso de luz no se transmite 100% y una muy pequeña parte se refleja en las imperfecciones, la cual, regresa hacia el DAS donde es analizado. Por su parte, el diámetro de las fibras es aproximadamente del orden de  $10\ \mu\text{m}$ , lo que resulta en muchas imperfecciones a través de una misma sección de la fibra. Consecuentemente, las reflexiones ocurren continuamente a lo largo de la fibra de manera homogénea, de tal manera que, permite medir el movimiento de la fibra en toda su extensión. Debido a lo anterior y a que el pulso de luz mide aproximadamente tres metros, las reflexiones de luz se traslapan y se forma lo que se conoce como “scattering de Rayleigh”. Consecuentemente, a pesar de que se envía un pulso de luz solamente, al interrogador regresa un haz de luz continua.

La medición consiste en comparar la luz que regresa con una referencia, más específicamente los cambios de fases entre dos rebotes separados por una longitud llamada de “gauge”, o sea, un retraso óptico. Existen varias maneras de realizar esta medición, en tiempo o en frecuencia (Shatalin *et al.*, 2021), pero todas dependen de la distancia de gauge. Así, no se mide la deformación en una posición puntual, sino en un segmento de la fibra que equivale a la longitud de gauge, que es del orden del metro o de decenas de metros. Este factor determina tanto la relación señal-ruido como la resolución espacial de las mediciones. Como cada paquete de luz que regresa al interrogador ha efectuado una ida y vuelta hasta una porción de la fibra, es fácil determinar la posición de esa porción de fibra a partir del tiempo de ida y vuelta, ya que la velocidad de la luz es constante.

El principio físico usado en el DAS es un análisis de fase de reflectometría óptica en el dominio temporal (phase-OTDR por optical time domain reflectometry). Se le denominó DAS porque permite una medición distribuida a lo largo de la fibra y porque los primeros experimentos se llevaron a cabo en fluidos en los que se propagan ondas acústicas. No obstante, también se le puede conocer como “Distributed Vibration Sensing” (DVS), o sea, sensor de vibración distribuido, para aplicaciones de sismología.

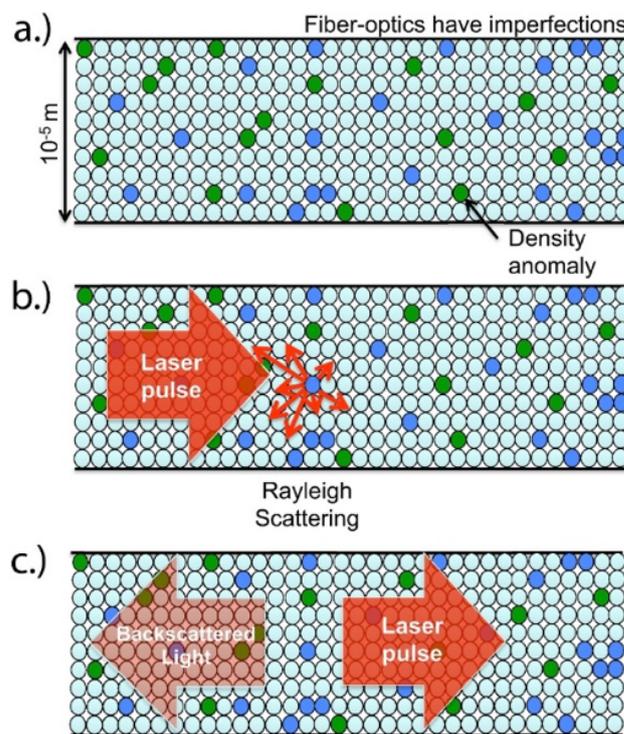


Figura 2. Principio de los rebotes de luz en la fibra óptica (tomado de Lindsey *et al.*, 2020). La mayoría de la luz sigue su camino, pero una pequeña cantidad regresa hacia el interrogador con la información de un cambio de fase

## El experimento en la CDMX

Desde el mes de mayo de 2022, estamos utilizando un DAS con las fibras ópticas que unen las tres super computadoras universitarias de CDMX: de la UNAM, del IPN-Cinvestav y de la UAM, las cuales, constituyen “la Delta Metropolitana” (vea Figura 3). Las fibras están puestas a un costado de las vías del metro por lo que miden deformaciones, principalmente en profundidad, a unos cuantos metros debajo de la superficie. Cuando se instala una fibra óptica, en realidad se instala un cable que lleva decenas de fibras, ya que el precio de la fibra es insignificante con respecto al costo de la instalación. La mayoría de esas fibras esperan así un uso a futuro y se denominan como fibras oscuras (dark fiber). Entonces, usamos unas de esas fibras, sin agregar costo alguno al experimento. Una vez que se acabe el experimento, las fibras quedan intactas, listas para otro uso. El experimento durará un poco más que un año. Durante la mayor parte del tiempo, hemos realizado el experimento con la fibra que sale de la DGTIC al Cinvestav. También, hemos empezado a utilizarlo entre la UNAM y la UAM.

Los objetivos principales son: 1) realizar una tomografía de ruido ambiental para ver los cambios de propiedades en el tiempo; 2) estudiar la atenuación de las ondas en el valle para examinar los efectos lineales y no lineales de los sismos.

El sismo del 19 de septiembre 2022 permitió ampliar nuestro entendimiento de la respuesta sísmica. Presentamos en la Figura 4 las mediciones de las deformaciones durante el sismo que sacudió la CDMX. También, se detectaron varios micro sismos.

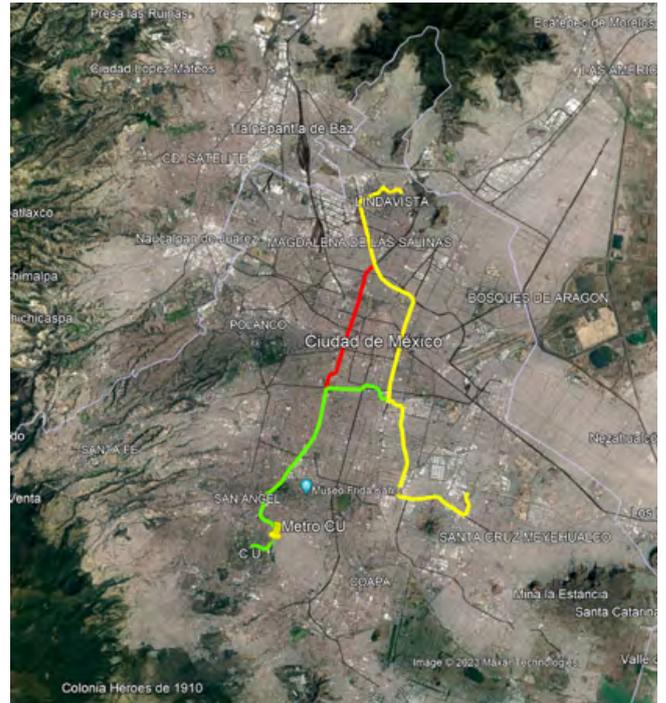


Figura 3. Mapa de las fibras que constituyen la Delta Metropolitana

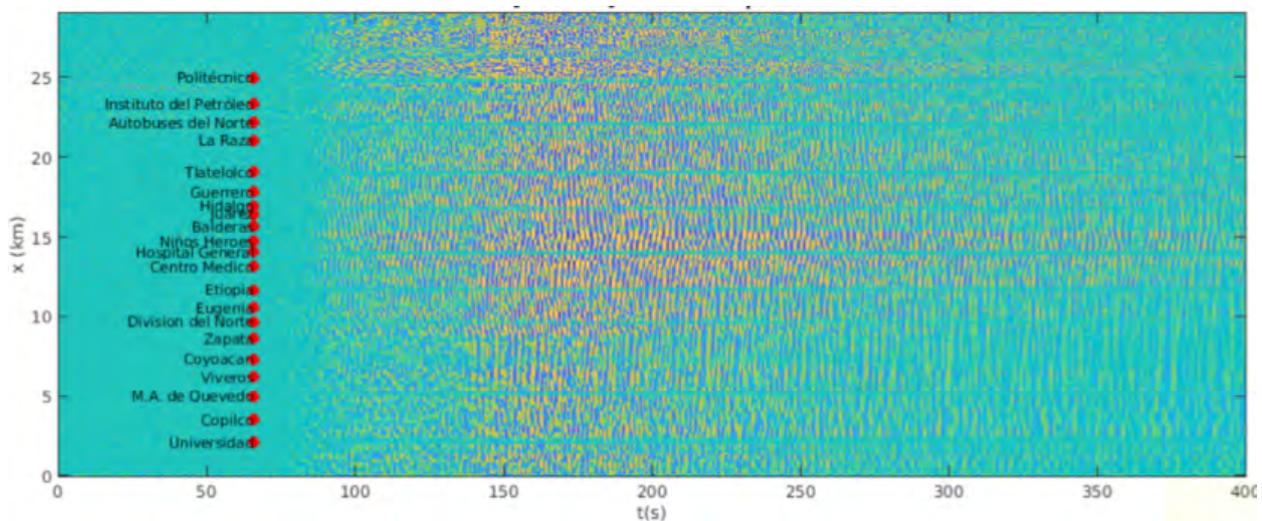


Figura 4. Deformaciones durante el sismo del 19 de septiembre de 2022

## ¿Precios?

El equipo DAS que tenemos ahora que nos ha sido facilitado en préstamo por la Universidad de Michigan gracias a las gestiones del Dr. Zack Spica, profesor de esa universidad, tiene un valor de 125,000 dólares. También, se tiene que considerar un servidor NAS (Network-Attached Storage-almacenamiento conectado a la red) que sirve para almacenar la enorme cantidad de datos generados, con un costo de 25,000 dólares.

Por otra parte, un sismómetro de banda ancha de tres componentes tiene un costo de 10,000 dólares. A éste, hay que agregarle un GPS, una batería, un disco para almacenar los datos y, sobre todo, un costo de instalación y mantenimiento que podría ascender a 100 dólares por mes. El total por un año de medición es de 12,000 dólares.

En nuestro experimento DAS, se tienen más de dos mil puntos de medición. Un experimento equivalente con sismómetros

tradicionales tendría un costo de 160 veces mayor. Además, las mediciones con sismógrafos suelen tener interrupciones debido a fallas de alimentación eléctrica o de GPS. En comparación, no hemos tenido, hasta el momento, una interrupción del DAS. |

## Referencias

---

- Lindsey, N. J.; Rademacher, H. y Ajo-Franklin, J. B. (2020). On the Broadband Instrument Response of Fiber-Optic DAS Arrays. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2), e2019JB018145. <https://doi.org/10.1029/2019JB018145>.
- Shatalin, S.; Parker, T. y Farhadiroushan, M. (2021). High Definition Seismic and Microseismic Data Acquisition Using Distributed and Engineered Fiber Optic Acoustic Sensors. 1-32. <https://doi.org/10.1002/9781119521808.CH1>.