

Utilizzazione dei cavi sottomarini esistenti per il rilevamento dei terremoti marini: l'evoluzione della tecnica SOP

1 — Le tecniche per il rilevamento dei terremoti marini e degli tsunami

Un Rapporto delle Nazioni Unite del 2015 stima che ogni anno ci sono 60.000 persone e 4 miliardi di dollari di beni esposti a rischio tsunami potenzialmente provocati da terremoti sottomarini o eruzioni vulcaniche.

Le tecniche di rilevazione di questi fenomeni, attualmente a disposizione o in via di sviluppo, sono essenzialmente le seguenti:

- rivelatori posti a terra, che costituiscono la base per la rilevazione dei fenomeni sismici, ma che non sono, per definizione, posizionati in prossimità delle zone potenzialmente esposte agli eventi sismici sottomarini;
- boe DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunami) che potenzialmente sono una buona soluzione, ma che sono presenti in numero limitato per il loro costo elevato e sono frequentemente fuori servizio sia per il loro posizionamento sia per atti di vandalismo;
- i cavi SMART (Science Monitoring And Reliable Telecommunications) che contengono nei loro ripetitori sommersi dei sensori di temperatura, di pressione e sismici. Tuttavia i primi di questi cavi non saranno disponibili prima del 2025, tenuto anche conto che la normativa dell'ITU-T si concluderà nel 2024 e occorrerà poi del tempo per una loro significativa diffusione.

2 - Il possibile impiego dei cavi sottomarini per telecomunicazioni esistenti

Si stima che ci siano attualmente in servizio nel mondo circa 450 cavi sottomarini per telecomunicazioni. Circa tre anni fa era venuta l'idea di utilizzarli come rete di rilevamento dei terremoti sottomarini. Naturalmente questo tipo di rilevamento non avrebbe potuto avere le prestazioni dei futuri cavi SMART, specificatamente progettati per le rilevazioni sismiche, ma avrebbe avuto il vantaggio di essere disponibile fin da ora.

I requisiti essenziali per l'utilizzazione dei cavi esistenti sono essenzialmente i seguenti: - la disponibilità ai terminali del cavo di un parametro da misurare, direttamente correlato all'attività sismica lungo il tracciato del cavo;

- la possibilità di localizzare il punto del cavo in prossimità del quale il fenomeno sismico si è verificato, tenendo conto che il cavo può avere una lunghezza di migliaia di chilometri;
- la possibilità di localizzare l'epicentro dell'evento sismico a mezzo di una triangolazione di misure fatte su diversi cavi posati nell'area di interesse;
- il costo aggiuntivo per la sua attuazione dovrebbe essere considerato come "accettabile" dall'operatore del cavo, per una rapida diffusione di questa possibile tecnologia;
- una rapida diffusione di queste possibili metodologie di rilevamento è una condizione importante anche perché uno degli obiettivi di un sistema di allarme per i terremoti marini e dei conseguenti possibili tsunami è che il rilevatore del fenomeno sia per quanto possibile vicino all'epicentro, in modo da avere un allarme rapido per le persone potenzialmente in pericolo. Al riguardo si deve tenere conto che per ogni 200 km di distanza tra il rilevatore e l'epicentro, c'è un minuto addizionale di ritardo per dare un potenziale allarme dell'arrivo di uno tsunami.

3 — Le tecnologie attualmente in sperimentazione sui cavi sottomarini esistenti

Sono attualmente in corso di sperimentazione tre possibili tecnologie per ottenere informazioni sui terremoti sottomarini, utilizzando i cavi sottomarini per telecomunicazioni esistenti:

- DAS (Distributed Acoustic Sensing) applicabile solo lunghezze inferiori a 100 Km e quindi di utilizzazione limitata alle zone costiere. Questa tecnologia è stata largamente sperimentata, in quanto basata su un metodo di misura delle caratteristiche delle fibre ottiche, fin dalla loro applicazione nelle reti di TLC;
 - LI (Laser Interferometry) che è stata sperimentata anche su un cavo transatlantico di 6.000 km. Inizialmente i laser impiegati avevano caratteristiche di laboratorio. Nella sperimentazione di cui sopra sono stati impiegati laser con prestazioni inferiori, che però non possono ancora essere considerati di tipo commerciale.
 - SOP (State Of Polarization) è stata sperimentata anche su un cavo transpacifico di 10.000 km. Attualmente è in corso una sperimentazione anche nel Mediterraneo.
- Questo Quaderno Tecnico è dedicato alla descrizione delle caratteristiche della tecnologia SOP.

4 - Che cosa si può misurare con la tecnica SOP da terminale a terminale sui cavi sottomarini esistenti

Le fibre ottiche sono prodotte con specifiche e tolleranze estremamente stringenti. Nonostante ciò, quando sono poste in un cavo e posate in opera, sono soggette a sollecitazioni che provocano un deterioramento della qualità ottica, rilevata anche da variazioni dello Stato di Polarizzazione (SOP) del segnale ottico trasmesso. Tra queste sollecitazioni ci sono anche quelle provocate dai movimenti conseguenza di un terremoto sottomarino.

In ricezione i moderni transponder con rivelazione coerente provvedono a misurare queste variazioni del SOP e a compensare con continuità queste "distorsioni" del segnale. È quindi possibile sfruttare questo processo per estrarre dati relativi a movimenti sottomarini da mandare poi ad un sistema di elaborazione esterno.

La figura 1 mostra una applicazione di questa tecnica basata sul rilevamento delle variazioni del SOP durante sei settimane sul cavo Curie (Los Angeles-Valparaíso) di lunghezza circa 10.000 km: si vedono chiaramente le zone rosse che corrispondono ad altrettanti eventi sismici verificatisi lungo il cavo, ma risulta altrettanto chiaro che è impossibile localizzare i punti del cavo dove questi eventi si sono verificati. Risulta quindi che questa applicazione del metodo SOP soddisfa il primo requisito di cui sopra, ma non il secondo riguardante la posizione degli eventi. Per soddisfare questo secondo requisito si deve dare un ruolo ai ripetitori sommersi.

5 - Il sistema di supervisione dei ripetitori sommersi

I cavi sottomarini per collegamenti a grande distanza sono dotati di ripetitori sommersi disposti in involucri cilindrici, che generalmente sono distanziati di 50-80 km l'uno dall'altro lungo il cavo. La maggior parte dei ripetitori installati sui cavi in servizio comprende un componente per la diagnostica: un Fiber Bragg grating (FBG). I FBG sono sintonizzati in modo da riflettere indietro un po' meno dell'1% della potenza di una piccola banda di lunghezze d'onda posta intorno a 1561 nm: questa operazione è indicata come "High-Loss Loopback" (HLL). La lunghezza d'onda 1561 nm è posta all'estremo superiore della banda C (1530-1565 nm) che è utilizzata nella quasi totalità dei sistemi sottomarini attuali per telecomunicazioni.

Nei cavi con ripetitori dotati di operatività HLL, è anche presente nella stazione terminale un trasmettitore di diagnostica, sintonizzato su 1561 nm, che è anche in grado di rilevare gli echi

provenienti da ogni ripetitore sommerso. Le informazioni ottenute consentono di rilevare, tra le altre cose, anche le interruzioni di fibra lungo il cavo. La precisione delle misure consente di rilevare quale è la sezione di ripetizione dove si è verificato il guasto, ma non è sufficiente a guidare una nave per la riparazione del guasto, così che è poi necessario l'impiego un dispositivo OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) per determinare con maggiore precisione la posizione del punto di rottura. L'attuale sistema di supervisione è basato sulla rivelazione di variazioni di livello del segnale a 1562 nm, senza alcun riferimento allo stato di polarizzazione.

Il canale di supervisione sopra descritto non è utilizzato con continuità, ma solo quando sono rilevate degradazioni / allarmi nello svolgimento del traffico di telecomunicazioni.

6 - Trasmettitore dedicato alla diagnostica

La figura 2 mostra lo schema di un possibile sistema per il rilevamento dei terremoti sottomarini basato sull'impiego dell'esistente canale di supervisione di cui al paragrafo precedente. Ad un estremo del cavo c'è un trasmettitore dedicato alla diagnostica. Inviando con questo trasmettitore, da un terminale, un impulso di diagnostica a 1561 nm, questo raggiungerà l'altro estremo del cavo essendo amplificato da tutti i ripetitori esistenti. Lungo il percorso, gli impulsi di ritorno da ciascun ripetitore, tramite l'HLL, saranno anch'essi amplificati fino ad arrivare al trasmettitore di diagnostica. In pratica questo consente di analizzare il SOP su segnali di ritorno da ogni punto di ripetizione. Nella figura sono indicati gli impulsi della luce in uscita (arancione) e quelli (verde tratteggiato) che sono riflessi in ogni ripetitore nella banda di ritorno dell'HLL. La frequenza degli impulsi è limitata dal vincolo che non ci sia sovrapposizione tra echi di ripetitori adiacenti. Questo è un vincolo importante perché la frequenza degli impulsi limiterà la risoluzione temporale delle misure. Ad esempio, in un cavo di 10.000 km di lunghezza, un impulso impiegherà circa 50 ms per raggiungere il ripetitore successivo e altri 50 ms per il ritorno, limitando così l'intervallo degli impulsi a non meno di 100 ms.

7 - Interpretazione dei segnali di eco ricevuti

Grazie alla presenza dell'HLL in ogni ripetitore, al terminale ricevente, piuttosto che una completa integrazione dei segnali ricevuti dall'intera lunghezza del cavo, si avrà che l'impulso che ritorna dal ripetitore N conterrà solamente l'integrazione dei segnali fino a quel punto.

Considerato che si conoscono i segnali dei ripetitori da 1 a N, si può sottrarre matematicamente ogni segnale fino ad ottenere il segnale di ritorno dal ripetitore N e lo stesso si può fare per ogni ripetitore posto nel cavo. Questo procedimento dà già dei risultati utili, ma per rendere i risultati ancora più significativi, si possono fare le misure ad entrambi gli estremi del cavo e poi combinare i dati per isolare i dati di interesse in ogni sezione di ripetizione.

8 - Dati ottenuti con il coinvolgimento dei ripetitori sommersi

Nel febbraio 2022 Infinera ha sperimentato un prototipo di questo trasmettitore dedicato alla diagnostica sul cavo Curie. Il 22 febbraio c'è stato un terremoto di magnitudo 6 con epicentro all'estremo dell'Argentina in prossimità dell'intersezione con Bolivia e Cile. Il lato sinistro della figura 3 mostra la posizione del terremoto (stella gialla) e la sua posizione tra i ripetitori 90 e 110 del cavo Curie con il ripetitore 90 in alto e il 110 in basso. La parte destra della figura 3 (in basso) mostra che per effetto del terremoto si sono registrati variazioni del SOP soprattutto nei ripetitori 98-106, mentre nella parte destra superiore della stessa figura 3 sono indicati i dati relativi al ripetitore 104.

Questi risultati mostrano che vi è un netto progresso rispetto ad una situazione basata solo sui dati dei due terminali del cavo, che si limiterebbe a segnalare il verificarsi di un terremoto lungo i 10.000 km del cavo.

9 - Una rete di rilevamento globale per la localizzazione

Per fare il passo successivo, cioè per passare, sulla base di dati raccolti dai cavi sottomarini, ad una indicazione del reale posizionamento di un sisma, occorre prendere in esame e correlare i dati provenienti da diversi sistemi sottomarini posati nell'area di interesse. L'esempio di una possibile rete di triangolazione è mostrato nella figura 4.

Tuttavia, è da tenere presente che, a mano a mano, che il processo di rilevamento/localizzazione diventa più complesso aumenta anche il tempo per la elaborazione di dati. Rimane quindi la validità per la gestione dei terremoti sottomarini con una migliore localizzazione, ma diminuisce il vantaggio ottenibile per la gestione degli tsunami.

10 - Il costo incrementale

Rimane da esaminare l'aspetto economico legato all'introduzione di queste nuove tecnologie. Condizione essenziale per assicurare che molti cavi possano prendere parte alla rete dei sensori sottomarini è quella di minimizzare il costo incrementale della soluzione da adottare. A parere di Infinera la soluzione descritta dovrebbe avere un costo incrementale adatto per una sua rapida diffusione. Il costo incrementale è infatti costituito solamente da due elementi: l'acquisizione del trasmettitore dedicato alla diagnostica, installato nella stazione terminale e il mancato ricavo legato alla frazione della capacità di un trasponder in servizio assegnata alle attività di rivelazione sismica. Quanto sopra è valido con l'approccio della sperimentazione Infinera sul cavo Curie, dove il trasmettitore può generare quattro o otto sottoportanti che possono portare traffico pagante, alle quali se ne deve togliere una che è sintonizzata in una banda HLL e usata come segnale di diagnostica.

11 - La sperimentazione nel Mediterraneo

Come si è detto, una sperimentazione significativa della tecnica SOP è stata fatta sul cavo Curie della lunghezza di circa 10.000 km, cavo posato nell'Oceano Pacifico da Los Angeles a Valparaíso, lungo la costa occidentale del continente americano.

Attualmente è in corso una sperimentazione della tecnica POS sul Cavo MedNautilus posato nel Mediterraneo (fig.5). Gli Enti interessati (MIMIT, INGV, TIM Sparkle, Google) hanno deciso di effettuare la sperimentazione su questo cavo che ha, ovviamente, distanze e profondità diverse da quelle oceaniche e, soprattutto ha una configurazione ad anello, in modo da verificare i miglioramenti conseguibili mediante una triangolazione dei dati nella localizzazione dell'epicentro dei terremoti marini. I primi risultati di questa sperimentazione sono stati presentati al Convegno SubOptics 23.

Conclusioni

La dimostrazione Infinera ha mostrato la fattibilità di una soluzione commercialmente disponibile di trasporto simultaneo sullo stesso cavo di traffico che genera ricavi e di informazioni sui possibili terremoti sottomarini. Il costo incrementale di questa soluzione potrebbe indurre gli operatori a realizzare, fin da ora, una rete di raccolta di informazioni su eventi sismici, soprattutto per quelli che si verificano sui fondali marini.

La sperimentazione di questa tecnologia sul cavo MedNautilus dovrebbe consentire di valutare in modo più preciso i vantaggi ottenibili da un suo impiego anche nel Mare Mediterraneo.

L'utilizzazione dei cavi sottomarini esistenti come rilevatori sismici potrebbe rappresentare una soluzione attraente per una prima fase di rilevamento dei terremoti sottomarini e degli tsunami, in attesa dell'entrata in servizio dei cavi SMART, nei quali fin dall'inizio prevista la presenza di sensori per il rilevamento delle caratteristiche in esame.

Bibliografia

- 1 - "Optical polarization-based seismic and water wave sensing on transoceanic cables", Zhan, Science 371, February 2021.
- 2 — "Polarization sensing using submarine optical cables" Mecozzi, 2021.
- 3 - "Seismology with Submarine Cables (Part II)", Zhan, SubOptic 2023.
- 4 - "Using submarine cables as a tsunami warning network" Bennet, Director of Solutions and Technology, Infinera, Subtel Forum #126, Sept 2022.
- 5 - "Monitoring channel of submarine cable systems" ITU-T Recommendations G.976, G.977, G.977.1.
- 6 - "Comparing sensitivity of state of polarization monitoring and distributed acoustic sensing in the Svalbard Arctic submarine communication cable" Skarvang, Subtel Forum #130, Sept 2023.
- 7 - "Applicable technologies for cable sensing" Nancy Sun, SMART Workshop, Honolulu, 2023.

Autore: ing. Gastone Bonaventura, esperto ITU-T

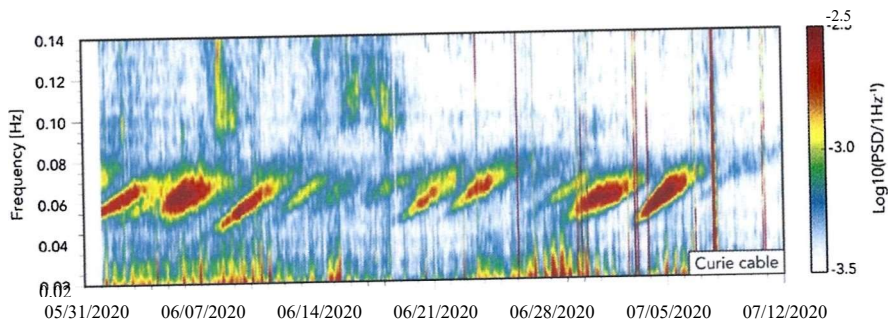


Figure 2: Ocean swell effects on SOP in the Curie cable Antonio Mecozzi et al., Optica Vol. 8, Issue 6, pp.

Figura 1

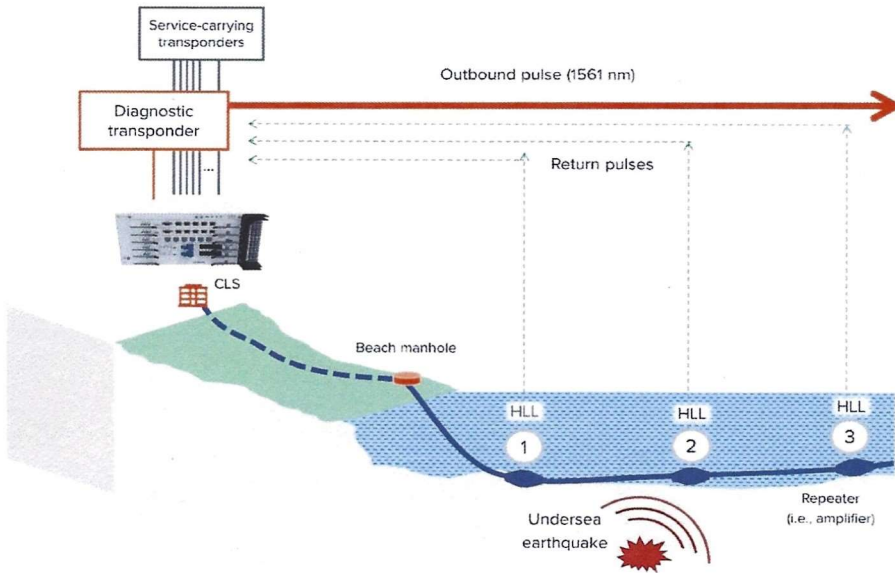


Figure3: Diagnostidtransponder and high-lossloopback(HLL)

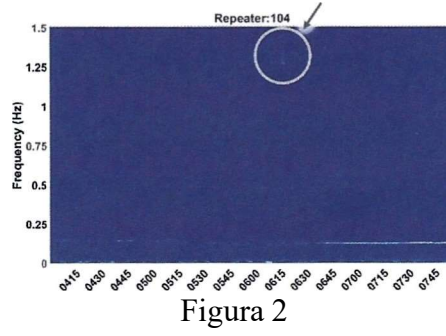


Figura 2

Figure W. Interpreting the data

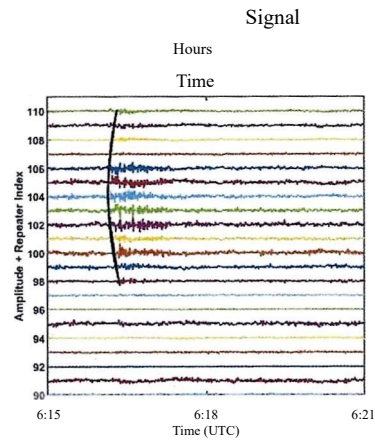


Figura 3

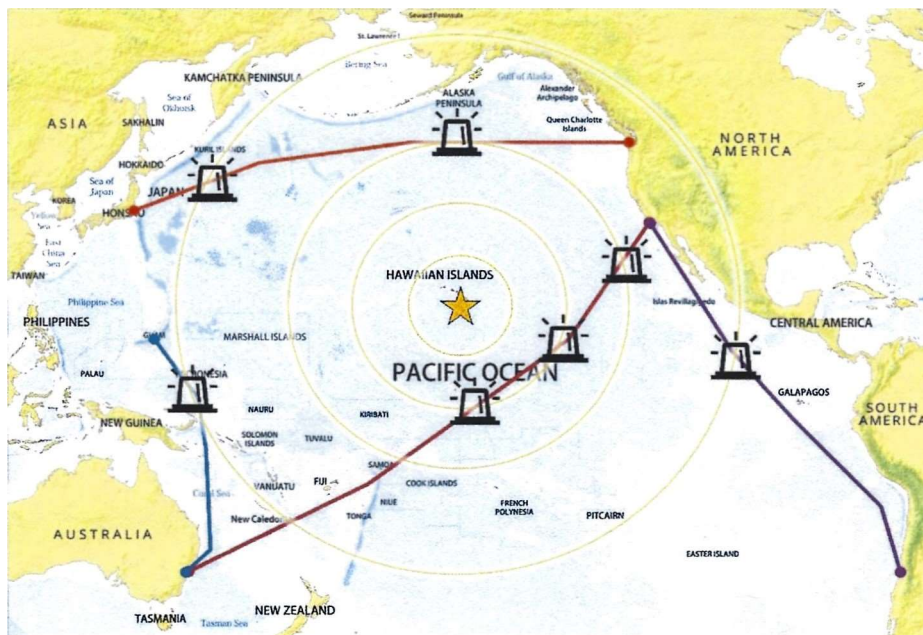


Figure 5: Combining the detection data over multiple cables

Figura 4

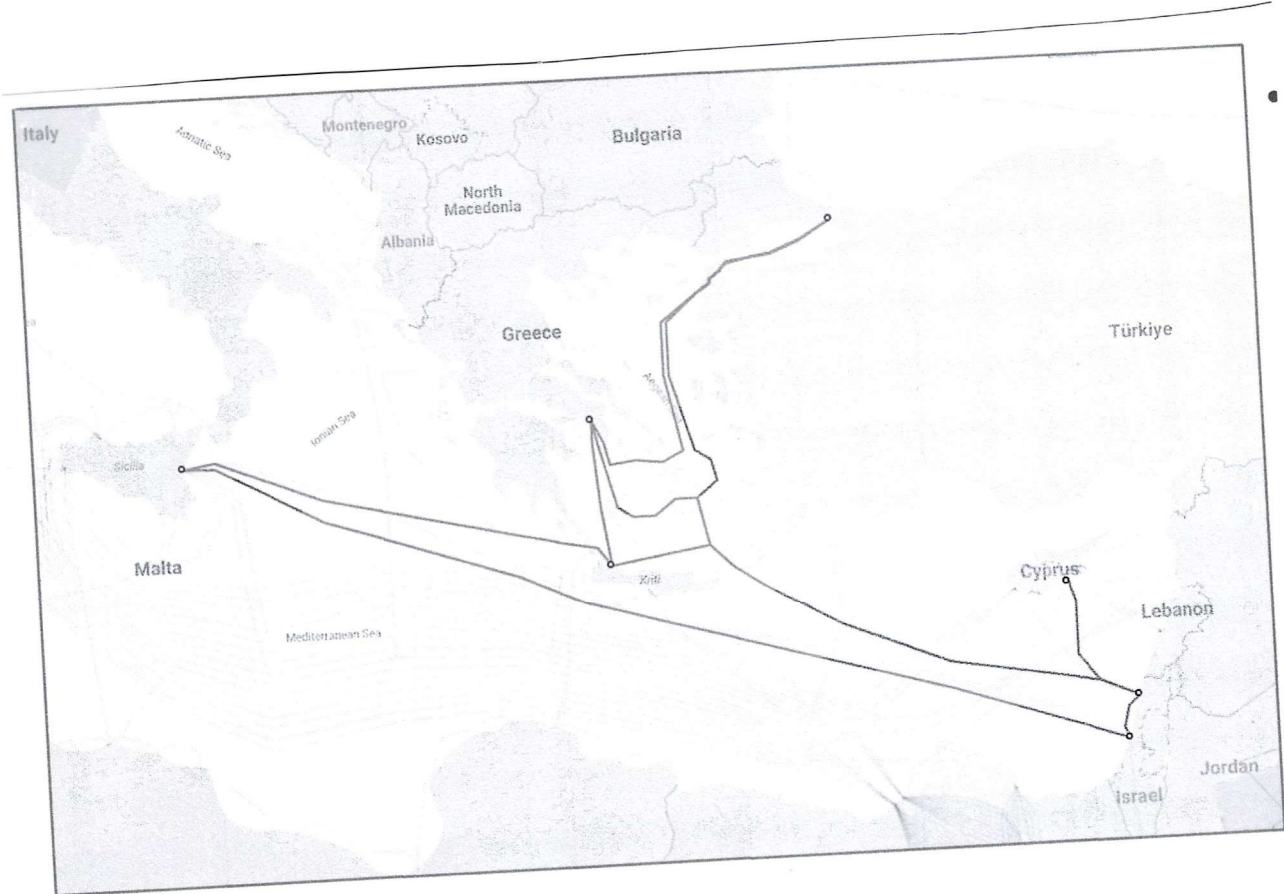


Figura 5