

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA ELETTRONICA

**SENSORI DISTRIBUITI DI TEMPERATURE IN FIBRA OTTICA
E LORO APPLICAZIONI**

LAUREANDO

Michele Giacomazzi

RELATORE

Prof. Andrea Galtarossa

ANNO ACCADEMICO 2023 – 2024

Alla mia famiglia

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Cenni Storici	2
2	Fibre ottiche	5
2.1	Struttura della fibra ottica	5
2.2	Ottica geometrica e funzionamento della fibra	6
2.3	Teoria d'onda	8
2.4	Attenuazioni e dispersione.....	10
3	Scattering	13
3.1	Scattering elastico	13
3.2	Scattering anelastico	13
3.3	Scattering di Raman nella fibra ottica	15
3.4	Scattering di Brillouin nella fibra ottica	17
3.4.1	Scattering di Brillouin spontaneo	17
3.4.2	Scattering di Brillouin stimolato	18
4	Sensori distribuiti in fibra ottica	21
4.1	Riflettometria ottica nel dominio del tempo (OTDR)	21
4.2	Sistemi Raman OTDR.....	22
4.2.1	Principali tipologie di sistemi Raman OTDR	24
4.2.2	Prestazioni e limiti dei sistemi Raman OTDR	25
4.3	Sistemi Raman OFDR	26
4.4	Sistemi BOTDR.....	27
4.4.1	Prestazioni e limiti dei sistemi BOTDR.....	29
4.5	Sistemi BOTDA	29
4.5.1	Prestazioni e limiti dei sistemi BOTDA.....	30
4.6	Confronto prestazioni tra sensori Raman e Brillouin	31
5	Applicazioni	33
5.1	Structural health monitoring (SHM)	33
5.2	Fire detection	36
5.3	Energy cable: valutazione dinamica della portata	37
5.4	Leak detection.....	39
5.5	Monitoraggio asset industriali	40
6	Conclusioni	43
	Bibliografia	45

Capitolo 1

Introduzione

Nella gestione di opere strutturali e più in generale di infrastrutture risulta di grande rilevanza il poter disporre di un sistema di monitoraggio al fine di garantire l'integrità degli asset. Un affidabile apparato di rilevamento e controllo permette infatti al gestore di individuare anticipatamente eventuali problemi o segnali di degrado delle performance, consentendo di attuare tempestivamente le necessarie azioni correttive. Un tale sistema, unito all'individuazione di indicatori significativi, quali possono essere le deformazioni o le variazioni di temperatura, rende inoltre possibile l'attuazione di politiche di manutenzione predittiva. Queste, consentono di garantire maggiore disponibilità di servizio ed efficienza rispetto a provvedimenti di riparazione dei guasti dopo che si sono verificati o agli interventi periodici preventivi. Tuttavia, quando tali asset si caratterizzano per ampie estensioni, la realizzazione di una struttura di monitoraggio può risultare alquanto complessa e costosa. Nelle infrastrutture per i trasporti quali ponti o ferrovie, in quelle di tipo energetico come gli elettrodotti o di tipo impiantistico come le *pipeline* per il trasporto di fluidi, anche criogenici, un parametro fondamentale da monitorare per garantire le corrette condizioni operative è la temperatura. I sensori termometrici quali termocoppie o termoresistenze sono dispositivi comuni, facili da reperire e a basso costo, ma rilevano la temperatura solo puntualmente. In ambito industriale sono stati sviluppati vari metodi per l'acquisizione remota delle misure, come sistemi per la rigenerazione di segnale o l'utilizzo di *multiplexer* per ridurre i cavi di collegamento. Il rilevamento di grandezze con trasduttori elettrici e la conseguente trasmissione su cavi di rame risulta particolarmente soggetta a disturbi ambientali di tipo elettromagnetico, richiedendo l'adozione di tecniche di filtraggio o di più sofisticati protocolli di comunicazione. All'aumentare delle distanze in gioco, i dispositivi che attuano questi accorgimenti aumentano di complessità fino a portare il loro sviluppo ad un livello di non convenienza economica. La possibilità di poter disporre di sensori che effettuano una misura continua e su lunghe distanze delle grandezze da monitorare è stata colta da subito con grande interesse in vari ambiti, spingendo la ricerca su questo settore. In particolare, molti studi hanno riguardato la possibilità di impiegare le fibre ottiche, non solo come mezzo sostitutivo di comunicazione, ma proprio come sensore in grado di rilevare variazioni di temperatura e deformazione. La ricerca si è focalizzata quindi nell'analisi dei fenomeni ottici connessi alla trasmissione della luce nella

fibra e su come questi vengano influenzati dai parametri fisici ambientali, individuando le tecniche più idonee per dedurre la loro misurazione. I sensori distribuiti in fibra ottica, indicati abitualmente come sistemi DOFS, si sono rivelati fin da subito particolarmente vantaggiosi per il rilevamento di grandezze spazialmente distribuite, perché coniugano le caratteristiche di risoluzione con quelle di immunità ai disturbi elettromagnetici e di robustezza. La loro realizzazione, normalmente in vetro, consente il loro impiego anche in ambienti particolarmente ostili, vista la loro resistenza ad agenti corrosivi e alla loro possibilità di impiego su un ampio campo di temperature. Non va sottovalutato, inoltre, che la loro natura dielettrica e l'impiego di soli segnali ottici non genera disturbi elettromagnetici per l'ambiente circostante e risultano idonei per l'utilizzo in prossimità di impianti elettrici o in zone con rischio di esplosione. Infine, la loro ridotta dimensione e leggerezza costituiscono una scelta progettuale obbligata in tutte quelle applicazioni che richiedono che i dispositivi di misura non siano invasivi.

Per tutti questi motivi ci si attende che il settore di mercato dei DOFS sarà caratterizzato da un grande fattore di sviluppo e crescita nei prossimi anni.

1.1 Cenni storici

Nel 1841 Jean Daniel Colladon, facendo un foro ad un contenitore d'acqua, riuscì a confinare la luce all'interno del getto d'acqua. Questo esperimento dimostrò come fosse possibile guidare la luce lungo percorsi curvi, grazie a una successione di riflessioni totali interne alla guida. Con lo svilupparsi dei processi industriali si riuscì a realizzare delle guide d'onda flessibili, trasparenti e cilindriche, in vetro o plastica, note con il nome di fibre ottiche. Nel 1966 Charles Kao dimostrò che l'attenuazione delle fibre ottiche era dovuta alle impurità del mezzo materiale piuttosto che agli effetti fisici come lo *scattering*.

Negli anni '70, si raggiunse un risultato significativo riuscendo a diminuire le perdite fino a 20 dB/km , rendendole così confrontabili con i sistemi basati su cavi coassiali. Attualmente, l'affinarsi delle tecniche di produzione consente di raggiungere elevati livelli di purezza e pertanto le attenuazioni introdotte dalle fibre ottiche moderne raggiungono valori inferiori a 0.17 dB/km , consentendo comunicazioni su lunghissime distanze.

Lo sviluppo delle fibre ottiche è stato trainato inizialmente dall'utilizzo nei sistemi di comunicazione, allo scopo di consentire la trasmissione di segnali a banda larga; non sono però da trascurare le possibilità del loro utilizzo nel campo della sensoristica.

La nascita nel 1976-77 della riflettometria ottica nel dominio del tempo (OTDR), che ha permesso di misurare le proprietà ottiche delle fibre in modo non invasivo, ha costituito il punto di partenza per il successivo sviluppo della tecnologia dei DOFS.

Un primo esempio di sensore distribuito, in grado di restituire una risposta specifica a un misurando, in questo caso la temperatura, è stato dimostrato nel 1982. Questo sensore utilizzava una fibra con un nucleo liquido [1] interrogata utilizzando la tecnica OTDR. Poiché l'intensità dello *scattering* è sensibile alla temperatura, il dispositivo permetteva di rilevarne le variazioni locali. Ovviamente, una fibra a nucleo liquido non risulta facilmente impiegabile nella pratica, a causa delle grandi difficoltà di dispiegamento. Anche l'intervallo di temperatura, entro il quale tali fibre possono operare, risulta alquanto limitato.

Nel 1985 fu proposta e dimostrata la possibilità di utilizzo degli *scattering* di Raman, anche se molto deboli, per lo sviluppo nella termometria con fibre ottiche e quindi come misura distribuita. Successivamente, nel 1989, venne pubblicato un articolo che descriveva l'uso dello *scattering* Brillouin stimolato per misurare il profilo di attenuazione di una fibra monomodale. Nel 1993, invece, fu dimostrato che fosse possibile utilizzare lo *scattering* spontaneo di Brillouin con la tecnica OTDR.

Negli ultimi anni si nota una importante crescita per i sensori DOFS in molti ambiti, con applicazioni che spaziano dal monitoraggio strutturale di infrastrutture civili (edifici, ponti e ferrovie), ai sistemi aereospaziali, agli impianti di estrazione e trasporto (*pipeline*) *oil and gas* e all'ambito medicale.

Capitolo 2

Fibre ottiche

Le fibre ottiche sono costituite da sottili fili di vetro o materiale plastico attraverso i quali viene trasmesso un segnale ottico. Le fibre ottiche offrono numerosi vantaggi rispetto ad altri mezzi di trasmissione, come l'immunità ai disturbi elettromagnetici, la resistenza ad agenti corrosivi e la caratteristica di essere un dispositivo a sicurezza intrinseca, in quanto costituito solo da materiale non conduttore.

2.1 Struttura della fibra ottica

La fibra ottica è composta da più strati cilindrici. Il cilindro più interno viene chiamato nucleo o “*core*” ed è circondato da uno strato più esterno, detto mantello o “*cladding*”; questi due cilindri concentrici realizzano la propagazione guidata del segnale ottico. Nelle fibre ottiche il *core* ha un indice di rifrazione n_f maggiore dell'indice di rifrazione n_c del *cladding*. Più esternamente si trovano altri strati il cui scopo è quello di proteggere e rafforzare il *core* e il *cladding* da urti e deformazioni. Possono essere composti da materiali di vario tipo, a seconda dell'utilizzo della fibra ottica. Un primo grado di protezione è previsto da un rivestimento acrilico che porta il diametro esterno della fibra a $250\ \mu\text{m}$; soprattutto per i cavi di tipo *indoor* viene anche applicato un rivestimento in plastica rigida (*jacket*) con un diametro esterno di $0.9\ \text{mm}$ (misura standardizzata). Tra *jacket* e *cladding* può essere inserito un filato aramidico, solitamente kevlar, per rendere il cavo maggiormente resistente alla trazione (*strain*) e facilitare così le operazioni di installazione nei cavidotti. I cavi da posa necessitano di strutture resistenti e prevedono molti più strati protettivi per resistere agli urti e soprattutto all'umidità. Questa provoca un sensibile aumento dell'attenuazione delle fibre ottiche, a causa di un incremento della concentrazione di OH^- . La Figura 2.1 [2] mostra due tipi di cavi per fibra ottica, con diversi livelli di protezione.

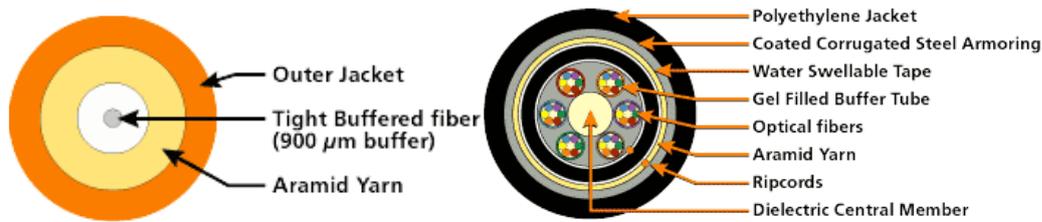


Figura 2.1: Struttura di un cavo monofibra per interni (a sinistra) e un cavo per esterni a grande capacità (a destra).

2.2 Ottica geometrica e funzionamento della fibra

Quando un raggio incide, con un angolo ϑ_1 , su un'interfaccia tra due mezzi aventi indice di rifrazione diversi, parte della luce viene trasmessa, con un angolo ϑ_2 , e parte viene riflessa con angolo $\vartheta_3 = \vartheta_1$. Gli angoli di incidenza e di rifrazione sono legati agli indici di rifrazione n_1 e n_2 dei due mezzi tramite la legge di rifrazione di Snell:

$$n_2 \cdot \sin(\vartheta_2) = n_1 \cdot \sin(\vartheta_1).$$

Da questa relazione si può notare che all'aumentare dell'angolo di incidenza, aumenta anche l'angolo di rifrazione. Quando l'angolo di rifrazione raggiunge il valore di $\frac{\pi}{2}$, tutta la luce viene riflessa e l'angolo di incidenza viene chiamato angolo critico, come illustrato in Figura 2.2 [2]. La riflessione totale può esistere solo se l'onda passa da un mezzo più denso ad uno meno denso ($n_1 > n_2$).

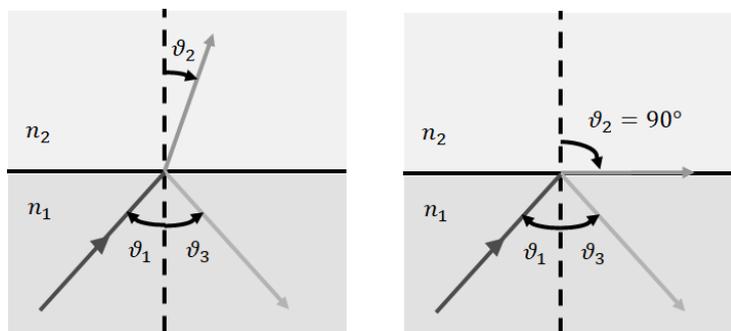


Figura 2.2: Rifrazione e angolo critico

Questa situazione si verifica anche nell'interfaccia tra *core* e *cladding* delle fibre ottiche, dove n_1 corrisponde all'indice di rifrazione del *core* e n_2 all'indice di rifrazione del *cladding*.

Per soddisfare la condizione di riflessione totale interna (TIR), e quindi permettere la propagazione della luce attraverso la fibra ottica, l'angolo ϑ_3 deve essere maggiore dell'angolo critico ϑ_c , che vale:

$$\vartheta_c = \arcsin\left(\frac{n_c}{n_f}\right)$$

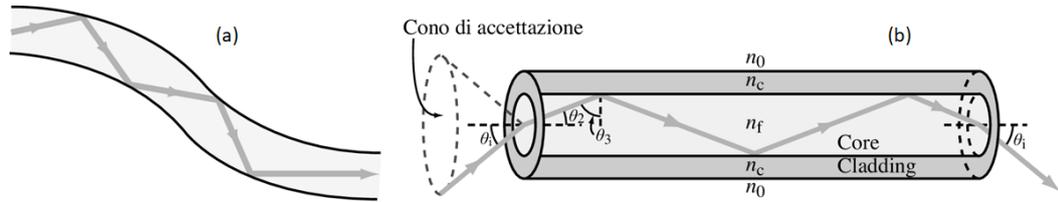


Figura 2.3: (a) Fibra ottica, (b) Riflessioni interne successive

Dalla Figura 2.3 (b) [3] si può osservare che applicando la legge di Snell all'interfaccia d'ingresso, e considerando che ϑ_2 è il complementare di ϑ_3 , si ricavano le seguenti relazioni:

$$\cos(\vartheta_2) \geq \frac{n_c}{n_f}$$

$$\sin(\vartheta_2) = \frac{n_0}{n_f} \cdot \sin(\vartheta_i)$$

dove n_0 è l'indice di rifrazione del mezzo che circonda la fibra ($n_0 = 1$ per l'aria). Da queste due equazioni si ricava:

$$\sin(\vartheta_i) \leq \frac{1}{n_0} \cdot (n_f^2 - n_c^2)^{1/2}$$

L'angolo di accettazione ϑ_a è definito come il massimo valore di ϑ_i , per cui la condizione di riflessione interna totale rimane soddisfatta:

$$\sin(\vartheta_a) = \frac{1}{n_0} \cdot (n_f^2 - n_c^2)^{1/2} .$$

Nel caso il mezzo di ingresso sia l'aria, si ha che $n_0 = 1$, e quindi $\sin(\vartheta_a) = (n_f^2 - n_c^2)^{1/2}$.

Quindi, qualsiasi raggio che incida sull'interfaccia del *core* della fibra, con un angolo di incidenza compreso all'interno del cono di accettazione, può propagarsi dentro il *core*; ciò significa che possono esistere molti percorsi per i raggi di propagazione, detti modi.

In generale, per caratterizzare il cono di accettazione, si preferisce considerare il parametro denominato apertura numerica:

$$NA = \arcsin \sqrt{n_f^2 - n_c^2}$$

Si può notare che all'aumentare della differenza tra n_f e n_c aumenta anche NA , in un range da 0 a 1.

Quando la fibra è costituita da un *core* e un *cladding* con indici di rifrazione diversi tra loro, ma costanti lungo tutto il loro raggio, si parla di fibre *step-index* e le traiettorie dei raggi della luce si propagano lungo linee spezzate. Nelle fibre *graded-index*, invece, l'indice di rifrazione del *core* non è costante, ma decresce dal centro avvicinandosi al *cladding* con un andamento quasi parabolico in funzione del raggio R .

2.3 Teoria d'onda

Oltre che con lo studio approssimato mediante l'ottica geometrica sopra considerato, la propagazione della luce attraverso la fibra ottica, può essere studiata più correttamente anche mediante modelli basati sulla teoria delle onde.

La luce è un'onda elettromagnetica, per la quale valgono le equazioni di Maxwell:

$$1) \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$$

$$2) \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$3) \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$4) \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

dove \vec{E} e \vec{H} sono i campi elettrici e magnetici, \vec{D} è l'induzione elettrica, \vec{B} il campo magnetico indotto, \vec{J} è la densità di corrente e ρ la densità di cariche libere.

Se si considera un dielettrico senza perdite, ovvero $\rho = 0$ e $J = 0$, e che gli indici di rifrazione del *core* e del *cladding* siano indipendenti dalle coordinate spaziali, si può ricavare l'equazione di Helmholtz:

$$\nabla^2 \cdot U + \frac{\omega^2 n^2}{c^2} \cdot U = 0$$

dove U rappresenta l'ampiezza complessa di ciascuna delle componenti cartesiane dei campi elettrici e magnetici o le componenti E_z e H_z in coordinate cilindriche, ω è la frequenza, n è l'indice di rifrazione del mezzo, e c è la velocità della luce nel vuoto [4].

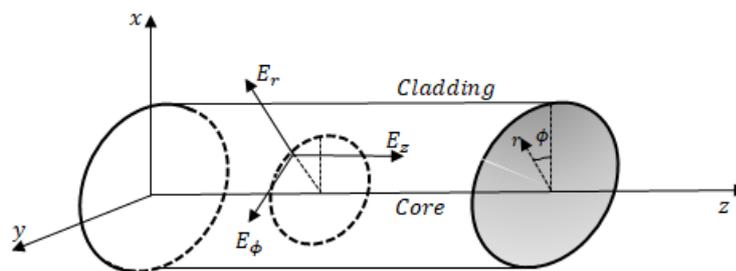


Figura 2.4: Campo elettromagnetico in un sistema a coordinate cilindriche

Le soluzioni che rappresentano forme di onde che si propagano nella direzione z , con costante di propagazione β sono del tipo:

$$U(r, \phi, z) = u(r)e^{-jl\phi}e^{-j\beta z}, \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

dove $e^{-jl\phi}$ tiene conto della periodicità (in 2π) in ϕ .

Usando le equazioni di Maxwell si possono trovare le soluzioni per i campi elettrici e magnetici E_ϕ, H_ϕ, E_r, H_r in funzione di E_z e H_z . Inoltre, la condizione di continuità all'interfaccia tra

core e cladding ($r = a$) fornisce una condizione sulla costante di propagazione β , detta equazione caratteristica. Per ogni indice azimutale l , l'equazione caratteristica ha soluzioni multiple che danno costanti di propagazione $\beta_{l,m}$ con $m = 1, 2, \dots$ ed ognuna delle soluzioni rappresenta un modo. L'indice l fornisce la distribuzione azimutale e m la distribuzione radiale dei modi.

La maggior parte delle fibre guidano debolmente la luce il che vuol dire che i raggi guidati sono pressoché paralleli all'asse della fibra. Le onde guidate possono essere considerate approssimativamente onde elettromagnetiche trasverse, le cui componenti longitudinali dei campi magnetici ed elettrici sono molto minori di quelle trasverse; la polarizzazione lineare in x e y forma un set di stati di polarizzazione ortogonali. Le due polarizzazioni viaggiano in ogni modo con la stessa costante di propagazione e presentano la stessa distribuzione spaziale. È sufficiente considerare l'analisi di una sola componente e la soluzione ottenuta per il modo polarizzato linearmente (l, m) viene indicata con $LP_{l,m}$ (*Linearly Polarized*).



Figura 2.5: Componente del campo E_x delle modalità LP in una fibra ottica monomodale

Le distribuzioni illustrate in Figura 2.5 [5], permettono di comprendere la classificazione delle fibre in monomodali e multimodali. Si può notare che la componente del campo E_x è concentrata nel nucleo solo per la modalità $LP_{0,1}$ e per tanto solo questa modalità fondamentale viene trasmessa attraverso una fibra monomodale.

Sempre nelle ipotesi sopra considerate di guida debole, cioè con un basso contrasto tra l'indice di rifrazione n_f e n_c , come per le fibre standard, può essere definito il parametro della fibra V che governa il numero dei modi e le loro costanti di propagazione. Tale parametro stabilisce quindi la condizione per propagare diversi modi luminosi all'interno della fibra, secondo la seguente equazione:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot (n_f^2 - n_c^2)^{1/2}$$

dove a è il raggio del core della fibra ottica.

In una fibra monomodale di tipo *step-index* $V \leq 2.403$.

2.4 Attenuazioni e dispersione

Le fibre ottiche presentano basse perdite di potenza nella trasmissione dei segnali; tuttavia, queste non possono essere trascurate, in quanto il loro utilizzo nei vari campi applicativi è caratterizzato da lunghe distanze. Le perdite sono dovute a molteplici fattori, il più importante dei quali è l'assorbimento che provoca la conversione della luce in calore assorbito dalle molecole del vetro. L'assorbimento è principalmente dovuto alla presenza di ioni OH^- nelle fibre che può aumentare a causa dell'umidità. Questo fenomeno viene osservato in particolare ad una lunghezza d'onda attorno ad $1.4 \mu m$, come illustrato nella Figura 2.6 [5]. L'assorbimento viene influenzato anche da altre impurità presenti nella fibra ottica, come gli elementi introdotti dalle operazioni di drogaggio utilizzate per aumentare l'indice di rifrazione del *core*.

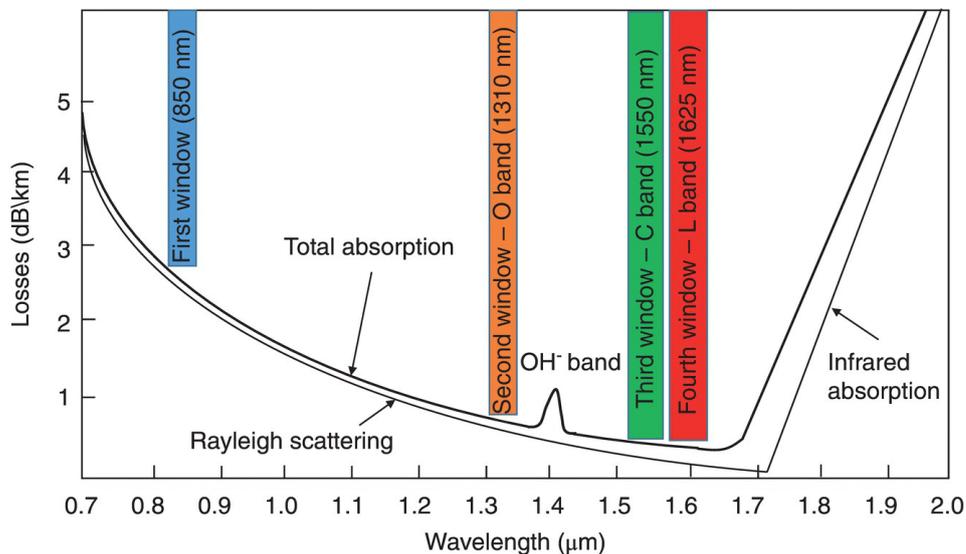


Figura 2.6: Perdite nella fibra e principali bande utilizzate per la comunicazione

La Figura 2.6 mostra la presenza di quattro finestre utilizzabili per le varie applicazioni, nelle quali l'effetto delle perdite è ridotto.

Altri fattori che provocano attenuazioni di potenza nel segnale trasmesso sono legati allo *scattering* di Rayleigh e alla presenza di macro o micro curvature delle fibre ottiche.

Lo *scattering* di Rayleigh, il cui effetto è maggiormente presente alle lunghezze d'onda corte in quanto proporzionale a $(1/\lambda)^4$, sarà analizzato nei paragrafi successivi, in quanto la sua presenza risulta molto importante nelle applicazioni dei sensori distribuiti in fibra ottica.

Anche le perdite dovute alle curvature influenzano sensibilmente l'attenuazione globale e non possono essere ignorate.

Per micro-curvature si intendono delle piccole deformazioni sulla struttura della fibra come variazione del diametro del *core* dovuto ad errori di fabbricazione o deformazioni successive. Le macro-curvature, invece, sono visibili a occhio nudo e sono frequentemente originate dalla manipolazione dei cavi nella fase di posa. La presenza delle micro e macro curvature provoca una variazione dell'angolo di incidenza nell'interfaccia *core-cladding* e possono portare al superamento dell'angolo critico da parte di alcuni raggi, impedendone la trasmissione.

Capitolo 3

Scattering

Il fenomeno dello *scattering* si origina quando un fascio di luce che attraversa un mezzo materiale viene diffuso in varie direzioni, diverse da quella del raggio incidente. Lo *scattering* nelle fibre ottiche è provocato dall'interazione tra un'onda elettromagnetica e le molecole del mezzo di trasmissione.

In questo capitolo vengono analizzati i principi fisici alla base dello *scattering* ottico elastico e anelastico sviluppando in particolare, nel secondo caso, gli effetti di Raman e Brillouin.

3.1 Scattering elastico

Lo *scattering* elastico è un processo di collisione lineare in cui non avvengono variazioni di energia per i fotoni diffusi e pertanto, la frequenza della radiazione diffusa è uguale a quella della radiazione incidente. Questa situazione riguarda la maggior parte dei fotoni dell'onda incidente che subiscono quindi solo un cambiamento di direzione.

Lo *scattering* di Rayleigh è di tipo elastico e la sua intensità dipende fortemente dalla lunghezza d'onda con una relazione proporzionale a λ^{-4} . Di conseguenza, lo *scattering* della luce a bassa lunghezza d'onda è di molto superiore rispetto a quello della luce con lunghezze d'onda maggiori. Inoltre, si può osservare che al variare dell'angolo di osservazione muta anche il grado di polarizzazione della luce diffusa. In particolare, questa risulta polarizzata linearmente quando la direzione di osservazione è perpendicolare al raggio di luce incidente.

Lo *scattering* di Rayleigh si verifica in quasi tutti i mezzi materiali, incluse le fibre, a causa dell'agitazione termica delle molecole.

3.2 Scattering anelastico

A differenza di quello elastico sopra descritto, lo *scattering* anelastico è un processo non lineare che presenta una variazione di energia dei fotoni coinvolti. I fenomeni principali osservabili sono gli *scattering* di Raman e di Brillouin.

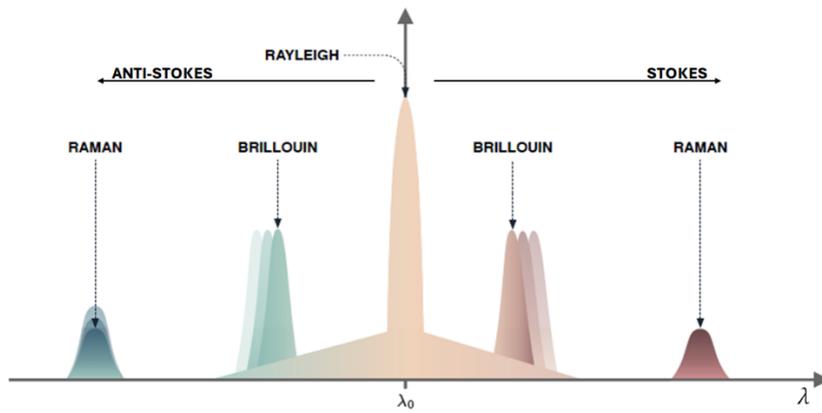


Figura 3.1: Righe spettrali di scattering non lineari

La Figura 3.1 [6] mostra gli andamenti spettrali dovuti allo *scattering* anelastico, dove si possono notare gli spostamenti di lunghezza d'onda dovuti agli *scattering* di Brillouin e di Raman. La banda chiamata Raman/Stokes corrisponde a uno spostamento della radiazione diffusa verso l'alto, mentre la banda Raman/anti-Stokes riguarda uno spostamento dello spettro verso il basso. Lo spostamento di frequenza dello *scattering* di Raman è dell'ordine dei *THz*, mentre quello dello *scattering* di Brillouin è di circa *10 GHz* [7].

Gli spostamenti dello spettro possono essere spiegati analizzando gli stati energetici degli elettroni. Quelli che interagiscono con i fotoni della radiazione incidente, si trovano negli orbitali più esterni delle molecole del mezzo di trasmissione. La Figura 3.2 [7] mostra 3 diverse situazioni che dipendono dai livelli energetici elettronici.

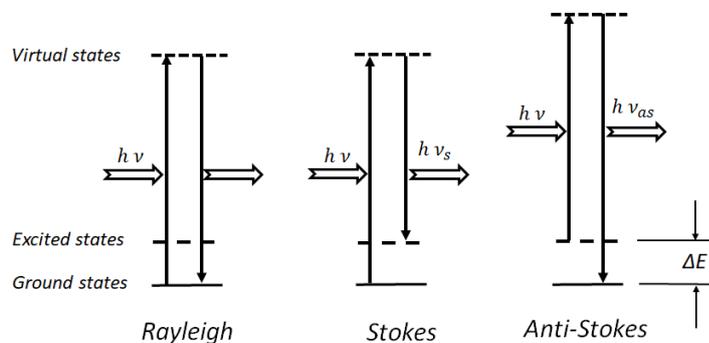


Figura 3.2: Diagramma dei livelli energetici degli scattering Stokes e anti-Stokes

Gli *scattering* di Raman e di Brillouin vengono attribuiti ai movimenti vibrazionali delle molecole. Quindi, le loro caratteristiche dipendono dalla composizione e dalla struttura del materiale, poiché materiali diversi presentano diversi livelli energetici degli elettroni.

La maggior parte degli elettroni si trova nello stato energetico fondamentale (*Ground state*), chiamato E_0 . Alcuni elettroni però, possiedono livelli energetici superiori che in Figura 3.2 sono indicati come stati eccitati (*Excited state*). La presenza di questi livelli a maggior energia è normalmente dovuta alla vibrazione intramolecolare o tra molecole, ovvero all'agitazione termica della materia.

Quando un elettrone interagisce con un fotone, assorbe la sua energia, pari a $h\nu$, portandosi ad un livello energetico superiore $E_v = E_0 + h\nu$, detto stato virtuale (*Virtual state*). Lo stato virtuale però è uno stato instabile che esiste per un tempo molto limitato, quindi, la transizione verso gli stati ad energia inferiore avviene rapidamente. Gli stati raggiunti, dopo questo passaggio, possono essere quello fondamentale o uno stato eccitato. Durante le transizioni vengono emessi quindi dei fotoni con energia diversa.

Nel primo caso rappresentato in Figura 3.2, il fotone emesso possiede la stessa energia di quello incidente e spiega il processo dello *scattering* di Rayleigh. Nel secondo caso, invece, gli elettroni cedono meno energia rispetto a quella prima assorbita e si verifica la situazione dello *scattering* delle bande Stokes. Un'altra situazione che si può verificare riguarda gli elettroni che, partendo da uno stato eccitato, dopo il processo di interazione con la radiazione luminosa incidente, ritornano nello stato fondamentale emettendo fotoni con energia $h\nu_{as} = h\nu + \Delta E$, che corrisponde allo *scattering* di tipo anti-Stokes.

Si può notare che le energie dei fotoni sono legate alla frequenza ν attraverso la costante di Planck h . Pertanto, quando viene emesso un fotone a minore energia la radiazione di *scattering* sarà spostata verso l'alto, viceversa se il fotone emesso è più energetico la banda spettrale corrispondente si troverà spostata verso il basso.

Anche per le vibrazioni molecolari si può osservare il dualismo onda-particella e i moti vibrazionali possono essere quantizzati come fononi.

Si possono verificare tre tipi di interazioni fotoni-fononi. La prima, e più probabile, è l'interazione elastica, come precedentemente visto per lo *scattering* di Rayleigh. La seconda genera un fonone provocando contemporaneamente una perdita di energia al fotone (Stokes). La terza invece, porta all'annichilazione del fonone e a un aumento dell'energia del fotone (anti-Stokes).

Lo *scattering* di Raman coinvolge i fononi ad un livello energetico più alto, generando quindi uno spostamento in frequenza elevato. Lo *scattering* di Brillouin invece, è legato all'interazione con i fononi meno energetici, che produce pertanto uno spostamento in frequenza minore.

Per quanto sopra detto si comprende che i vari tipi di *scattering* risultano particolarmente dipendenti dallo stato in cui si trova il materiale, specialmente dalla temperatura e dalla tensione. Questi effetti costituiscono quindi le basi per lo sviluppo dei sensori distribuiti in fibra ottica.

3.3 Scattering di Raman nella fibra ottica

Nel paragrafo precedente è stato illustrato il fenomeno fisico dello *scattering*, dovuto all'interazione tra materia e onde elettromagnetiche, osservando come questo sia legato ai vari

livelli energetici occupati dagli elettroni. Ora, invece, si analizzerà in particolare lo *scattering* di Raman nelle fibre ottiche.

Come illustrato nella Figura 3.1, lo *scattering* di Raman determina nello spettro la presenza di due bande relativamente ampie (6 – 9 THz), piuttosto che delle linee ben definite. La motivazione di questo va ricercata nella struttura di tipo microcristallino dei vetri che rende diverse le caratteristiche di ciascun legame molecolare. Questo porta ad un leggero cambiamento nei modi vibrazionali che prendono parte allo *scattering*.

Gli *scattering* di Stokes e anti-Stokes avvengono simultaneamente, ma con diversa intensità. Il principale fattore di questa differenza è dovuto al maggior numero di elettroni che si trovano nello stato fondamentale rispetto a quelli degli stati eccitati. La popolazione degli elettroni nei vari livelli energetici è descritta dalla legge di distribuzione statistica di Boltzmann.

Per una singola riga, l'intensità degli *scattering* anti-Stokes e Stokes è funzione della temperatura secondo una relazione che dipende dal termine $e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}}$.

Si può osservare come l'intensità anti-Stokes sia maggiormente dipendente dalla temperatura rispetto a quella Stokes. Nei sistemi che si basano sullo *scattering* di Raman è comune utilizzare il rapporto tra le due intensità $R(T)$ [8, 9].

Il rapporto tra anti-Stokes e Stokes mantiene una dipendenza della temperatura, restando indipendente però dagli effetti dovuti alle perdite delle fibre, permettendo quindi di sviluppare dei sensori distribuiti per la misurazione della temperatura.

Le sensibilità relative delle intensità e del rapporto $R(T)$:

$$\varepsilon_{as} = \frac{1}{I_{as}(T)} \frac{dI_{as}(T)}{dT}, \quad \varepsilon_s = \frac{1}{I_s(T)} \frac{dI_s(T)}{dT} \quad \text{e} \quad \varepsilon_R = \frac{1}{R(T)} \frac{dR(T)}{dT}$$

mostrano un andamento in funzione della temperatura riportato nella Figura 3.3 [1].

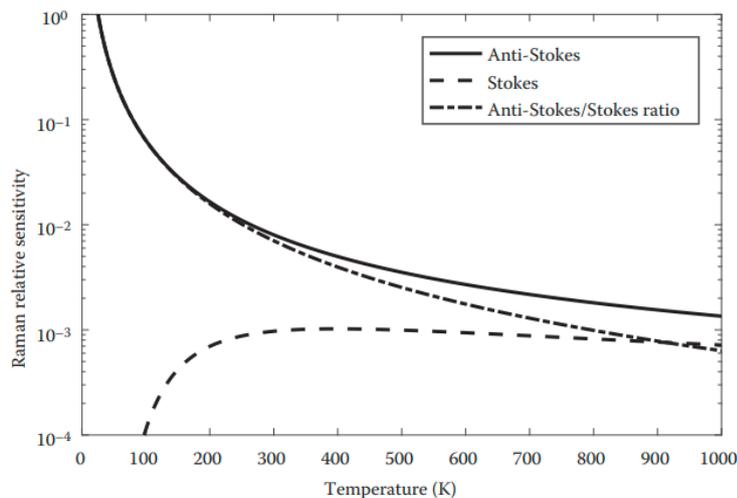


Figura 3.3: Sensibilità relativa alla temperatura delle intensità Stokes e anti-Stokes e del loro rapporto in una tipica fibra ottica multimodale

Si può vedere che la sensibilità del rapporto $R(T)$ diminuisce alle alte temperature in quanto i segnali anti-Stokes e Stokes, a temperature molto elevate, convergono allo stesso valore. Nelle applicazioni si può superare il limite di temperatura legato al rapporto $R(T)$ utilizzando solo il segnale anti-Stokes e trovando un diverso metodo per correggere i vari fattori di attenuazione.

3.4 Scattering di Brillouin nella fibra ottica

Come già detto, lo *scattering* di Brillouin deriva dall'interazione tra un'onda elettromagnetica e le vibrazioni reticolari, che provocano uno spostamento di frequenza della luce diffusa molto più piccolo rispetto allo *scattering* di Raman. In presenza invece di un'interazione tra un'onda acustica e due onde ottiche, quella incidente e quella retrodiffusa, si origina lo *scattering* di Brillouin stimolato.

Per lo sviluppo dei sistemi di rilevamento distribuito vengono utilizzati sia lo *scattering* di Brillouin spontaneo che quello stimolato. Di seguito verrà illustrato come, nel vetro, i due fenomeni siano sensibili alla temperatura e alla deformazione (*strain*).

3.4.1 Scattering di Brillouin spontaneo

A differenza dello *scattering* di Raman, nello *scattering* di Brillouin lo spostamento della frequenza è molto più piccolo e la larghezza di linea molto più stretta (circa 30 MHz). Lo *scattering* di Brillouin è un processo anelastico risultante dall'interazione tra un'onda incidente e fluttuazioni di densità del materiale, causate dall'agitazione termica, dove vengono creati e riassorbiti fononi acustici.

Nelle fibre ottiche di vetro, lo *scattering* di Brillouin si genera sia con onde acustiche longitudinali (LA, onde di pressione), sia con onde acustiche trasversali (TA, onde di taglio). Nel *sensing* distribuito vengono utilizzate principalmente le onde LA perché la retrodiffusione dei fononi TA è più debole.

La frequenza delle linee LA di Brillouin è legata dalla condizione di corrispondenza dei fronti d'onda acustici e ottici, ovvero [1]:

$$\nu_B = 2n_1\nu_0 \frac{V_A}{c} \sin\left(\frac{1}{2}\theta\right)$$

dove ν_0 è la frequenza ottica incidente, V_A è la velocità acustica, θ è l'angolo tra la luce incidente e quella diffusa, c è la velocità della luce nel vuoto. Nel caso della retrodiffusione, ovvero quando $\theta \simeq \pi$, la lunghezza d'onda acustica deve corrispondere alla lunghezza d'onda ottica affinché avvenga il processo di diffusione e ricattura.

Un'onda acustica che si propaga all'interno di un mezzo viene assorbita e la sua intensità diminuisce con un andamento esponenziale. Di conseguenza, lo spettro dello *scattering* non

risulta una linea monocromatica, ma presenterà un andamento di tipo Lorentziano con massimo in ν_B . In una fibra ottica anche le variazioni nella composizione del vetro portano ad un ampliamento dello spettro di Brillouin.

I coefficienti di spostamento di frequenza e di intensità, dovuti a cambiamenti di deformazione ($\Delta\varepsilon$) e di temperatura (ΔT), possono essere determinati sperimentalmente, per un dato tipo di fibra e di lunghezza d'onda. Un cambiamento nella frequenza e nell'intensità, quindi, può essere descritto come [1]:

$$\begin{bmatrix} \Delta\nu_B \\ \Delta I_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\nu_B\varepsilon} & C_{\nu_B T} \\ C_{I_B\varepsilon} & C_{I_B T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix}$$

dove I_B e ν_B indicano intensità e frequenza, mentre T e ε indicano temperatura e deformazione. Per una fibra *step-index* monomodale, i valori tipici dei coefficienti di sensibilità sono [1]:

$$C_{\nu_B\varepsilon} = 0.046 \text{ MHz}/\mu\varepsilon, C_{\nu_B T} = 1.07 \text{ MHz}/K, C_{I_B\varepsilon} = -8 \cdot 10^{-4} \%/\mu\varepsilon, C_{I_B T} = 0.36 \% / K$$

La sensibilità dell'intensità alla temperatura è considerevolmente più debole rispetto al caso della diffusione Raman (circa $0,36 \%K^{-1}$ contro $0,8 \%K^{-1}$ per la linea anti-Stokes a temperatura ambiente), e questo rappresenta una sfida per le misurazioni di precisione.

3.4.2 Scattering di Brillouin stimolato

Il processo di dispersione può diventare stimolato se le fluttuazioni nel mezzo di trasmissione vengono amplificate dalla presenza di un'altra onda elettromagnetica, che rafforza lo *scattering* spontaneo. Questo si può verificare quando l'intensità della luce incidente, indicata normalmente come onda di pompa (*pump*), diventa abbastanza elevata.

Durante il processo dello *scattering* di Brillouin stimolato (SBS), l'onda luminosa incidente interagisce con l'onda ottica contropropagante, stimolando un'onda acustica attraverso l'elettrostrizione. Questo fenomeno, che si verifica nei materiali dielettrici, fa sì che la densità dei mezzi di trasmissione possa cambiare quando sono sottoposti a un campo elettrico [7].

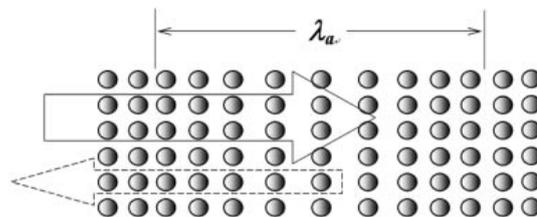


Figura 3.4: Reticolo dinamico indotto da fotoni

A basse potenze ottiche la deformazione del reticolo, creata attraverso l'elettrostrizione, è debole e il suo effetto può essere trascurato. All'aumentare della potenza incidente, si raggiunge un punto in cui l'onda acustica stimolata produce una modulazione dell'indice di rifrazione, che rende possibile un trasferimento della potenza dall'onda incidente all'onda di Stokes per

diffrazione. Pertanto, superato il valore di soglia, questi processi iniziano a rinforzarsi l'un l'altro, in misura sufficiente ad aumentare l'intensità della luce diffusa in modo non lineare, rispetto alla intensità della luce incidente [10].

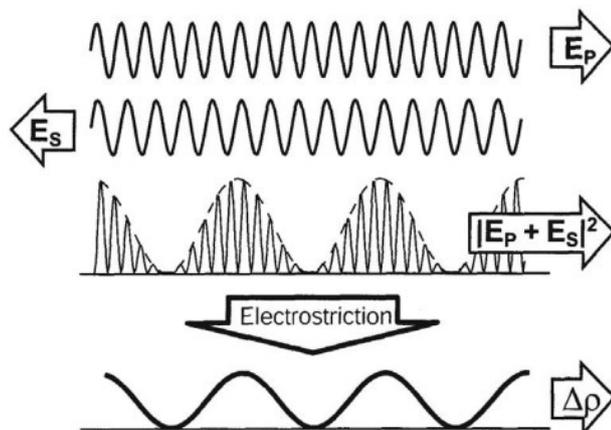


Figura 3.5: generazione dell'onda acustica attraverso il fenomeno di elettrostrizione

Capitolo 4

Sensori distribuiti in fibra ottica

I DFOS sono molto interessanti in quanto utilizzano per il rilevamento la fibra ottica standard, tipicamente identica a quella impiegata per le comunicazioni. Trasformano, cioè, la fibra in un trasduttore spazialmente continuo che fornisce un profilo della distribuzione del misurando, solitamente temperatura o deformazione, lungo la sua lunghezza. La risoluzione spaziale di questa misurazione è tale da rendere disponibili migliaia di punti di misurazione simultanei lungo la fibra. Pertanto, queste fibre di rilevamento possono essere fissate o installate in una struttura, con una disposizione densa, in modo da ottenere una quantificazione molto precisa della sua salute strutturale.

4.1 Riflettometria ottica nel dominio del tempo (OTDR)

La riflettometria ottica nel dominio del tempo è stata utilizzata e sviluppata allo scopo di controllare la qualità delle fibre e determinare eventuali difetti verificando il profilo di attenuazione di un segnale di test. Gli OTDR forniscono informazioni non solo sulla continuità di una fibra, ma anche sulla presenza di regioni dove la perdita, seppure distribuita, è superiore al normale. Il concetto di OTDR si trova anche alla base di tutte le soluzioni proposte per la realizzazione dei sensori distribuiti in fibra ottica, per questo motivo le tecnologie sviluppate per migliorare le prestazioni sono comuni ai due sistemi.

L'implementazione più semplice dell'OTDR è la misurazione a terminazione singola, che prevede di inviare un breve impulso nella fibra ottica sotto test. L'impulso, percorrendo la fibra, perde parte della sua potenza a causa dei vari meccanismi di attenuazione, tra i quali la diffusione della luce in tutte le direzioni. In particolare, una piccola frazione di luce diffusa può ripercorrere la fibra nella direzione opposta e raggiungere l'estremità di ingresso; la luce retrodiffusa viene diretta ad un ricevitore il cui segnale sarà amplificato ed elaborato. Il sistema ricevitore, amplificatore e filtro deve garantire elevate prestazioni perché anche il segnale retrodiffuso perde potenza lungo il passaggio di ritorno. Inoltre, i giunti possono provocare delle attenuazioni e riflessioni che vanno ad indebolire ulteriormente il segnale.

Per analizzare la relazione tra l'energia dell'impulso di test (*probe*) e la potenza retrodiffusa si può assumere che il primo sia una funzione di Dirac di energia $E_p(0)$ e di larghezza

estremamente ridotta. L'attenuazione subita dall'impulso di *probe* e dalla luce retrodiffusa ha un andamento esponenziale in funzione della distanza z . Quindi la potenza ricevuta all'estremità di ingresso della fibra al tempo $dt = 2 dz/v_g$ (v_g è la velocità di gruppo dell'impulso) dipende dalla potenza inviata, dal coefficiente di perdita per lo *scattering* di Rayleigh e da un fattore che rappresenta la frazione di luce diffusa che entra nel cono di accettabilità per il percorso di ritorno. Il rapporto tra la potenza di *backscattering* e l'energia dell'impulso è detto fattore di retrodiffusione ed è una funzione puramente esponenziale della posizione lungo la fibra; pertanto, cambiamenti locali nella perdita di diffusione o nella apertura numerica causano deviazioni dalla funzione esponenziale [1]. È utile evidenziare che la risoluzione spaziale di un OTDR è limitata dalla durata dell'impulso (τ_p): $dz = \tau_p v_g / 2$.

Una diversa implementazione dell'OTDR è quella che prevede una misurazione a doppia estremità. In questa configurazione il cavo della fibra viene doppiato su se stesso portando i due estremi nel punto in cui è posto il dispositivo di misura. Un commutatore ottico permette di collegare il dispositivo OTDR alternativamente all'una e all'altra estremità della fibra da testare. La tecnica *double-ended* permette di determinare il fattore di retrodiffusione e l'attenuazione locale indipendentemente l'uno dall'altro.

Si vedrà in seguito come le tecniche di riflettometria descritte in questo paragrafo vengono utilizzate per misurare la distribuzione spaziale della luce retrodiffusa di Raman e di Brillouin, consentendo di acquisire profili precisi e ben risolti di temperatura.

4.2 Sistemi Raman OTDR

I sistemi Raman OTDR si basano sulla riflettometria ottica nel dominio del tempo, andando quindi ad analizzare la potenza dei segnali retrodiffusi di Stokes e anti-Stokes.

Come analizzato per la tecnica OTDR anche le potenze dei segnali di *backscattering* Stokes e anti-Stokes dipendono dalla potenza dell'impulso inviato, dalla percentuale della luce inviata che viene convertita in ciascuna delle bande di Raman e retrodiffusa, e da un termine esponenziale che rappresenta l'attenuazione in funzione di z . Alcuni dei fattori che rappresentano attenuazioni per l'intensità delle bande di interesse, possono essere eliminati se si valuta il rapporto tra i due segnali $R(T)$.

I segnali di Stokes e anti-Stokes vengono attenuati in modo diverso tra loro, durante il percorso di retrodiffusione lungo la fibra, e il rapporto $R(T)$ viene influenzato da questo fattore differenziale di attenuazione, che non risulta separabile dall'effetto della temperatura. Per superare questo limite alcuni sistemi Raman OTDR presuppongono di conoscere a priori la perdita differenziale, considerandola costante e uniforme lungo tutta la fibra. In queste ipotesi,

il fattore di perdita differenziale può essere determinato con una calibrazione dello strumento, ovvero misurando una temperatura nota all'estremo lontano della fibra. Affinché questo metodo sia applicabile è necessario però che la fibra sia ragionevolmente diritta, non presenti perdite di giunzione importanti e venga utilizzata in condizioni che non causino un degrado dell'attenuazione nel tempo.

Dopo aver descritto i principi fisici che permettono di stabilire una relazione tra le intensità Stokes e anti-Stokes del *backscattering* e la temperatura lungo la fibra ottica, e i principali fattori che la possono alterare, si cercherà di illustrare, in linea di principio, come può essere progettato un sistema distribuito per la misura della temperatura. Nella Figura 4.1 [1] seguente, viene rappresentato un diagramma schematico di un sensore distribuito di temperatura con rapporto Raman.

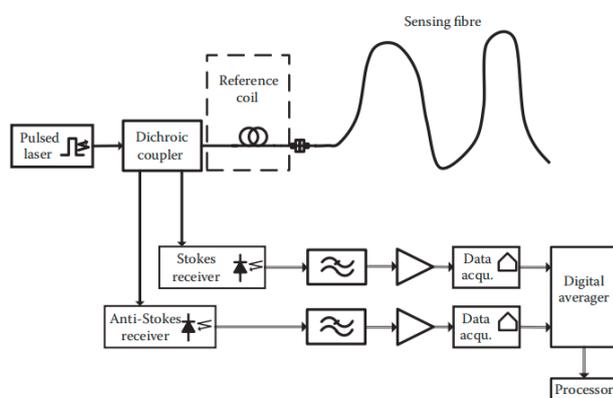


Figura 4.1: Diagramma schematico di un sensore di temperatura distribuito con rapporto Raman

In questo schema la sorgente di luce di test è costituita da un laser, che trasmette nella fibra ottica un impulso di luce ad una determinata lunghezza d'onda (λ_p). La diffusione di Raman avviene per qualsiasi lunghezza d'onda della sorgente, esistono tuttavia dei criteri nella scelta di λ_p . I vincoli di progettazione variano a seconda che la fibra di rilevamento sia di tipo monomodale o multimodale. In quest'ultime, ad esempio, la larghezza di banda della fibra di rivelamento può ampliare l'impulso multimodale di test a causa dell'effetto di dispersione del profilo, limitando così la risoluzione spaziale del sistema. Generalmente la lunghezza d'onda della sonda e il relativo segnale Raman anti-Stokes devono essere maggiori di circa 1300 nm per le fibre monomodali, che è la lunghezza d'onda operativa più corta per le fibre standard. Le fibre multimodali, invece, sono ottimizzate nella regione 850 – 1300 nm [1].

Per misurare il rapporto tra le due intensità, di solito, si utilizza un accoppiatore direzionale (dicroico) che separa la luce retrodiffusa, restituita dalla fibra di rivelamento, da quella inviata dal laser d'ingresso. L'accoppiatore dicroico presenta due uscite distinte per i segnali della banda anti-Stokes e Stokes. Questi segnali vengono inviati a un ricevitore ottico che converte la potenza ottica in corrente elettrica. Nei sistemi DTS (*Distributed Temperature Sensor*), si

usano normalmente i rivelatori a fotodiodi a valanga (APD). Essi generano correnti proporzionali al numero di fotoni che arrivano dalla fibra ottica e il loro guadagno interno è vantaggioso per le prestazioni del sistema. Il segnale elettrico viene successivamente amplificato e filtrato prima di essere digitalizzato. I segnali acquisiti nei sistemi Raman OTDR sono molto bassi ed è quindi necessario calcolare la media della retrodiffusione su molte acquisizioni successive per fornire un alto rapporto segnale-rumore (SNR).

Oltre a questa configurazione, sono stati sviluppati altri approcci che prevedono di utilizzare solo un canale per la misurazione delle due bande. Il filtro ricevitore viene commutato meccanicamente tra le due bande Stokes e anti-Stokes, questo permette sia di migliorare la ripetibilità delle misure che di ridurre i costi del sistema di misura.

Nei sistemi Raman OTDR, si preferisce aggiungere un tratto di fibra tra l'accoppiatore e la fibra di rilevamento. Questo pezzo di fibra, chiamato "bobina di riferimento", si trova a temperatura nota e quindi consente di avere un riferimento stabile e di ridurre l'influenza di alcuni parametri potenzialmente variabili del sistema.

L'utilizzo di un tratto di fibra ottica a temperatura nota (T_{ref}) permette di andare a calcolare il rapporto $R(T(z))$ normalizzato sul valore medio della temperatura di riferimento della bobina. In questo modo, i termini che dipendono dalla costruzione del sistema vengono cancellati ed il rapporto Raman normalizzato dipende solo dalla temperatura alla quale avviene la diffusione e dalla perdita differenziale nel percorso di ritorno lungo la fibra di misura.

Partendo da un valore misurato del rapporto Raman normalizzato (in funzione di z), con la conoscenza di T_{ref} e con una stima della distribuzione dell'attenuazione differenziale lungo la fibra, può essere determinata la distribuzione della temperatura $T(z)$ che risulta inversamente proporzionale al logaritmo del rapporto normalizzato $\bar{R}(z)$ [1].

Tipicamente le variazioni di temperatura nel tempo sono trascurabili perché lo scambio di calore è un processo lento e quindi è lecito assumere che T sia funzione solo di z .

4.2.1 Principali tipologie di sistemi Raman OTDR

I sistemi Raman OTDR possono essere raggruppati in tre grandi categorie che mettono in relazione la portata massima con determinate scelte tecnologiche: i sistemi a corto raggio, i sistemi ad alte prestazioni e i sistemi a lungo raggio [1].

Nella prima categoria, le distanze operative arrivano fino a 4 – 5 km con una lunghezza d'onda compresa tra gli 850 – 910 nm. In questo intervallo sono disponibili numerosi diodi laser pulsanti ad ampio contatto e gli APD standard in silicio assorbono la luce retrodiffusa in modo efficiente fornendo un primo livello di amplificazione a basso rumore. Questi dispositivi

tendono ad essere limitati dalla quantità di potenza ottica che può essere lanciata nella fibra di rilevamento.

Le tecnologie ad alte prestazioni utilizzano sorgenti che operano con lunghezze d'onda di circa 1064 nm e a differenza dei sistemi guidati da sorgenti laser a semiconduttore pulsato, questi sono limitati dagli effetti ottici non lineari. Per questi tipi di sonda le bande di Raman, in particolare la banda di Stokes, sono al limite della banda di assorbimento degli APD al silicio. La categoria dei sistemi da 1064 nm domina il mercato DTS ad alte prestazioni su distanze fino a circa 15 km .

L'ultima classe di sistemi opera invece ad una lunghezza d'onda maggiore pari a 1550 nm . Come visto, la perdita di una fibra ottica in questa regione è ridotta al minimo. Questi sistemi sono preferiti per distanze superiori a circa 10 km su fibra multimodale e 15 km su fibra monomodale.

4.2.2 Prestazioni e limiti dei sistemi Raman OTDR

I parametri chiave che influenzano le prestazioni dei sistemi di rilevamento distribuiti sono: la risoluzione spaziale, la lunghezza della fibra di rilevamento, la risoluzione del misurando e il tempo di misurazione richiesto per raggiungere tale risoluzione. I primi due elementi possono essere espressi considerando il numero di punti indipendenti di rilevamento (N_s), ovvero il rapporto tra la lunghezza della fibra di rilevamento e la risoluzione spaziale. Inoltre, nella maggior parte dei sistemi DTS, la risoluzione della temperatura varia con l'inverso del quadrato del tempo di acquisizione dei dati (t_{acq}).

La risoluzione spaziale dei sistemi Raman OTDR è sostanzialmente determinata dalla larghezza dell'impulso del laser e dalla risposta del sistema:

$$\delta z = \frac{v_g}{2} \sqrt{\tau_p^2 + \tau_{rx}^2 + \tau_f^2}$$

dove τ_{rx} e τ_f sono rispettivamente dovuti alla risposta del ricevitore e della fibra.

Per aumentare la risoluzione spaziale, il primo metodo è quello di accorciare il più possibile la larghezza dell'impulso, ma questo rende debole il segnale da analizzare. Un'altra tecnica proposta per ottimizzare i due termini della risoluzione spaziale è basata sull'utilizzo di un *multiplexing* tra due canali che introducono un ritardo noto di percorso ($\delta L/2$). In questo modo il segnale retrodiffuso di Raman viene integrato due volte per flussi di dati con ritardo temporale corrispondente a $\delta L/2$. Si può verificare sperimentalmente che in questo modo la risoluzione spaziale risulta aumentata [7].

La risoluzione della temperatura di un sistema Raman OTDR è direttamente correlata all'incertezza sul rapporto Raman. In generale, questa è dominata dal segnale anti-Stokes,

essendo il più debole dei due segnali, ma in alcuni casi il contributo del segnale Stokes diventa significativo. Il rapporto Raman diventa meno sensibile alla temperatura, all'aumentare di questa, e quindi $R(z)$ deve essere misurato con un SNR migliore per mantenere una risoluzione sufficiente. Quando la temperatura si riduce, il segnale anti-Stokes potrebbe diminuire così rapidamente da essere dominato dal rumore del ricevitore e quindi essere più difficile da misurare.

L'SNR, e quindi, la risoluzione della temperatura di un sistema Raman DTS, è determinato da un lato dal segnale di ritorno dal punto di interesse e dall'altro dal rumore presente in quello stesso punto. Di solito ci si preoccupa dell'SNR all'estremità dell'intervallo di rilevamento, dato che le posizioni più vicine daranno risultati migliori.

I limiti pratici delle prestazioni del DTS vengono raggiunti quando l'energia della sonda viene aumentata fino al limite di non linearità; il sistema ottico è reso il più possibile efficiente nel percorso di ritorno e il ricevitore è progettato per introdurre il minor rumore possibile.

La potenza del segnale di test è solitamente limitata dall'effetto dello *scattering* di Raman stimolato (SRS). Il principale effetto dell'SRS è la distorsione della misurazione perché la potenza dall'impulso provoca la formazione di un impulso secondario alla lunghezza d'onda di Stokes che viaggia con l'impulso inviato. L'impulso secondario restituisce, attraverso la retrodiffusione di Rayleigh, un segnale aggiuntivo alla lunghezza d'onda di Stokes dell'impulso di *probe*. Aggiunge quindi un contributo spurio al segnale Stokes e riduce così artificialmente il rapporto Raman; a sua volta viene ridotto anche il valore misurato della temperatura. Nelle fibre monomodali a 1550 nm, la potenza massima è dell'ordine di 1 W, e per le fibre multimodali 50/125 la limitazione di potenza è di circa 15 W [1].

In letteratura viene fatto frequentemente riferimento alla “figura di merito” (MDTS), che rappresenta il numero di punti rilevati che possono essere acquisiti con una risoluzione di 1 K in un tempo di acquisizione di 1 s. Questo parametro consente, quindi, di effettuare confronti significativi tra sistemi specificati in modi diversi.

4.3 Sistemi Raman OFDR

I limiti di prestazione dei sistemi Raman OTDR sono determinati sostanzialmente dall'energia dell'impulso di test, ovvero dalla potenza di picco. Per superare questa limitazione, sono stati sviluppati dei sistemi che si basano su progetti a spettro esteso. Le tecniche a spettro esteso aumentano la durata del segnale di test, utilizzando però delle forme di modulazione e codifica che consentono di elaborare i segnali di retrodiffusione in modo tale da ripristinare la risoluzione del sistema.

In una tecnica a spettro esteso, pertanto, l'energia del segnale di test è determinata dalla sua durata, ma la risoluzione è determinata dalla larghezza di banda del segnale. Nei sistemi a impulso singolo, queste quantità sono legate insieme perché la larghezza di banda è essenzialmente l'inverso della durata dell'impulso. Le tecniche dello spettro interrompono questa connessione consentendo alla larghezza di banda del segnale di test di essere molto più ampia della durata inversa dell'impulso.

Nella riflettometria nel dominio della frequenza ottica (OFDR), la sorgente è una portante ottica la cui frequenza varia con una scansione lineare periodica, mentre l'ampiezza viene mantenuta essenzialmente costante (FMCW). Gli echi ottici rilevati hanno lo stesso *sweep* di frequenza ma con un ritardo proporzionale alla distanza di propagazione nella fibra. Il segnale riflesso, nel punto iniziale, interferisce con un segnale di riferimento per produrre un segnale alla frequenza di battimento proporzionale alla differenza delle due frequenze. È possibile quindi stabilire una correlazione tra la frequenza di battimento e la posizione lungo la fibra, poiché la differenza di frequenza tra il riferimento (oscillatore locale) e la luce diffusa è proporzionale al ritardo temporale e quindi alla distanza per una scansione lineare.

La distanza può essere quindi mappata con la frequenza secondo la relazione:

$$z = \frac{v_g}{2\gamma} * f_b$$

dove $\gamma = \Delta F/Tr$ è lo *sweep rate* e f_b è la frequenza di battimento.

In questo modo la risoluzione spaziale dipende dall'intervallo di frequenze nella spazzolata del segnale di test:

$$\delta z = \frac{v_g}{2\Delta F}$$

Si evidenzia che l'elaborazione del segnale, utilizzata per recuperare la dipendenza dalla distanza dei segnali Raman codificati nel segnale a frequenza di scansione, richiede un elevato grado di linearità dell'elettronica e del circuito di azionamento del laser. In compenso i segnali vengono convertiti in una frequenza bassa e costante e possono essere utilizzati convertitori ad alta risoluzione e amplificatori di precisione.

Riassumendo, il metodo OFDR consente di lanciare una quantità di energia sostanzialmente maggiore rispetto all'OTDR; tuttavia, la potenza di picco consentita è inferiore per OFDR. Ciò tende a ridurre l'apparente vantaggio dell'approccio OFDR.

4.4 Sistemi BOTDR

A differenza dell'OTDR di Raman, dove il parametro da rilevare è l'ampiezza dell'intensità Stokes e anti-Stokes, nell'OTDR di Brillouin invece si misura lo *shift* di frequenza delle linee

di Stokes. Per riuscire a discriminare le variazioni della frequenza di Stokes nei sensori basati sullo *scattering* spontaneo di Brillouin è necessario, pertanto, disporre di un laser di pompa con una ampiezza di riga molto stretta e di un rivelatore con alta risoluzione. Il metodo però, presenta il vantaggio di permettere il monitoraggio del sistema da un solo estremo della fibra ottica.

I sistemi BOTDR applicano i concetti della riflettometria nel dominio del tempo all'onda di *backscattering* di Brillouin. Si basano quindi su un metodo di rilevamento coerente che utilizza una luce pulsata, che viene lanciata nella fibra ottica per generare la diffusione spontanea di Brillouin. Poiché la potenza del segnale retrodiffuso è molto debole, questa viene misurata con un ricevitore coerente mescolando il segnale di diffusione con un'onda continua (CW) generata da un oscillatore locale (LO), come illustrato nella Figura 4.2 [11].

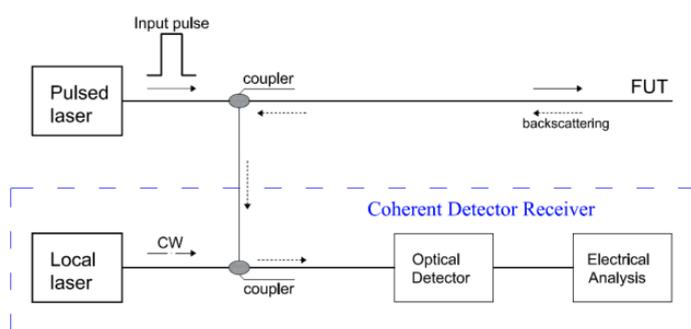


Figura 4.2: Configurazione tipica di un sistema BOTDR

L'interferenza tra i due segnali miscelati genera un segnale alla frequenza di battimento che corrisponde alla differenza delle frequenze della luce retrodiffusa con quella del segnale CW. È inoltre necessario poi introdurre dei filtri elettrici in uscita dal rivelatore ottico per eliminare il segnale di Rayleigh. In alcune applicazioni il segnale dell'oscillatore locale è prelevato dallo stesso laser che genera lo stesso impulso di test.

Poiché lo spostamento della frequenza di Brillouin è una funzione sia della temperatura che della deformazione longitudinale, non c'è modo di misurare in modo univoco ciascuna, separando i loro effetti. Anche il rapporto tra le intensità della luce retrodiffusa di Rayleigh e Brillouin, detto rapporto di Landau-Placzek (LPR) [7], dipende linearmente dalle variazioni di temperatura e di deformazione con coefficienti indipendenti. Sarà possibile, pertanto, ottenere i valori di variazione di temperatura misurando sia lo *shift* di frequenza sia le variazioni di intensità del *backscattering* di Brillouin.

Tuttavia, la tecnica più usata per misurare *strain* e temperatura consiste nell'impiego di due fibre ottiche adiacenti di cui una viene vincolata alla struttura da monitorare, in grado quindi di rilevare le deformazioni e la temperatura, l'altra invece viene lasciata libera, così da rilevare

solo le variazioni di temperatura. La determinazione dei valori separati di *strain* e temperatura avviene quindi per confronto dei segnali rilevati dalle due fibre.

4.4.1 Prestazioni e limiti dei sistemi BOTDR

Grazie alla architettura *single-ended*, il sistema BOTDR è unico tra le misurazioni Brillouin in quanto, in caso di rottura di una fibra, la misurazione può continuare senza ostacoli fino al punto della rottura. I sistemi BOTDR, con tecniche di amplificazione ottica ed eterodina, permettono di migliorare la qualità del segnale e ciò ha consentito di effettuare misurazioni su lunghe distanze.

La risoluzione spaziale di un sensore basato sul BOTDR è limitata dalla durata dell'impulso della sonda, dalla larghezza di banda del ricevitore e dalla dispersione cromatica nel caso di fibre multimodali. Quando si utilizza l'intensità per la misurazione, è possibile ottenere una buona risoluzione spaziale garantendo che la durata dell'impulso sia breve e che la larghezza di banda del ricevitore sia sufficientemente ampia. Anche lo spostamento di frequenza però viene utilizzato come parte del processo di misurazione. Poiché lo spettro delle onde Stokes retrodiffuse si allarga rapidamente, quando la durata dell'impulso di pompa viene ridotta al di sotto della durata del fonone, la capacità di localizzare la frequenza centrale della linea Brillouin viene degradata, con una conseguente perdita di precisione nella stima del BFS (*Brillouin Frequency Shift*).

4.5 Sistemi BOTDA

BOTDA, è un metodo che utilizza lo *scattering* di Brillouin stimolato per sondare lo spettro del guadagno in funzione della distanza lungo la fibra. La Figura 4.3 [11] riporta la configurazione schematica nella quale ai due estremi della fibra vengono iniettati rispettivamente un fascio laser pulsato e uno continuo CW. I segnali di *pump* e *probe* vengono lanciati in corrispondenza delle estremità opposte della fibra al fine di migliorare il processo di *scattering*.

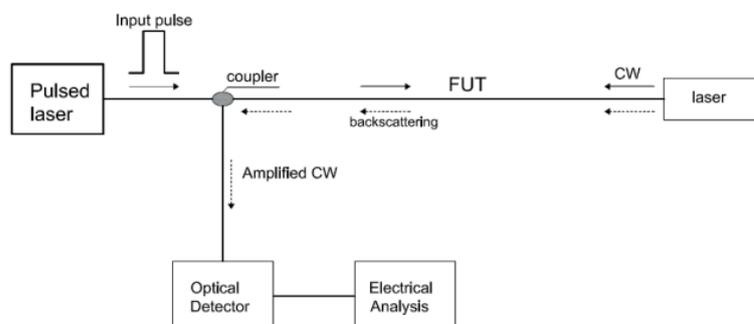


Figura 4.3: Configurazione tipica di un sistema BOTDA

La frequenza del segnale CW viene sintonizzata al valore $\nu_{CW} = \nu_p \pm \nu_B$, che corrisponde quindi alla frequenza dell'impulso laser shiftata del valore di frequenza di Brillouin. Nel caso in cui $\nu_{CW} = \nu_p + \nu_B$ l'impulso sarà amplificato dal fenomeno SBS, mentre il segnale CW viene attenuato da maggiori perdite dette perdite di Brillouin. Quando invece $\nu_{CW} = \nu_p - \nu_B$ l'energia dell'impulso viene trasferita alle sue componenti di Stokes e quindi amplifica la potenza del segnale CW; si parla di amplificazione di Brillouin [7].

Come nel BOTDR, la misurazione BOTDA richiede la scansione della frequenza su un intervallo che copre il range dei possibili valori di ν_B . Se lungo la fibra sensore si verificano variazioni localizzate di temperatura o di deformazione queste sposteranno lo spettro del guadagno di Brillouin e saranno rilevate come discontinuità nel profilo di intensità della luce CW. Misurando le variazioni temporali dell'intensità di *probe*, in funzione delle diverse frequenze di *shift*, è possibile quindi ricostruire la distribuzione delle variazioni di temperatura o di deformazioni. È da notare che il contributo della luce contropropagante CW è integrato su tutta la lunghezza della fibra e quindi la variazione locale di intensità è dovuta solo ai cambiamenti dell'energia dell'impulso.

Nel sistema BOTDA, la potenza del segnale acquisito dal rilevatore risulta superiore a quella della retrodiffusione di Rayleigh, rendendone più semplice il suo filtraggio.

4.5.1 Prestazioni e limiti dei sistemi BOTDA

Analogamente ai precedenti sistemi OTDR, è necessario utilizzare impulsi di durata molto breve per ottenere un'elevata risoluzione spaziale. Tuttavia, brevi impulsi riducono il valore SNR e provocano un ampliamento dello spettro a causa della durata di vita del fonone, diminuendo quindi la precisione nella misura della frequenza. In linea di principio l'amplificazione stimolata dovrebbe mantenere stretto lo spettro del segnale, ma in ogni caso la tecnica BOTDA basata sul *pulse pumping* non permette di raggiungere risoluzioni spaziali inferiori ad 1 m [12]. Nel tempo, per migliorare la risoluzione spaziale, sono state implementate diverse tecniche che si basano sulla variazione dell'onda di *probe*. I metodi più significativi sono il *prepumping*, coppie di larghezza dell'impulso differenziale (DPP-BOTDA) [1], *dark pulse* e *coded pulses*. Grazie a questi sistemi sono state sviluppate applicazioni che raggiungono una risoluzione spaziale dell'ordine dei cm.

I metodi citati raggiungono l'obiettivo di un'elevata risoluzione spaziale e spettrale contemporaneamente, grazie ad un campo acustico preattivato da un impulso di *prepump* a bassa intensità o ad un segnale continuo di fondo della pompa.

Il pre-pompaggio amplifica il segnale di Brillouin ma non aiuta a migliorare l'SNR, poiché aggiunge una componente costante di fondo per il segnale. Per risolvere questo problema, è

stato sviluppato il rilevamento differenziale del guadagno Brillouin, utilizzando due impulsi con una leggera differenza di ampiezza (DPP-BOTDA). Questa tecnica prevede quindi l'invio di impulsi larghi in modo tale da mantenere elevato il guadagno di Brillouin e allo stesso tempo ottenere uno spettro stretto. La risoluzione spaziale, quindi, viene determinata come differenza di larghezza degli impulsi $\delta z = v_g \delta t / 2$, dove δt è la differenza di durata tra i due impulsi.

4.6 Confronto prestazioni tra sensori Raman e Brillouin

Come visto precedentemente, le limitazioni della lunghezza di rilevamento derivano in primo luogo dalle perdite di fibra lungo l'ampio percorso di rilevamento, che può essere compensato mediante tecniche di amplificazione. L'ampiezza dello spettro Brillouin è di 30 MHz, e per lo scattering Raman la larghezza è 6 – 9 THz.

I sensori OTDR basati sullo scattering sono in generale adatti a gestire lunghe distanze di rilevamento, in particolare i sensori Brillouin mostrano le migliori prestazioni in termini di lunghezza della fibra-sonda, arrivando a distanze fino a 150 km con risoluzione spaziale fino a 2 m, risoluzione di temperatura di 1.5 K e tempo di misurazione relativamente buono. Lo scattering di Brillouin può anche rivelare la deformazione distribuita, cosa che non può essere fatta con Raman OTDR.

Le prestazioni dei sensori distribuiti sono elencate nella seguente tabella [13].

	Raman OTDR	Raman OFDR	BOTDR	BOTDA
Sensing range	0.9 – 37 km	4 – 10 km	20 – 50 km	150 – 200 km
Spatial resolution	0.4 – 17 m	1 – 3 m	≈ 1 m	2 cm (2 km) 2 m (150 km)
Main Measurands	Temperature	Temperature	Temperature and Strain	Temperature and Strain
Temperature accuracy	0.8 – 3 K	0.8 – 3 K	2 – 3 K	1 – 2 K
Strain accuracy	–	–	60 μ m	20 μ m
Measurement time	< 3 min	< 3 min	1 – 5 min	2 – 5 min
Light source requirement	Two DFB laser	Direct modulated laser	One narrow linewidth laser	One high Power laser
Detectors	High sensitivity	High sensitivity	High sensitivity	Broadband

Tabella 1: Prestazioni dei sensori distribuiti

Con riferimento invece ai metodi di misura *single* o *double ended* le principali caratteristiche possono essere schematizzate come riportato nella Tabella 2 [14].

Metodo di misura	Vantaggi	Svantaggi
Single ended	<ul style="list-style-type: none"> • Rispetto alla misurazione <i>double-ended</i>, il cavo in fibra ottica può essere installato facilmente. • Anche se la fibra ottica è interrotta, è possibile continuare la misurazione nei punti precedenti al punto di interruzione. 	<ul style="list-style-type: none"> • È impossibile compensare le fluttuazioni della perdita della fibra ottica basate sulla posizione. • La calibrazione della temperatura è più complicata della misurazione <i>double-ended</i> estremità.
Double ended	<ul style="list-style-type: none"> • La distribuzione della perdita lungo la fibra ottica viene annullata automaticamente. • Se la fibra ottica è interrotta, il metodo di misurazione può passare automaticamente alla misurazione <i>single-ended</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> • L'installazione del cavo del sensore in fibra ottica deve essere realizzata in configurazione loop. • L'intervallo di distanza massimo effettivo per la misurazione della temperatura è la metà di quello del metodo di misurazione <i>single-ended</i>

Tabella 2: *Vantaggi e svantaggi delle modalità single-ended e double-ended*

Capitolo 5

Applicazioni

I sistemi DOFS trovano impiego in numerosi campi di applicazione. In linea del tutto generale, quando è richiesta la sola misurazione della temperatura verranno privilegiati i sensori basati sullo *scattering* di Raman. Questi dispositivi rappresentano i primi esempi di applicazione diffusa dei DTS e si caratterizzano, non tanto per la loro accuratezza, quanto per essere piuttosto robusti. Essendo una tecnologia sviluppata già da tempo, il loro costo risulta inferiore rispetto alle tecniche più recenti come i sensori basati sullo *scattering* di Brillouin. Tuttavia, è necessario ricorrere all'utilizzo di questi ultimi, quando le strutture da monitorare si estendono su distanze particolarmente lunghe e i sensori di tipo Raman OTDR non sono più sufficienti. È inoltre indispensabile utilizzare le tecnologie BOTDR/BOTDA, basate sullo *scattering* di Brillouin quando oltre alla temperatura deve essere presa in considerazione anche la deformazione.

5.1 Structural health monitoring (SHM)

Uno dei più importanti settori per i DOFS riguarda il loro utilizzo nell'ambito del *structural health monitoring* (SHM) nell'ingegneria civile e geotecnica. Le principali strutture monitorabili sono: ponti, gallerie, dighe, argini, ferrovie e strutture geotecniche. In questo ambito, l'attenzione si concentra sulle applicazioni dei DOFS che richiedono la misurazione della deformazione; tuttavia, si rende spesso necessaria anche la misurazione della temperatura per compensare la sensibilità incrociata legata ai fenomeni di temperatura e deformazione.

Il vantaggio fondamentale dei DOFS nel monitoraggio delle strutture civili e geotecniche, come visto in precedenza, è la possibilità di implementare una moltitudine di punti di misura lungo la struttura. Infatti, questi sensori forniscono migliaia di punti di misurazione lungo una fibra ottica, la quale può essere fissata o incorporata nella struttura, in un layout molto denso. Questa maggiore disponibilità di misurazioni simultanee può essere utilizzata nell'ambito dello SHM sia per il monitoraggio dell'integrità che per la valutazione strutturale delle opere di ingegneria civile e geotecnica.

I ponti rappresentano una delle infrastrutture civili più importanti, il cui cedimento può costare molto in termini di vite umane e di impatto economico. Molti paesi devono far fronte alla necessità di garantire la sicurezza di un parco ponti che invecchia e, in questo contesto,

l'applicazione di DOFS può svolgere un ruolo molto significativo nell'implementazione dello SHM. La prima applicazione documentata di DOFS al monitoraggio dei ponti è stata a Göteborg in Svezia. Si tratta di un ponte lungo 1 km originariamente costruito nel 1930 [5]. Il ponte è stato ristrutturato negli anni 2000 quando è stato installato e messo in funzione un sistema per il monitoraggio dell'integrità basato su Brillouin DTSS.

Un'applicazione SHM, che ha dato importanti risultati nell'utilizzo dei DOFS, riguarda il rilevamento delle perdite nelle dighe. Una delle cause più frequenti di cedimento o degrado delle dighe è determinata dall'erosione interna indotta dalle infiltrazioni. Pertanto, risulta di fondamentale importanza la disponibilità di metodi per rilevare tali effetti. I DTS basati su Raman o Brillouin forniscono un mezzo efficiente per identificare le perdite d'acqua; a tale scopo vengono introdotti cavi in fibra ottica all'interno del corpo della diga nelle zone di interesse.

Un primo approccio indiretto, per effettuare questo monitoraggio, si basa sulla misurazione della temperatura. Una infiltrazione d'acqua, a temperatura diversa da quella del materiale circostante, provoca l'insorgere di una variazione di temperatura in una determinata sezione della diga, che può essere rilevata. Questo metodo, che si basa sulle variazioni assolute di temperatura, viene detto metodo passivo e può essere applicato solo quando esiste un gradiente di temperatura tra l'acqua e il materiale della diga. Per superare questa limitazione, può essere adottato il cosiddetto metodo dell'impulso di calore, utilizzando un cavo ibrido che, oltre alle fibre ottiche, contenga anche un conduttore elettrico che ha lo scopo di riscaldare tutto il cavo di *sensing*. Attraverso le fibre ottiche e il sistema DTS viene registrata la risposta termica del mezzo a questo riscaldamento, rilevando in particolare l'incremento di temperatura dopo un dato intervallo di tempo. Se in alcune zone è presente un flusso d'acqua, questo toglierà calore all'ambiente circostante, e la variazione di temperatura risulterà ridotta. Utilizzando i cavi ibridi è possibile determinare anche la conducibilità termica apparente dell'ambiente circostante, analizzando l'andamento temporale della risposta al riscaldamento. All'aumentare della saturazione dell'acqua, nel materiale circostante la fibra, aumenta anche la conducibilità termica misurata. Per il monitoraggio di lunghi tratti di cavi, però, questo metodo richiede di fornire una elevata potenza di riscaldamento, con difficoltà di generare e gestire tensioni e correnti elevate.

Un'applicazione di questo metodo, che utilizza un Raman DTS per la misurazione delle temperature e un generatore di corrente elettrica per ottenere l'impulso di calore, è stata realizzata per una diga sul fiume Ebro in Spagna.

La Figura 5.1 [5] mostra un esempio di misurazione della conducibilità termica lungo la diga in due giorni consecutivi. La rilevazione del flusso d'acqua si manifesta come un grande

aumento della conduttività termica apparente del suolo come può esser visto nella parte destra del grafico.

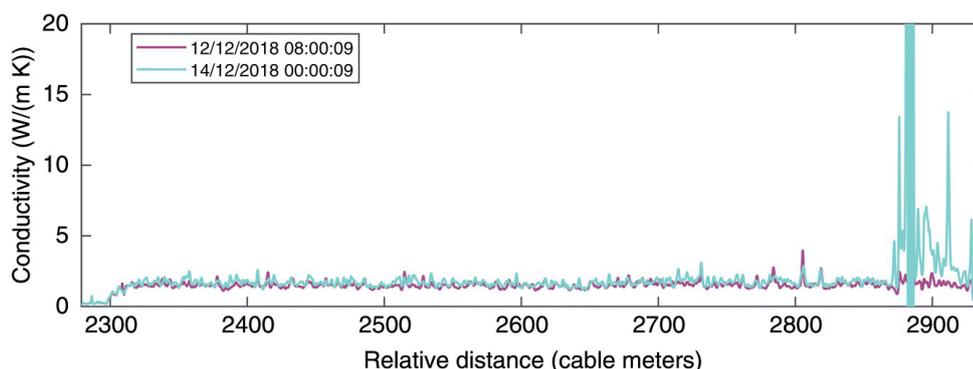


Figura 5.1: Esempio di misura della conducibilità lungo l'asse della diga

Negli ultimi anni si sta sempre più evidenziando il problema della presenza di “fontanazzi” negli argini di fiumi e canali, causati dall’aumento della popolazione di nutrie che scavano le loro tane lungo i corsi d’acqua. Poiché questi minano l’integrità e la capacità degli argini di resistere ai fenomeni di piena, sta diventando sempre più importante il monitoraggio di queste strutture di protezione idraulica. A questo scopo possono essere efficacemente utilizzati gli stessi metodi di rilevamento delle infiltrazioni d’acqua precedentemente illustrati per le dighe. Anche le gallerie sono un’altra struttura di ingegneria civile fondamentale, costose e complesse da costruire. L’implementazione di un sistema SHM per queste infrastrutture è quindi molto importante. Nello SHM dei tunnel i DOFS svolgono funzioni di monitoraggio durante la loro costruzione. Le strutture di supporto possono essere adattate alle condizioni del terreno osservate, permettendo l’installazione di elementi di stabilizzazione solo quando necessario, riducendo così i costi.

A titolo di esempio si riporta il caso del *Semmering Base Tunnel* [15], uno dei principali progetti infrastrutturali ferroviari in costruzione in Europa, che farà parte di un collegamento ad alta velocità tra Vienna e Graz. Le condizioni geologiche lungo il tracciato del tunnel sono impegnative e ciò richiede un monitoraggio esteso della costruzione del tunnel stesso e delle infrastrutture critiche nelle vicinanze.

Nel settore dei trasporti le ferrovie rappresentano un’opera infrastrutturale molto importante. L’integrità dei binari e del fondo sul quale appoggiano sono fondamentali per garantire la sicurezza dell’esercizio ferroviario. Per queste applicazioni è utile poter disporre di sistemi che permettano di rilevare e discriminare sia le deformazioni che le variazioni di temperatura [16]. Considerando inoltre, che le lunghezze delle rotaie si estendono per diversi chilometri, i sensori che si basano sulla tecnica BOTDA risultano particolarmente adatti allo scopo. Le deformazioni principali alle quali i binari sono soggetti sono quelle in direzione longitudinale a causa della dilatazione termica del metallo, mentre quelle indotte da forze esterne, come quelle dal peso

dei convogli, sono dirette perpendicolarmente. L'applicazione dovrà pertanto tener conto in modo particolare di come le fibre di *sensing* devono essere disposte e ancorate alla struttura. La misura contemporanea delle deformazioni e della temperatura consente, mediante elaborazioni successive, di discriminare tra le deformazioni strutturali e le componenti relative alla dilatazione termica.

5.2 Fire detection

I sistemi DOFS, specialmente Raman DTS, trovano un grande impiego come sensori di monitoraggio per la sicurezza e forniscono un efficace meccanismo di allarme precoce per la prevenzione della diffusione degli incendi. Tra le varie situazioni che richiedono sistemi di *fire detection*, con capacità di misurazione continua su lunghe distanze, la più rilevante riguarda gli allarmi antincendio in gallerie (ferrovie, autostrade e linee metropolitane). Le applicazioni sviluppate per questi casi devono avere caratteristiche di robustezza e affidabilità, non devono generare falsi allarmi ed è importante che risultino immuni alle interferenze elettromagnetiche. Per questi motivi le soluzioni rese disponibili dai sistemi Raman DTS risultano particolarmente adatte. A differenza di altri campi di applicazione anche i tipi di cavi utilizzati dovranno soddisfare specifiche caratteristiche, sia in termini di protezione, dall'umidità, dagli agenti corrosivi e dai roditori, che nel rispetto delle specifiche *Low-Smoke-Zero-Halogen*.

Per poter rilevare rapidamente un principio d'incendio senza falsi allarmi, vengono definite per le varie zone da monitorare dei valori di soglia specifici. Per riuscire a ottenere maggiori informazioni sulla zona interessata dall'incendio, e sulle dinamiche di propagazione, i livelli limite dovranno comprendere non solo valori statici di temperatura massima, ma anche gradienti di temperatura sia spaziali che temporali.

Un esempio di applicazione di un sistema Raman DTS basato sull'OTDR è stato realizzato da RFI (Rete Ferroviaria Italiana) per un tunnel ferroviario di circa due chilometri lungo la costa tirrenica [17]. Per questo progetto sono stati utilizzati otto cavi in fibra ottica di tipo multimodale *graded-index* (50/125 μm), opportunamente saldati alle estremità, in modo da realizzare un percorso di andata e ritorno lungo 16 km, come mostrato in Figura 5.2. I sistemi Raman DTS che operano in configurazione ad anello e con bobine di fibra di calibrazione interna, sono particolarmente adatti allo scopo; il sistema utilizza una sorgente laser alla lunghezza d'onda di 1550 nm. I dati rilevati dimostrano una buona affidabilità del DTS che risulta in grado di rilevare variazioni di temperatura di 1 °C con un tempo di risposta inferiore a un secondo e con risoluzione spaziale di due metri. Inoltre, il sistema ha dimostrato di poter

identificare la presenza di un treno fermo all'interno del tunnel, registrando l'incremento di temperatura generato dal calore emesso dal motore elettrico.

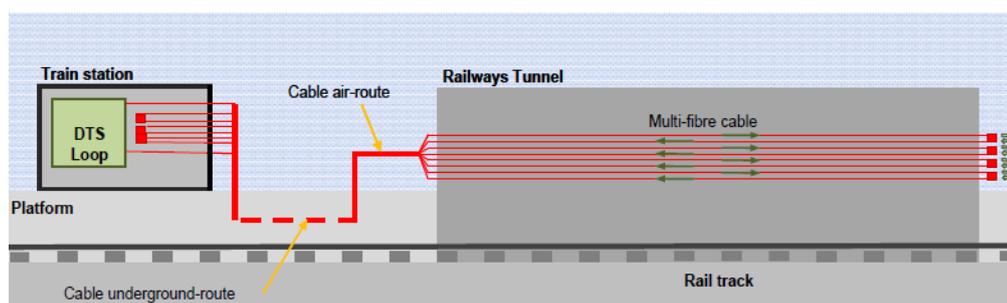


Figura 5.2: Architettura della sperimentazione sul campo

Nei sistemi Raman DTS convenzionali come quello illustrato, la temperatura lungo la fibra viene visualizzata come curva bidimensionale, ma questo metodo di visualizzazione non permette di individuare facilmente le regioni in cui la temperatura cambia rapidamente (come un incendio locale) nell'effettiva realtà tridimensionale. Sono stati proposti dei metodi di monitoraggio mediante rilevamento distribuito della fibra ottica che riproduce la forma tridimensionale del tunnel [18]. Lo scopo principale è quello di fornire informazioni che consentano di controllare la velocità del processo di estrazione del calore e garantire la sicurezza. Questi modelli di visualizzazione tridimensionale delle variazioni di temperatura si basano su un particolare layout di posa delle fibre.

5.3 Energy cable: valutazione dinamica della portata

Tra le prime applicazioni dei DTS, la più diffusa è stata quella dedicata al monitoraggio di cavi elettrici interrati ad alta tensione. L'attuale rapida espansione di energia da fonti rinnovabili e l'aumento del consumo energetico, richiedono la realizzazione di nuove infrastrutture di trasmissione. Inoltre, negli ultimi anni, si sta cercando di potenziare la distribuzione dell'energia elettrica tramite un miglior controllo e una più flessibile gestione delle linee. L'evoluzione della nuova rete elettrica porta allo sviluppo di strutture che prendono il nome di *smart grid* [5].

Uno dei parametri fisici più importanti da monitorare, per la valutazione in tempo reale dello stato dei cavi, è la temperatura. Infatti, per calcolare la capacità di trasporto di corrente massima prevista, la temperatura del conduttore deve essere nota in ogni momento. La capacità dei cavi è, quindi, limitata principalmente da due fattori: dalla stabilità della rete e soprattutto dai limiti termici dei conduttori utilizzati. Il riscaldamento, causato dal passaggio della corrente o dall'irradiazione solare per le linee aeree, riduce la robustezza e aumenta la resistenza della

linea. Inoltre, nel caso di elettrodotti aerei la dilatazione termica dei cavi può provocare un abbassamento delle linee riducendone la distanza di sicurezza da terra.

Il metodo migliore, e più accurato per valutare la variazione termica del cavo, consiste nel monitoraggio diretto della temperatura della linea sotto carico. I sistemi DTS costituiscono un metodo di rilevamento diretto che fornisce la distribuzione delle temperature lungo tutte le linee di trasmissione e, grazie alla loro natura dielettrica, possono essere utilizzati anche quando i cavi sono sotto tensione. Alcuni costruttori di cavi elettrici, come Prysmian Group (leader mondiale che ha acquisito “Cavi Pirelli”), hanno sviluppato cavi per alta tensione, con conduttori di fase che incorporano fibre ottiche all’interno della loro struttura. Questi prodotti consentono una maggiore facilità di installazione, una modellazione accurata delle temperature ed eliminano le interferenze dell’ambiente esterno e qualsiasi interpretazione errata dei risultati. Un ulteriore vantaggio di questa configurazione risiede nel fatto che la fibra ottica all’interno dei cavi viene protetta e il sensore così realizzato risulta particolarmente robusto. I sistemi DTS per monitorare la temperatura, e quindi la massima portata dei cavi, possono essere basati sia sui metodi Raman che Brillouin. La scelta dipende dalle specifiche del progetto che si vuole realizzare e in particolare dalla lunghezza delle linee di trasmissione elettrica. Nel caso in cui sia necessario rilevare la distribuzione di temperatura con apparati Brillouin DTS, è necessario utilizzare dei cavi dove la fibra ottica di misura sia del tipo *loose-loop*, che permettono di disaccoppiare il fenomeno di deformazione dalla temperatura. All’interno di questi cavi, la fibra ottica ha una lunghezza maggiore del conduttore metallico ed è lasciata libera di scorrere al suo interno, senza subire trazioni.

Le fibre ottiche sono state utilizzate anche nei cavi sotterranei e sottomarini ad alta e media tensione. Questi cavi non possono essere ispezionati visivamente e quindi i DTS sono importanti perché forniscono una profilazione termica dettagliata lungo la lunghezza del cavo, permettendo di identificare eventuali punti caldi. Nel caso dei cavi sottomarini, oltre al monitoraggio della temperatura, devono essere identificate anche le deformazioni in quanto possono essere soggetti a cambiamenti ambientali particolarmente rapidi o a danneggiamenti da parte di ancore o reti da pesca. Per questo scopo verranno, quindi, utilizzati sistemi DTSS basati sullo *scattering* di Brillouin.

Questa tecnologia è stata sviluppata oramai da più di vent’anni e, trattandosi di soluzioni mature, nel mercato ci sono vari fornitori che propongono sistemi industrializzati dedicati allo scopo. A titolo di esempio, in ambito europeo, sono alquanto diffusi i dispositivi forniti da Omnisens. Il sistema “Cobra” [19] da loro proposto prevede l’uso di fibre monomodali per i sensori DTS basati su Brillouin, e fibre multimodali per quelli basati su Raman.

5.4 Leak detection

I sistemi DOFS hanno ampliato le attuali tecnologie di rilevamento delle perdite nelle *pipeline* (LDS), fornendo un insieme significativo di nuove funzionalità. Possono svolgere inoltre un ruolo importante nella gestione delle perdite, migliorando le prestazioni e la conformità normativa. Ci sono varie tipologie di sensori in fibra ottica per il monitoraggio delle condotte, e tra questi i sistemi DTS sono utilizzati principalmente per le applicazioni in cui gli eventi di perdita generano una rapida e significativa variazione termica. Gli LDS basati sulla tecnologia DTS offrono prestazioni affidabili e una rapida risposta d'allarme con letture precise di temperatura e posizione. I sistemi DTS, che utilizzano un cavo sensore in fibra ottica, sono intrinsecamente sicuri e possono essere utilizzati in atmosfere contenenti gas esplosivi, dal momento che al cavo non viene applicata tensione elettrica [20].

Un ruolo importante, oltre al sistema di misura DTS, è svolto dagli algoritmi di post-elaborazione necessari per determinare se le variazioni di temperatura, rilevate attorno alla tubazione, sono coerenti ad un evento di perdita. È necessario, infatti, filtrare i cambiamenti causati dall'ambiente circostante o da transitori termici dovuto al funzionamento delle *pipeline*. La fibra ottica di rilevamento viene posta all'esterno della tubazione e, nel caso di *pipeline* rivestite da un isolante termico, il cavo di fibra viene collocato all'esterno della coibentazione. Applicazioni simili vengono realizzate per il monitoraggio delle perdite su serbatoi di stoccaggio dei prodotti, per i quali le sole ispezioni visive non permettono di rilevare precocemente eventuali perdite sui fondi. Un sistema DTS può essere quindi realizzato installando la fibra ottica sulla circonferenza dei serbatoi o ancor meglio coprendo l'intera superficie di base.

A seconda dei prodotti trasportati dalle *pipeline*, in caso di perdita, si possono avere incrementi o diminuzioni della temperatura nel punto interessato alla fuoriuscita delle sostanze. Tipicamente, nel caso di flussi di sostanze gassose (etilene, propilene, ammoniaca, ...) che sono trasportate ad elevate pressioni, la fuoriuscita da una perdita porta ad una rapida espansione del gas e ad un conseguente raffreddamento della zona circostante. Nel caso di trasporto di liquidi l'aumento e la diminuzione della temperatura, a causa di una perdita, dipendono dalla temperatura del prodotto che può essere superiore o inferiore a quella ambientale.

Le performance tipiche dei sistemi di *leak detection* industriali, che utilizzano le tecnologie DTS, permettono di rilevare cambiamenti di temperatura della *pipeline* con risoluzione spaziale di un metro in circa dieci secondi. Consentono quindi di generare degli allarmi in tempi molto più rapidi dei classici sistemi di rilevamento perdite basati su bilancio di materia o cadute di pressione, specialmente nel caso di piccole porosità.

5.5 Monitoraggio asset industriali

I sistemi DTS trovano ampio utilizzo nel monitoraggio di apparecchiature industriali. In particolare, negli impianti di processo e nelle raffinerie, i sensori distribuiti in fibra ottica sono stati adottati già da tempo e queste applicazioni costituiscono una delle maggiori fette di mercato per questi prodotti. Poiché il DTS può misurare e registrare la distribuzione della temperatura in dettaglio e in tempo reale, sono state sviluppate diverse applicazioni per il rilevamento degli *hot-spot* nelle apparecchiature. Inoltre, essendo un metodo affidabile e disponibile a un costo relativamente basso, contribuisce a sviluppare nuovi modelli di esercizio e manutenzione degli impianti [1].

Le apparecchiature che operano ad alta temperatura, come recipienti o reattori, possono causare dei riscaldamenti parziali e anomali, chiamati *hot-spot*, a causa di reazioni interne irregolari, di raffreddamento inadeguato o altro.

Questi *hot-spot* possono causare gravi incidenti, in particolare negli impianti in cui sono presenti gas o fluidi ad alta pressione o temperatura. Il monitoraggio degli *hot-spot* tramite il sistema DTS richiede solo la posa della fibra ottica lungo tutta la superficie da monitorare, per rilevare in modo affidabile i punti caldi e i relativi segnali di allarme. Normalmente viene adottata una configurazione di misurazione ad anello, utilizzando un cavo in fibra ottica che può resistere alle alte temperature.

Anche per le macchine elettriche, come motori, generatori o trasformatori di potenza, può essere utile un sistema di monitoraggio degli *hot-spot*. Il principale problema di queste apparecchiature è la perdita di isolamento degli avvolgimenti. Prima di arrivare alla completa rottura della macchina, si sviluppano dei fenomeni di scariche parziali che provocano un innalzamento localizzato della temperatura negli avvolgimenti elettrici. Grazie alla natura dielettrica delle fibre ottiche, all'interno delle macchine possono essere installate delle sonde che permettono il rilevamento di questi *hot-spot*.

Altri settori industriali dove vengono impiegati i sensori DTS/DTSS sono quelli dedicati alla produzione di energia elettrica, come centrali a ciclo combinato o nucleari, all'estrazione di energia geotermica e gli impianti di estrazione *oil and gas*. Soprattutto quest'ultimo è uno degli ambiti chiave nell'applicazione della tecnologia DTS e conta numerose installazioni. Le principali ragioni per cui questa tecnologia ha trovato sviluppo sono [5]:

1. l'ambiente molto ostile all'elettronica, per cui, qualsiasi sensore discreto è vulnerabile a causa del rischio di guasti nelle connessioni;
2. il dispiegamento rettilineo di un unico cavo in fibra ottica che risulta quindi il tipo di sensore più semplice concepibile da installare in un pozzo;

3. la natura distribuita del sensore che si adatta alla necessità di raccogliere dati lungo il pozzo o almeno lungo l'intervallo di produzione.

ENI è un esempio di industria *oil and gas* italiana che utilizza sistemi di monitoraggio dei pozzi di estrazione basati sulla tecnologia DTS.

Capitolo 6

Conclusioni

Lo studio e l'applicazione dei sensori distribuiti in fibra ottica richiedono l'intersezione di molte discipline, tra le quali la fisica ottica e quella utilizzata per codificare il misurando sul segnale di ritorno, la tecnologia delle fibre, le tecniche di strumentazione, e la conoscenza utilizzata in ciascuna delle applicazioni.

Le specifiche di progetto di un sistema di monitoraggio con sensori riguarderanno, in prima istanza, il misurando e le prestazioni in termini di accuratezza, risoluzione, distanza e tempo di aggiornamento, che si intendono raggiungere. Queste caratteristiche porteranno a determinare la tecnologia di interrogazione, ossia, come viene individuata la dimensione della distanza e come l'informazione relativa al valore locale del misurando viene convertita in una modulazione del segnale ottico. Conseguentemente sarà individuato il tipo di sensore di temperatura distribuito da utilizzare, ovvero la scelta tra Raman o Brillouin DTS. Le specifiche dovranno inoltre descrivere il cavo in fibra ottica, con particolare riferimento alla sua dimensione, alla modalità di trasmissione (mono o multi modale) e alla sua protezione. Sarà necessario, inoltre, considerare la configurazione (*single o double ended*) della fibra di *sensing*, il layout e la modalità di posa nell'installazione. Il volume dei dati generati dai DOFS è molto elevato rispetto ai sensori convenzionali e la gestione di questi richiede architetture specifiche per il loro trasferimento e archiviazione.

Le prime applicazioni dei sensori Raman DTS sono state sviluppate da circa 30 anni e benché questo possa essere considerato un settore relativamente maturo, il ritmo di sviluppo non mostra segnali di attenuazione. I progressi ottenuti riguardano principalmente il miglioramento della precisione e la diffusione dei tipi di applicazione. Anche il concetto di rilevamento basato su Brillouin ha visto negli ultimi anni miglioramenti nella progettazione delle forme d'onda della sonda, per raggiungere risoluzioni spaziali sempre più fini e maggiori portate. I progressi in questo campo sono stati aiutati dal miglioramento delle tecnologie, tra le quali è utile ricordare:

- i convertitori A/D più veloci con risoluzioni del segnale migliori (12-16 bit);
- le tecnologie per il trasferimento veloce dei segnali digitali e per il condizionamento del segnale analogico e l'elaborazione integrata;
- la possibilità di impiego, nel campo della fotonica, di laser a banda stretta e ad alta potenza;

- la disponibilità di componenti passivi a basso costo come *splitter*, filtri in linea e dispositivi di divisione della lunghezza d'onda;
- lo sviluppo di fibre ottiche speciali, in particolare per il rilevamento in ambienti difficili;
- le tecniche derivate dall'elaborazione delle immagini per filtrare i segnali, che sono funzioni nelle due variabili tempo e distanza;
- i software di interfaccia con funzioni grafiche flessibili e tempi di acquisizione più rapidi, che hanno permesso lo sviluppo di migliori HMI (*Human Machine Interface*) per i sistemi DTS.

L'innovazione dei DOFS è stata in gran parte facilitata dagli sviluppi di mercato che hanno interessato un numero di settori molto più ampio rispetto a quello delle comunicazioni ottiche. Il campo del DOFS si è dimostrato nel corso degli anni complicato e, nonostante alcune parti della tecnologia stiano maturando, ci si può aspettare ugualmente un decennio o più di ulteriori rapidi progressi.

Delle recenti analisi di mercato [21] riportano che le applicazioni di rilevamento della temperatura (DTS) hanno dominato negli ultimi anni il settore dei DOFS, rappresentandone la quota maggiore pari a oltre il 45%. Tra questi sistemi di monitoraggio quello basato sull'effetto Raman risulta essere quello maggiormente impiegato, raggiungendo una quota pari al 37%.

Il segmento del *oil and gas* ha dominato il settore con una fetta di mercato pari a circa il 35%. Anche altri settori, tra cui energia, sicurezza e ingegneria civile e industriale, hanno un impatto notevole sulla crescita dell'applicazione di questi sistemi.

Vari report di proiezione del mercato dei DOFS stimano, da oggi fino al 2030, un tasso annuo medio di crescita pari a circa 7%. Si ritiene che, oltre al nord America e all'Asia, anche il ruolo dell'Europa sarà importante in questo indice di sviluppo.

Bibliografia

- [1] Hartog, A. H., 2017, *An introduction to distributed optical fibre sensors*, CRC press.
- [2] Galtarossa A., 2023, *Propagazione guidata e dispositivi*, Dipartimento di ingegneria dell'informazione, Università degli studi di Padova.
- [3] Ulaby F., Ravaioli U., 2021, *Fondamenti di campi elettromagnetici*, Pearson.
- [4] Complementi di ottica, *Materiale didattico*, Università degli studi di Roma "Tor Vergata", online, <https://didattica.uniroma2.it/files/scarica/insegnamento/187946-Complementi-Di-Ottica/77067-Lezione-10>, (ultimo accesso: 07 Dicembre 2023).
- [5] Del Villar I., Matias I. R., 2020, *Optical Fibre Sensors: Fundamentals for Development of Optimized Devices*, John Wiley & Sons.
- [6] Pendão C., Silva I., 2022, *Optical fiber sensors and sensing networks: overview of the main principles and applications*, *Sensors*, 22(19), 7554.
- [7] Fang Z., Chin K., Qu R., Cai H., 2012, *Fundamentals of optical fiber sensors*, John Wiley & Sons.
- [8] Shatarah I. S., Olbrycht R., 2017, *Distributed temperature sensing in optical fibers based on Raman scattering: theory and applications*, *Measurement Automation Monitoring*, 63.
- [9] Amira Z., Bouyahi M., Ezzedine T., 2015, *Measurement of temperature through Raman scattering*, *Procedia Computer Science*, 73, 350-357.
- [10] Zeni L., 2008, *L'impiego delle fibre ottiche per il monitoraggio strutturale e ambientale*, Dipartimento di ingegneria dell'informazione, Seconda università di Napoli, online, https://agenda.infn.it/event/371/contributions/48024/attachments/33937/40025/Idee_Ricerca_-_Zeni.pdf, (ultimo accesso: 07 Dicembre 2023)
- [11] Barrias A., Casas J. R., Villalba S., 2016, *A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications*. *Sensors*, 16(5), 748.
- [12] Galindez Jamióy C. A., Lopez Higuera J. M., 2012, *Brillouin distributed fiber sensors: an overview and applications*, *Journal of Sensors*, 2012.
- [13] Bao X., Chen L., 2012, *Recent progress in distributed fiber optic sensors*, *sensors*, 12(7), 8601-8639.
- [14] Yokogawa Electric Corporation, online, https://www.yokogawa.com/it/solutions/products-and-services/measurement/field-instruments-products/fiber-optic-sensor/distributed-temperature-sensing-dtsx3000/#Details__Measurement-Principle-Measurement-Method-Performance__Measurement-Method, (ultimo accesso: 07 Dicembre 2023)
- [15] Buchmayer F., Monsberger C. M., Lienhart W., 2021, *Advantages of tunnel monitoring using distributed fibre optic sensing*, *Journal of Applied Geodesy*, 15(1), 1-12.
- [16] Hsu W. K., Lee Y. L., Kuan T. T., 2021, *Brillouin frequency shift sensing technology used in railway strain and temperature measurement*, *Applied Sciences*, 11(15), 7101.

- [17] Di Pasquale F., Soto M. A., Bolognini G, 2014, *Raman based distributed optical fiber temperature sensors: Industrial applications and future developments*. In *Photonics for Safety and Security* (pp. 88-113).
- [18] Yan B., Li J., Zhang M., Zhang J., Qiao L., Wang T., 2019, *Raman distributed temperature sensor with optical dynamic difference compensation and visual localization technology for tunnel fire detection*, *Sensors*, 19(10), 2320.
- [19] Omnisens SA, 2022, *Cobra - Omnisens Securing Power Cable Integrity*, online, <https://www.omnisens.com/power-cable.html>, (ultimo accesso 07 Dicembre 2023).
- [20] De Joode A., 2021, *Selection Criteria for Pipeline Leak Detection Methods using Distributed Fiber Optic Sensing*, *Pipeline Technology Journal*.
- [21] Grand View Research Inc, 2023, *Distributed Fiber Optic Sensor (DFOS) Market Size, Share & Trends Analysis Report By Vertical (Oil & Gas, Industrial), By Technology (Rayleigh Effect, Raman Effect), By Application, And Segment Forecasts, 2023 – 2030*.
- [22] Li H. N., Li D. S., Song G. B., 2004, *Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering*, *Engineering structures*, 26(11), 1647-1657.
- [23] Ukil A., Braendle H., Krippner P., 2011, *Distributed temperature sensing: Review of technology and applications*, *IEEE Sensors Journal*, 12(5), 885-892.
- [24] Dornstädter J., 2013, *Leakage detection in dams–state of the art*, 20th SLOCOLD, Ljubljana, 77-86111.
- [25] "IEEE Guide for Temperature Monitoring of Cable Systems," in IEEE Std 1718-201, vol., no., pp.1-35, 8 June 2012, doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6214562.
- [26] Li J., Yan B., Zhang M., Zhang J., Jin B., Wang Y., Wang D., 2019, *Long-range Raman distributed fiber temperature sensor with early warning model for fire detection and prevention*. *IEEE sensors journal*, 19(10), 3711-3717.