



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

Corso di Laurea in **Ingegneria elettronica**

Relazione per la prova finale

Titolo

I reticoli di Bragg ed alcune applicazioni industriali

Relatore: **Prof. Galtarossa Andrea**

Laureando: **Dianese Lorenzo**

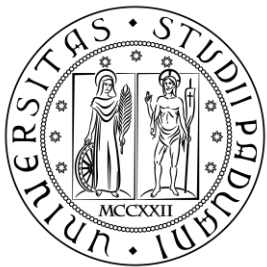
Matricola n.: 2104303

ANNO ACCADEMICO 2025/2026



Elettronica Convenzionale vs FBG

Caratteristica	Trasduttori Elettrici (Strain/NTC)	Sensori FBG (Ottici)
Interferenza EMI/RFI	Alta suscettibilità	Totalmente immuni
Ambienti ad Alta Tensione	Rischio archi elettrici / esplosioni	Isolamento dielettrico perfetto
Cablaggio e Peso Elettronica Convenzionale vs FBG	Fili in rame pesanti e complessi	Fibra di vetro leggera (mm di diametro)
Capacità Multiplexing	Un cavo per ogni singolo sensore	Decine di sensori su singola fibra



Il Reticolo di Bragg (FBG)

Un Reticolo di Bragg è un elemento sensibile microstrutturato, integrato direttamente nel nucleo (core) di una fibra ottica monomodale.

È caratterizzato da una variazione periodica e permanente dell'indice di rifrazione lungo l'asse di propagazione (z). Scritta tramite raggi UV

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos \frac{2\pi z}{\Lambda}$$

Parametro	Significato Fisico	Valori Tipici
n_0	Indice di rifrazione medio del nucleo non modificato	Costante di base del vetro
Δn	Ampiezza della modulazione dell'indice	Tra 10^{-5} e 10^{-3}
Λ	Periodo spaziale del reticolo	Distanza tra i "piani" del reticolo
z	Asse di propagazione della luce	Lunghezza della fibra



Trasduzione Thermo-Meccanica



Strain ()

La deformazione meccanica allunga il periodo e altera l'indice tramite l'effetto **fotoelastico**.



Temperatura ()

Governata dall'espansione geometrica della silice e dal predominante effetto **termo-ottico**.

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \epsilon + (\alpha + \xi) \Delta T$$



La Condizione di Bragg

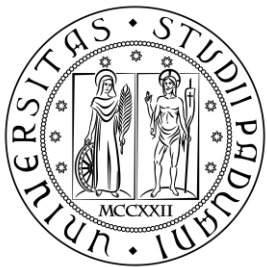
Principio Fisico

La luce a banda larga attraversa il reticolo. I piani con indice di rifrazione variato generano deboli riflessioni. A una specifica lunghezza d'onda, avviene **un'interferenza costruttiva**: la fibra riflette un segnale ottico ad alta ampiezza e banda stretta. Mentre per tutte le altre lunghezze d'onda l'interferenza sarà distruttiva.

Modello Matematico

La lunghezza d'onda di risonanza dipende dall'indice efficace e dal periodo spaziale del reticolo.

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda$$



Sensibilità Incrociata (Cross)

Il Limite di Misura

Un singolo reticolo restituisce una sola variabile (shift di frequenza) ma risente di due grandezze indipendenti simultanee. È impossibile discriminare variazioni meccaniche da quelle termiche.

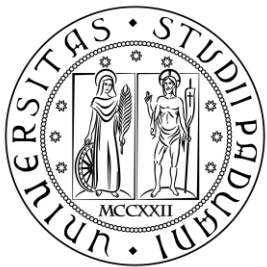
La Soluzione Elettronica

Matrice di trasduzione a sensori accoppiati (es. lunghezze d'onda diverse o FBG di riferimento termico isolato).

Loose tube:

La tecnica del loose tube permette di separare la lettura di temperatura da quella di trazione, isolando uno dei due sensori, in modo tale che non venga influenzato dalle deformazioni meccaniche.

$$\begin{matrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{matrix} = \begin{matrix} K_{\epsilon 1} & K_{T1} \\ K_{\epsilon 2} & K_{T2} \end{matrix} \begin{matrix} \epsilon \\ \Delta T \end{matrix}$$



Architetture di Demodulazione

1. Filtro di Bordo (Edge Filtering)

Semplice ed economica (SLED + Filtro Passivo).

Altissima velocità (banda dei MHz).

Altissima velocità (banda dei MHz).

Ideale per analisi modale e segnali dinamici veloci.

2. Scansione Spettrale (Tunable Laser)

Laser sintonizzabile accoppiato a DSP/FPGA

Altissima risoluzione sub-picometrica (< 1 pm).

Algoritmi di Peak Detection (Centroid Computing).

Architettura industriale standard per multiplexing WDM.

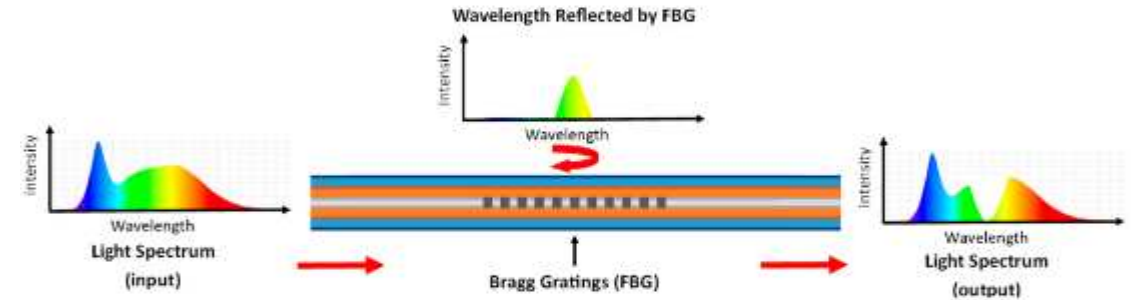


Multiplazione WDM e TDM

Avere più sensori sulla stessa linea riduce drasticamente peso, ingombri e cablaggi.

WDM (Wavelength Division Multiplexing): Sensori assegnati a finestre spettrali distinte (es. 5 nm) senza crosstalk.

TDM (Time Division Multiplexing): Impulsi ottici e misurazione del ritardo (Time-of-Flight) per grandissime distanze. Ad ogni sensore corrisponde un tempo di ritorno.





Caso Studio: Trasformatori AT

I sensori elettrici convenzionali falliscono il monitoraggio diretto a causa dei motivi precedentemente elencati.

La fibra ottica FBG, intrinsecamente isolante e immune alle interferenze (EMI), rendendo così possibile il monitoraggio degli "Hot-Spots" interni.

Parametro Critico	Sensori Elettrici Tradizionali (es. PT100, Termocoppie)	Sensori Ottici in Fibra (FBG)
Materiale del sensore/cavo	Rame (Conduttore metallico)	Silice (Dielettrico isolante perfetto)
Immunità ai disturbi EMI/RFI	Nulla (Forti correnti/tensioni indotte)	Totale (Nessuna interferenza elettromagnetica)
Punto di Installazione	Esterno (Parete della vasca o pozzetto olio superiore)	Interno (Incollaggio diretto sul rame degli avvolgimenti)
Qualità della Misura (Hot-Spot)	Indiretta, imprecisa e termicamente ritardata	Diretta, invasiva e in tempo reale
Sicurezza Elettrica	Elevato rischio di scariche o cortocircuiti se inseriti internamente	Totale sicurezza (Immunità galvanica) anche ad altissima tensione



Monitoraggio Hot-Spots in AT

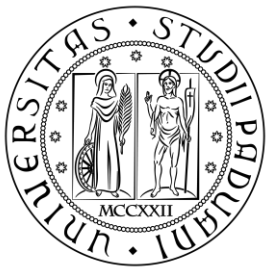
Temperatura Rilevata	Stato del Trasformatore	Azione dell'Interrogatore Ottico FBG
< 105 °C	Funzionamento Normale	Monitoraggio continuo in tempo reale
110 °C	Soglia di Allarme	Attivazione ventole di raffreddamento e pompe (ODAF)
130 °C	Soglia Critica (Trip)	Apertura interruttori AT in <10 ms per isolare il guasto
250 °C	Limite Fisico FBG	Resistenza massima del rivestimento (Poliimide/ORMONIC)

Integrazione negli Avvolgimenti

Sensori isolati con rivestimenti speciali (Poliimide/ORMONIC) resistono immersi in olio oltre i 250°C.

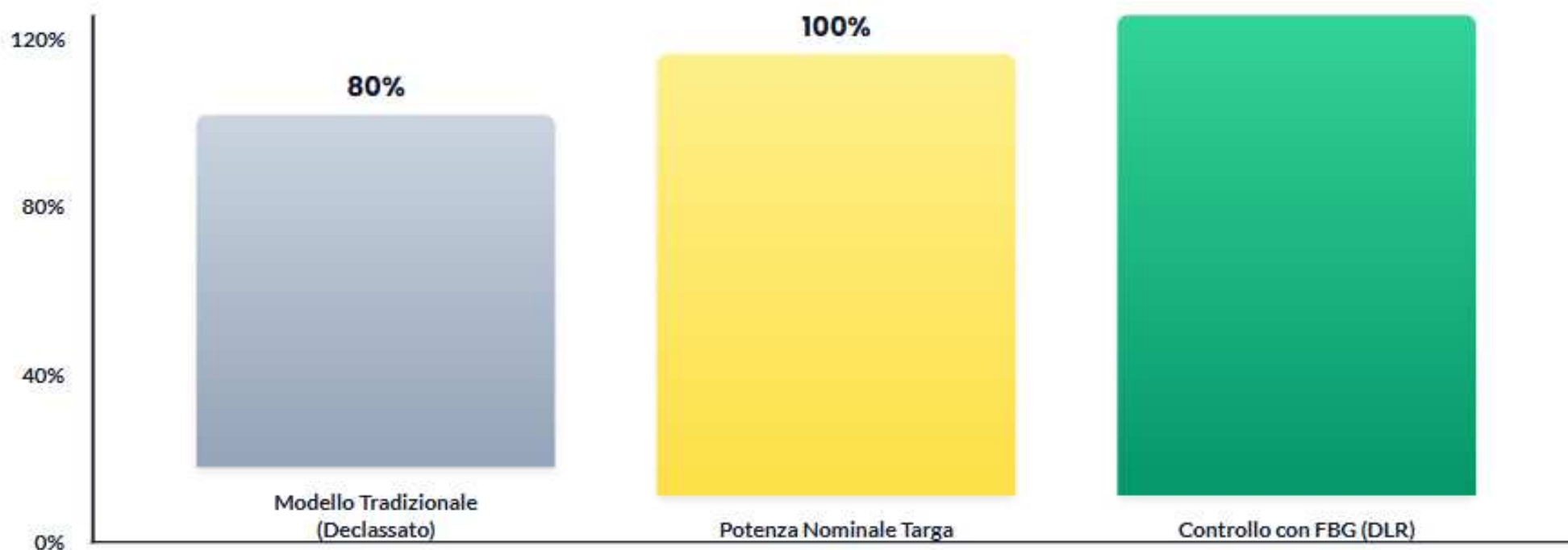
Configurazione *Loose Tube*: annulla le dilatazioni meccaniche disaccoppiando il sensore dal rame, lasciando una lettura termica pura, in modo tale da capire cosa può aver causato la variazione della lunghezza d'onda.

L'interrogatore ottico apre gli interruttori (trip) in <10ms se la temperatura supera la soglia critica di 130°C.



Dynamic Line Rating (DLR)

Vantaggi Economici: Capacità di Carico del Trasformatore (%)



i ROI eccezionale: Ridurre il margine d'incertezza permette carichi al 120% senza usura ed estende la vita dell'asset di 10-15 anni.