

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
“FEDERICO II”



Scuola Politecnica e delle Scienze di Base

Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione

Classe di Laurea in Ingegneria dell'Informazione, Classe n. L.8

*Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica*

Calibrazione di sensori FBG per il monitoraggio della  
temperatura: applicazione per l'esperimento CMS al  
CERN

**Relatore:**

Prof. Giovanni Breglio

**Correlatori:**

Dr. Francesco Fienga

Ing. Vincenzo Romano Marrazzo

**Candidato:**

Alfredo Zenga

Matr. N43001559

Anno Accademico 2019/2020

*A mamma, papà e Sara.*

# Indice

<b>Elenco delle figure</b>	IV
<b>Elenco delle tabelle</b>	VII
<b>1 Sensori a Reticolo di Bragg</b>	3
1.1 Le fibre ottiche . . . . .	3
1.1.1 Struttura e classificazione . . . . .	3
1.1.2 Funzionamento . . . . .	6
1.2 Sensoristica in fibra ottica . . . . .	8
1.2.1 Classificazione . . . . .	9
1.3 Fiber Bragg Grating . . . . .	11
1.3.1 Legame foto-termo-elastico . . . . .	13
1.3.2 Fabbricazione . . . . .	14
1.3.3 Tipologie di reticoli . . . . .	15
1.3.4 Effetto della radiazione ionizzante sui reticoli di Bragg . . . . .	16
<b>2 Utilizzo di sensori FBG per il sistema di monitoraggio I-Pipe</b>	20
2.1 Il Large Hadron Collider . . . . .	20
2.1.1 Principio di funzionamento . . . . .	21
2.2 Compact Muon Solenoid . . . . .	23
2.3 Progetto I-Pipe . . . . .	25
2.3.1 Utilizzo dei sensori FBG . . . . .	26
<b>3 Calibrazione in temperatura dei FBG</b>	35
3.1 Calibrazione dei sensori FBG . . . . .	35
3.2 Procedura di calibrazione . . . . .	38
3.2.1 Confronto fit lineare - fit cubico . . . . .	41
3.2.2 Fit con punti di temperatura e lunghezza d'onda "stabili" . . . . .	43
3.2.3 Ricalibrations . . . . .	45
3.2.4 Risposta in temperatura . . . . .	46
<b>Conclusioni</b>	48
<b>A Dati di calibrazione</b>	49
A.1 Parametri del fit lineare . . . . .	49
A.2 Parametri del fit cubico . . . . .	51
A.3 Parametri del fit delle medie dei plateau . . . . .	53

<b>B Codice MATLAB</b>	55
<b>C Curve di calibrazione</b>	63
C.1 HF-CT2-1-1 . . . . .	63
C.2 HF-CT2-1-2 . . . . .	65
C.3 HF-CT2-2-1 . . . . .	66
C.4 HF-CT2-2-2 . . . . .	68
C.5 ENDCAP 3-1 . . . . .	70
C.6 ENDCAP 3-2 . . . . .	71
C.7 ENDCAP 4-1 . . . . .	72
C.8 ENDCAP 4-2 . . . . .	74
<b>Ringraziamenti</b>	76
<b>Bibliografia</b>	77



# Elenco delle figure

1.1	Struttura di una fibra ottica. . . . .	4
1.2	Fibre ottiche SM e MM. . . . .	4
1.3	Profili di una fibra Step-index (SM e MM) e di una fibra graded-index. . .	5
1.4	Finestre di trasmissione per le fibre ottiche. . . . .	5
1.5	Legge di Snell. . . . .	6
1.6	Riflessione interna totale all'interno della fibra ottica. . . . .	6
1.7	Cono di accettazione. . . . .	7
1.8	Raggio di curvatura della fibra ottica. . . . .	7
1.9	(a) Sensori intrinseci ed (b) estrinseci. . . . .	9
1.10	Sensori puntuali. . . . .	9
1.11	Sensori quasi-distribuiti. . . . .	10
1.12	Sensori distribuiti. . . . .	10
1.13	Reticolo di Bragg in fibra e modulazione dell'indice di rifrazione. . . . .	11
1.14	Riflessione della luce nel reticolo di Bragg. . . . .	11
1.15	Rappresentazione schematica degli spettri di riflessione e trasmissione prodotti da un grating. . . . .	12
1.16	Scrittura di un FBG mediante olografia. . . . .	14
1.17	Scrittura di un FBG mediante phase mask. . . . .	15
1.18	Schematizzazione della tecnica point by point (a sinistra) e phase mask (a destra). . . . .	15
1.19	Traslazione della $\lambda_B$ in una fibra ottica fotosensibile. . . . .	17
1.20	Caratteristiche di alcuni reticoli di tipo I e II, con e senza hydrogen loading, scritti mediante laser Fs-IR. . . . .	18
2.1	LHC e i suoi esperimenti. . . . .	21
2.2	Il complesso di acceleratori. . . . .	22
2.3	Il rivelatore CMS e tutti i sottorivelatori che lo compongono. . . . .	23
2.4	Sezione trasversale di CMS. . . . .	24
2.5	Illustrazione tecnica della Beam Pipe. . . . .	25
2.6	Illustrazione tecnica della Beam Pipe, in cui è riportata anche la sezione del rivelatore CMS, e dove sono evidenziate le posizioni dei patch panel. . .	26
2.7	Sistema di monitoraggio della sezione central. . . . .	27
2.8	Sistema di monitoraggio della sezione ENDCAP. . . . .	27
2.9	Sistema di monitoraggio della sezione HF-CT2. . . . .	28
2.10	Imballaggio con i fogli di Kapton. . . . .	29
2.11	Disegno tecnico della fibra inserita nel capillare d'acciaio. . . . .	29
2.12	Layout delle fibre del sistema I-Pipe. . . . .	30

3.1	Strumentazione adottata per il processo di calibrazione (a sinistra) e fibre con sensori di temperatura (a destra).	35
3.2	Fibre all'interno della camera climatica.	36
3.3	Monitoraggio della temperatura del sensore RTD PT1000 vicino al FBG2 della sezione ENDCAP 3-1.	36
3.4	Monitoraggio della lunghezza d'onda del sensore FBG2 della sezione ENDCAP 3-1.	37
3.5	Distribuzione dei punti su plateau e transienti.	37
3.6	Sincronismo tra sensore di temperatura e interrogatore.	38
3.7	Curva di regressione lineare	40
3.8	Fit cubico.	41
3.9	Diagramma delle occorrenze per il termine cubico del fit.	42
3.10	Diagramma delle occorrenze per il termine quadratico del fit.	42
3.11	Grafico temperatura-tempo considerando solo i plateau (ENDCAP 3-1 (FBG2)).	43
3.12	Grafico lunghezza d'onda-tempo considerando solo i plateau (ENDCAP 3-1 (FBG2)).	43
3.13	Distribuzione statistica dei punti di un plateau.	44
3.14	Fit lineare ottenuto dalle medie con barre d'errore.	44
3.15	Risposta in temperatura del sensore ENDCAP 3-1 (FBG2) e del sensore RTD PT1000.	46
3.16	Risposta in temperatura del sensore ENDCAP 3-1 (FBG2) e del sensore RTD PT1000 relative al plateau di 10°C.	46
C.1	HF-CT2-1-1 (1)	63
C.2	HF-CT2-1-1 (2)	63
C.3	HF-CT2-1-1 (3)	63
C.4	HF-CT2-1-1 (4)	63
C.5	HF-CT2-1-1 (5)	64
C.6	HF-CT2-1-1 (6)	64
C.7	HF-CT2-1-1 (7)	64
C.8	HF-CT2-1-1 (8)	64
C.9	HF-CT2-1-1 (9)	64
C.10	HF-CT2-1-2 (1)	65
C.11	HF-CT2-1-2 (2)	65
C.12	HF-CT2-1-2 (3)	65
C.13	HF-CT2-1-2 (4)	65
C.14	HF-CT2-1-2 (5)	65
C.15	HF-CT2-1-2 (6)	65
C.16	HF-CT2-1-2 (7)	66
C.17	HF-CT2-1-2 (8)	66
C.18	HF-CT2-1-2 (9)	66
C.19	HF-CT2-2-1 (1)	66
C.20	HF-CT2-2-1 (2)	66
C.21	HF-CT2-2-1 (3)	67
C.22	HF-CT2-2-1 (4)	67
C.23	HF-CT2-2-1 (5)	67

C.24 HF-CT2-2-1 (6)	67
C.25 HF-CT2-2-1 (7)	67
C.26 HF-CT2-2-1 (8)	67
C.27 HF-CT2-1-1 (9)	68
C.28 HF-CT2-2-2 (1)	68
C.29 HF-CT2-2-2 (2)	68
C.30 HF-CT2-2-2 (3)	68
C.31 HF-CT2-2-2 (4)	68
C.32 HF-CT2-2-2 (5)	69
C.33 HF-CT2-2-2 (6)	69
C.34 HF-CT2-2-2 (7)	69
C.35 HF-CT2-2-2 (8)	69
C.36 HF-CT2-2-2 (9)	69
C.37 ENDCAP 3-1 (1)	70
C.38 ENDCAP 3-1 (2)	70
C.39 ENDCAP 3-1 (3)	70
C.40 ENDCAP 3-1 (4)	70
C.41 ENDCAP 3-1 (5)	70
C.42 ENDCAP 3-1 (6)	70
C.43 ENDCAP 3-1 (7)	71
C.44 ENDCAP 3-1 (8)	71
C.45 ENDCAP 3-2 (1)	71
C.46 ENDCAP 3-2 (2)	71
C.47 ENDCAP 3-2 (3)	71
C.48 ENDCAP 3-2 (4)	71
C.49 ENDCAP 3-2 (5)	72
C.50 ENDCAP 3-2 (6)	72
C.51 ENDCAP 3-2 (7)	72
C.52 ENDCAP 3-2 (8)	72
C.53 ENDCAP 4-1 (1)	72
C.54 ENDCAP 4-1 (2)	72
C.55 ENDCAP 4-1 (3)	73
C.56 ENDCAP 4-1 (4)	73
C.57 ENDCAP 4-1 (5)	73
C.58 ENDCAP 4-1 (6)	73
C.59 ENDCAP 4-1 (7)	73
C.60 ENDCAP 4-1 (8)	73
C.61 ENDCAP 4-2 (1)	74
C.62 ENDCAP 4-2 (2)	74
C.63 ENDCAP 4-2 (3)	74
C.64 ENDCAP 4-2 (4)	74
C.65 ENDCAP 4-2 (5)	74
C.66 ENDCAP 4-2 (6)	74
C.67 ENDCAP 4-2 (7)	75
C.68 ENDCAP 4-2 (8)	75

# Elenco delle tabelle

2.1	Principali caratteristiche dei FBG . . . . .	28
2.2	Sezioni della Fig.2.11. . . . .	30
2.3	Valori di lunghezza d'onda nominali dell'array e posizioni degli FBG (HF-CT2-1). . . . .	31
2.4	Valori di lunghezza d'onda nominali dell'array e posizioni degli FBG (HF-CT2-2). . . . .	32
2.5	Valori di lunghezza d'onda nominali dell'array e posizioni degli FBG (ENDCAP-1). . . . .	33
2.6	Valori di lunghezza d'onda nominali dell'array e posizioni degli FBG (ENDCAP-2). . . . .	34

# Introduzione

Questo lavoro di tesi è incentrato sulla calibrazione di sensori in fibra ottica, basati sul reticolo di Bragg (FBG), per il monitoraggio termico di una sezione dell'acceleratore di particelle Large Hadronic Collider (LHC) del CERN di Ginevra.

La sezione in questione è la Beam Pipe (BP) del Compact Muon Solenoid Experiment (CMS). La BP è una parte fondamentale dell'esperimento CMS e necessita di essere continuamente monitorata per il controllo del suo stato termico. Nelle condizioni di lavoro del CMS (e in generale di tutto l'LHC), a causa degli elevati livelli di radiazioni (fino all'ordine dei MGy) e dei campi magnetici molto grandi (dell'ordine di diversi Tesla), sensori elettronici convenzionali non sono adatti a questi scopi. Per questo tipo di utilizzo i sensori FBG costituiscono la migliore soluzione al problema viste le seguenti caratteristiche: dimensioni ridotte, alta resistenza alle radiazioni ionizzanti, forte immunità alle interferenze elettromagnetiche, possibilità di multiplexing. Tutte queste caratteristiche consentono di realizzare sistemi di monitoraggio in grado di operare in ambienti ostili come le strutture sperimentali sotterranee del CERN.

Questo lavoro di tesi si inserisce nell'upgrade del *Progetto I-Pipe*, una collaborazione tra il dipartimento DIETI (Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione) dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II", la sezione di Napoli dell'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) e il CERN, consistente nello sviluppo del sistema di monitoraggio per le camere a vuoto, i.e. *la beam pipe*, degli acceleratori di particelle. L'obiettivo principale è quello di ricavare le curve di calibrazione in temperatura dei sensori installati sulla BP per determinare la caratteristica lunghezza d'onda-temperatura. Partendo dai dati sperimentali di temperatura e lunghezza d'onda ottenuti in laboratorio, le curve di calibrazione sono state ottenute utilizzando il software MATLAB.

I parametri di calibrazione dei sensori in esame sono stati validati e, successivamente, forniti al gruppo di lavoro al CERN.

Il LHC è attualmente nella fase di *Long Shutdown 2* (LS2), ovvero la fase di fermo macchina e manutenzione che, partita nel 2019, dovrebbe concludersi presumibilmente entro il 2021. I sensori calibrati in questo lavoro di tesi sono attualmente in fase di installazione sulle sezioni della beam pipe. Nei prossimi mesi, le sezioni della beam pipe instrumentate con i sensori I-Pipe verranno installate nella caverna sperimentale di CMS.

La tesi è strutturata come spiegato di seguito.

- Nel Cap.1, dopo un'introduzione generale sulle caratteristiche delle fibre ottiche e dei sensori in fibra ottica, si sofferma l'attenzione sulle caratteristiche dei FBG, in particolare sulla dipendenza della lunghezza d'onda dalla temperatura e dalla compressione e sull'effetto che ha la radiazione ionizzante sui reticoli di Bragg.

- Nel Cap.2, partendo da una descrizione generale dell'acceleratore LHC e dell'esperimento CMS, vengono approfondite le caratteristiche del progetto I-Pipe e, in particolare, dei sensori installati sulla BP durante l'upgrade di LS2.
- Nel Cap.3 viene spiegata la procedura di calibrazione dei sensori utilizzati nel progetto in questione e viene dimostrata la validità del fitting utilizzato attraverso considerazioni statistiche.
- Nell'appendice A vengono forniti tutti i dati di calibrazione e i vari parametri statistici per tutti i sensori calibrati.
- Nell'appendice B è riportato il codice MATLAB di tutta la procedura di calibrazione e dell'ottenimento dei vari parametri.
- Nell'appendice C vengono riportati i grafici relativi ai fit lineari di tutti i sensori calibrati.

# Capitolo 1

## Sensori a Reticolo di Bragg

### 1.1 Le fibre ottiche

Le fibre ottiche sono guide d'onda dielettriche nelle quali un fascio di luce si propaga con basse perdite senza allargarsi per diffrazione [1].

Quelle maggiormente diffuse sono realizzate in vetro e trasmettono in modo molto efficiente la radiazione nella regione dell'infrarosso vicino.

Una fibra ottica si presenta proprio come un sottilissimo filo di materiale trasparente. In genere è realizzata in vetro o silicio fuso e, purché il materiale sia un dielettrico trasparente alla luce, può essere realizzata anche con materiali plastici. La sua funzione è quella di trasportare energia luminosa in modo guidato.

Sono disponibili sotto forma di cavi, sono flessibili, immuni ai disturbi elettrici e alle condizioni atmosferiche più estreme, e poco sensibili a variazioni di temperatura.

L'immunità della fibra ottica ai disturbi elettromagnetici deriva dal fatto che il materiale con cui sono realizzate è un dielettrico. Per questo motivo i campi elettromagnetici non possono indurre correnti elettriche in essa e modificare la luce che la attraversa. Questa proprietà impedisce fenomeni di interferenza (*diafonia*) e non permette di prelevare il segnale dall'esterno (*intercettazione*).

#### 1.1.1 Struttura e classificazione

La fibra ottica è composta da due strati concentrici di materiale trasparente estremamente puro: un nucleo cilindrico centrale, o **core**, e un mantello, o **cladding**, attorno ad esso.

I due strati sono realizzati con materiali con indice di rifrazione leggermente diverso: il cladding deve avere un indice di rifrazione minore (tipicamente 1,475) rispetto al core (circa 1,5), in modo che la propagazione del segnale ottico avvenga nel nucleo per successive riflessioni sulla superficie di separazione tra core e cladding [2].

Il rivestimento esterno (**coating**) che avvolge il cladding, assicura una resistenza maggiore e migliora le caratteristiche meccaniche della fibra. Spesso è possibile trovare anche uno strato protettivo aggiuntivo, chiamato **jacket**, che protegge meccanicamente la fibra.

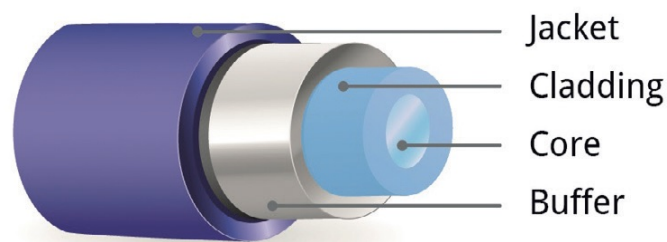


Figura 1.1. Struttura di una fibra ottica.

Le fibre ottiche più importanti per le applicazioni sono fatte con vetri che hanno come componente fondamentale l'ossido di silicio  $SiO_2$ .

Ad esempio il vetro del mantello può contenere solo  $SiO_2$ , mentre il vetro del nucleo viene preparato aggiungendo al  $SiO_2$  piccole quantità di ossido di germanio ( $GeO_2$ ) o di alluminio ( $Al_2O_3$ ), che ne aumentano l'indice di rifrazione.

Una prima classificazione delle fibre ottiche può essere effettuata in base al numero di modi<sup>1</sup> presenti nella struttura guidante, identificando le **fibre monomodali** (*SM: Single-mode*) e le **fibre multimodali** (*MM: Multi-mode*) [2].

Nelle SM si propaga solo il modo fondamentale e il diametro del core è circa pari a  $8 \div 12 \mu m$ ; quelle MM supportano più di un modo di propagazione e sono caratterizzate da un diametro del nucleo di valore più elevato, circa  $50 \div 62.5 \mu m$ . In entrambi i casi, il cladding ed il rivestimento esterno hanno un diametro di  $125 \mu m$  e di circa  $250 \mu m$ , rispettivamente.

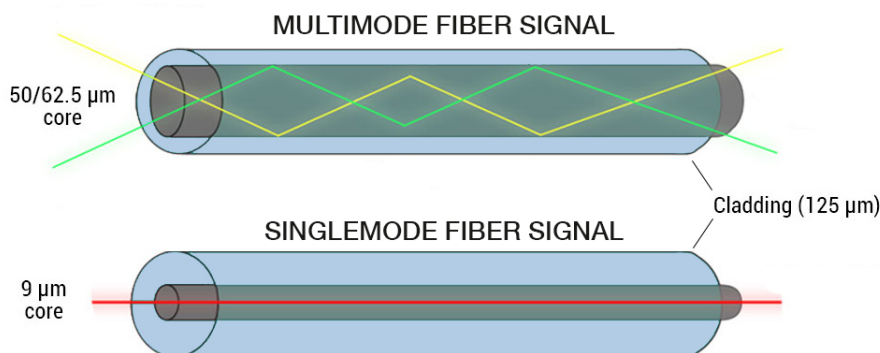


Figura 1.2. Fibre ottiche SM e MM.

È possibile, inoltre, distinguere le fibre **Step-index** e le fibre **Graded-index**. Le prime sono caratterizzate da un profilo dell'indice di rifrazione costante lungo il diametro del nucleo e da una brusca variazione in corrispondenza dell'interfaccia core-cladding. Le Graded index, invece, prevedono una variazione graduale, in genere parabolica, dell'indice

<sup>1</sup>Ogni modo di propagazione è una configurazione "semplice" di campo o onda che si propaga nella guida, mantenendosi immutata (salvo ovviamente che la guida non cambi di sezione trasversale).



di rifrazione del core, lungo la distanza radiale. In Fig.1.3 è illustrato il profilo di indice di rifrazione e l'andamento dei raggi luminosi all'interno di una fibra step-index, nei due casi SM e MM, e di una fibra graded-index.

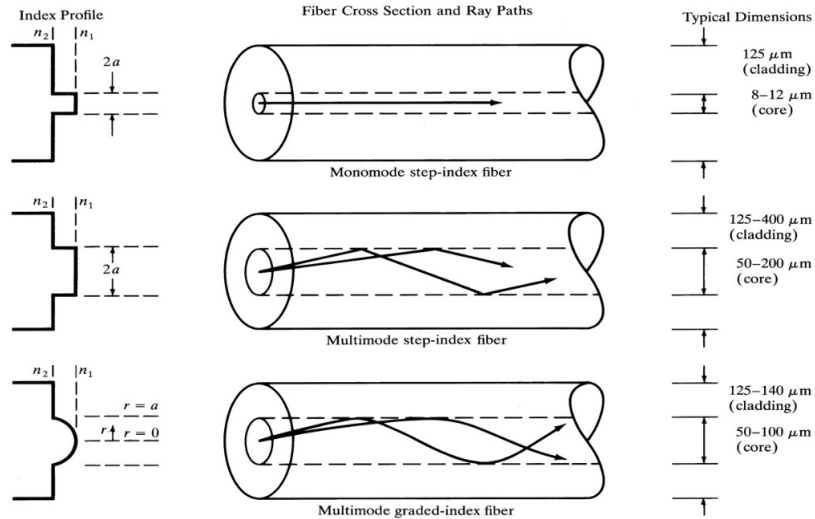


Figura 1.3. Profili di una fibra Step-index (SM e MM) e di una fibra graded-index.

La larghezza di banda del segnale accoppiato in fibra, ossia l'intervallo di frequenza in cui opera il segnale, può essere molto grande; va tuttavia considerato il fenomeno della *dispersione* e il *coefficiente di attenuazione* della fibra (in particolare il suo andamento in frequenza) affinché i raggi si propaghino senza perdere eccessiva potenza e non subiscano distorsioni. Risulta così possibile definire delle *finestre di trasmissione* che rappresentano gli intervalli di lunghezza d'onda,  $\lambda$ , entro i quali si hanno i minimi di attenuazione nel trasferimento del segnale. Le tre principali finestre di trasmissione impiegate per le fibre ottiche sono di 850 nm, 1300 nm e 1550 nm. La scelta di tali finestre è di facile comprensione visualizzando la Fig.1.4, dove viene riportato l'andamento della perdita di segnale in funzione della lunghezza d'onda. Le tre finestre di trasmissione corrispondono ai tre minimi della funzione.

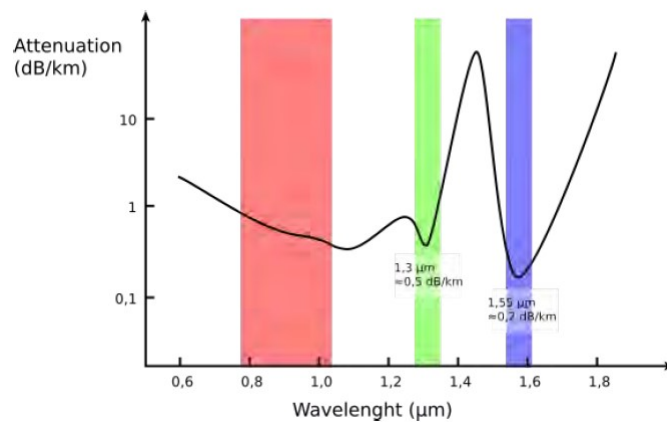


Figura 1.4. Finestre di trasmissione per le fibre ottiche.

### 1.1.2 Funzionamento

Il fenomeno della propagazione della luce all'interno delle fibre ottiche, essendo i fenomeni di diffrazione trascurabili, può essere studiato nell'ipotesi di validità delle leggi che regolano l'ottica geometrica. Un raggio luminoso che incide su una superficie di interfaccia tra due mezzi con indice di rifrazione differenti, con  $n_1 > n_2$ , viene in parte riflesso e in parte trasmesso secondo la *legge di Snell* [1]:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \quad (1.1)$$

dove  $\alpha$  è l'angolo di incidenza del raggio rispetto alla normale alla superficie di incidenza e  $\beta$  è l'angolo che il raggio rifratto forma con la stessa normale nel secondo mezzo.



Figura 1.5. Legge di Snell.

Quando la luce passa da un materiale con indice di rifrazione maggiore a uno minore, così come avviene nelle fibre ottiche, esiste un angolo limite  $\alpha = \alpha_{cr}$  in corrispondenza del quale  $\beta = 90^\circ$ , ossia non vi è più la presenza del raggio rifratto.

Per la determinazione dell'angolo limite vale la seguente relazione:

$$\alpha_{cr} = \arcsin \left( \frac{n_2}{n_1} \right). \quad (1.2)$$

In corrispondenza di un angolo di incidenza maggiore o uguale a  $\alpha_{cr}$  avviene il fenomeno della **riflessione interna totale**.

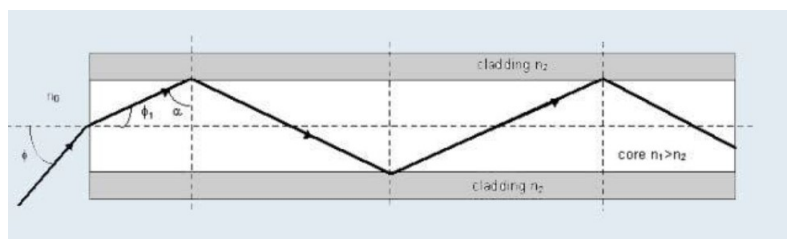


Figura 1.6. Riflessione interna totale all'interno della fibra ottica.

La trasmissione della luce attraverso una fibra è quindi basata sul fenomeno della riflessione totale interna che si presenta quando la luce incide obliquamente sull'interfaccia tra due mezzi di diverso indice di rifrazione, con un angolo più grande dell'angolo critico. Risulta pertanto essenziale trasmettere la luce all'interno della fibra in modo che l'angolo di incidenza interno verifichi la suddetta condizione e il segnale, rimanendo confinato nel nucleo (core), possa propagarsi per successive riflessioni fino a raggiungere il rivelatore. I raggi parzialmente rifratti, infatti, perdono potenza ad ogni riflessione e quindi scompaiono rapidamente.

Considerando un raggio proveniente dall'esterno della fibra, il massimo angolo di incidenza che garantisce che la luce rifratta subisca il fenomeno della riflessione totale interna viene definito **angolo di accettazione** ( $\theta_a$ ).

L'insieme di tutte le possibili traiettorie incidenti aventi angolo inferiore o uguale a quello di accettazione, costituisce il **cono di accettazione**, mostrato graficamente in Fig.1.7.

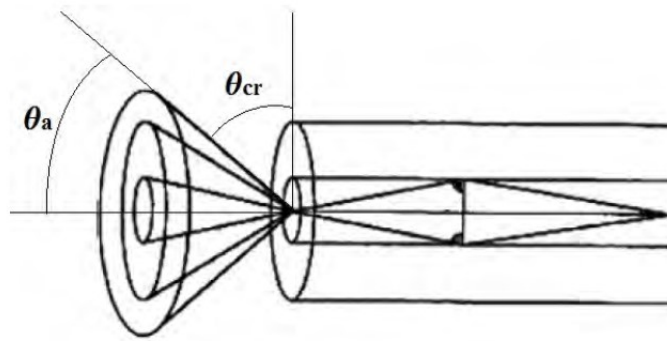


Figura 1.7. Cono di accettazione.

Necessariamente durante l'utilizzo di fibre ottiche bisogna prestare attenzione ai raggi di curvatura, poiché raggi di curvatura ridotti possono generare angoli incidenti inferiori a quello critico, come mostrato in Fig.1.8, provocando perdite di potenza.

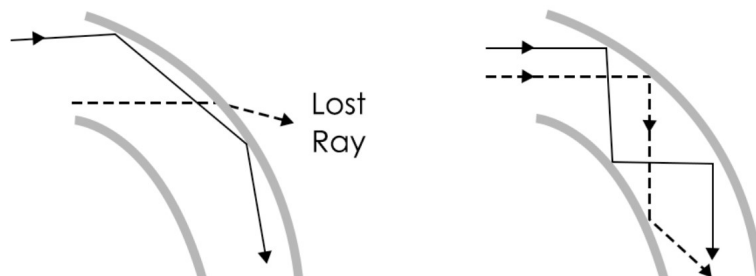


Figura 1.8. Raggio di curvatura della fibra ottica.

## 1.2 Sensoristica in fibra ottica

Le fibre ottiche sono universalmente conosciute come un mezzo di trasmissione a grande ampiezza di banda per le telecomunicazioni. Meno noto è che negli stessi anni in cui si cominciava a proporre l'impiego di fibre ottiche come mezzo di trasmissione, ne veniva anche proposto l'utilizzo come sensori [2].

Negli ultimi 25 anni, la tecnologia dei sensori in fibra ottica ha assunto un ruolo dominante in diversi campi di applicazione. I **sensori in fibra ottica** (*FOS*) offrono diversi vantaggi rispetto ai sensori elettronici o meccanici.

I FOS sono immuni alle interferenze elettromagnetiche e l'elemento sensibile (la fibra ottica) è molto economico. Inoltre si tratta di una tecnologia a basso costo di esercizio, molto flessibile, compatibile con la moltiplicazione dei sensori e ad elevata affidabilità anche in ambienti difficili.

I sensori in fibra ottica possono essere interrogati facilmente a lunga distanza e possono offrire un'elevata copertura spaziale con risoluzione fino a pochi centimetri. Queste caratteristiche rendono la tecnologia delle fibre ottiche molto competitiva, in particolare per le applicazioni dove è richiesta un'elevata robustezza, una grande copertura geografica e/o un'elevata densità di punti di misura. Il monitoraggio geotecnico per applicazioni geo-idrologiche e il monitoraggio di strutture sono tra queste applicazioni. Storicamente il fattore chiave per la penetrazione del mercato della tecnologia dei FOS sono state le esigenze di monitoraggio dell'industria petrolifera e del gas, in particolare per le piattaforme in mare aperto. Oggi sono proposti sensori in fibra ottica per quasi tutte le misurazioni geofisiche e per alcuni di essi sono disponibili commercialmente soluzioni mature.

La fibra ottica, in quanto mezzo di trasmissione, è soggetta a variazioni geometriche o/e ottiche a seconda della perturbazione alla quale è sottoposta.

Solitamente, nel campo delle telecomunicazioni, si cerca di minimizzare tali effetti al fine di ottenere una trasmissione e una ricezione del segnale quanto più affidabile possibile.

Nel campo dei sensori a fibra ottica, invece, la sensibilità della fibra alle perturbazioni esterne viene deliberatamente incrementata, in modo che la variazione della radiazione ottica possa essere usata come misura della perturbazione esterna.

Il principio di funzionamento di un sensore in fibra ottica è basato sulla modulazione, per mezzo di un trasduttore, di uno o più parametri della luce che si propaga nel sistema ottico, come intensità, lunghezza d'onda, polarizzazione o fase, causando una variazione delle caratteristiche del segnale ottico ricevuto dal rivelatore. Quest'ultimo converte la variazione del segnale ottico in un segnale elettrico, rendendolo quindi utilizzabile per elaborazioni successive.

### 1.2.1 Classificazione

Una prima distinzione tra sensori fotonici si basa sul ruolo della fibra ottica all'interno del dispositivo [2],[3]:

- **sensori intrinseci**, in cui la fibra ottica costituisce anche l'elemento sensibile del dispositivo. In questo caso la modulazione di una o più proprietà della luce dovuta al fenomeno da misurare avviene direttamente nella fibra ottica;
- **sensori estrinseci**, in cui la fibra ottica ha il compito di guidare l'informazione dal/al sensore.

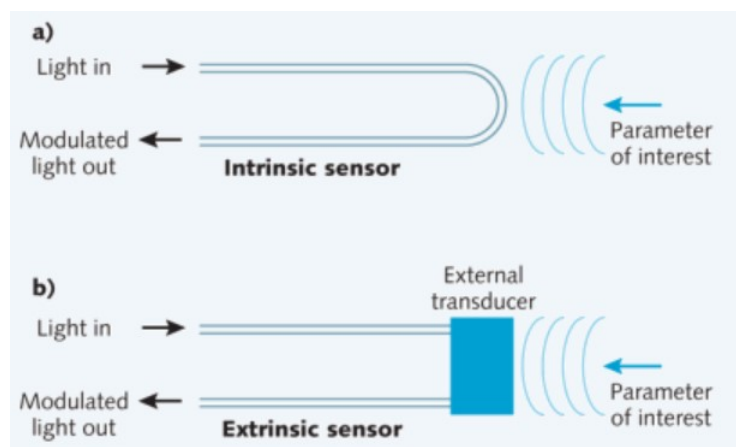


Figura 1.9. (a) Sensori intrinseci ed (b) estrinseci.

I sensori possono essere distinti anche in:

- **puntuali**, i quali permettono la misurazione di una grandezza su un'area ridotta;

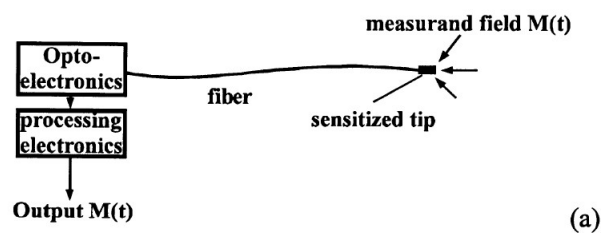


Figura 1.10. Sensori puntuali.

- **multipunto o quasi-distribuiti**, in cui la misurazione avviene in un'area più ampia (ponendo in serie elementi concentrati);

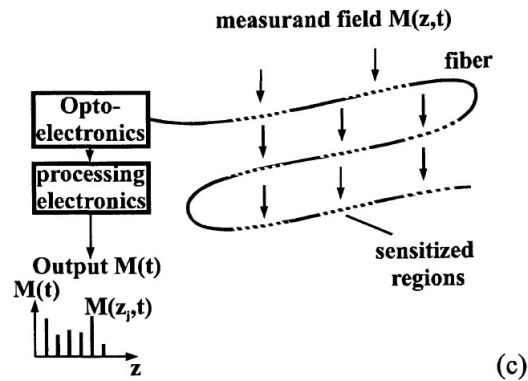


Figura 1.11. Sensori quasi-distribuiti.

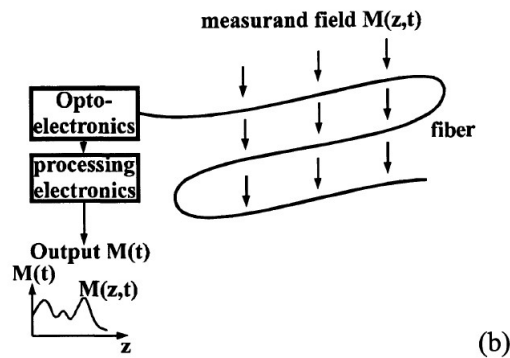


Figura 1.12. Sensori distribuiti.

- **distribuiti**, che permettono di eseguire la misura su aree molto ampie con continuità, sfruttando effetti a cui è soggetto naturalmente il materiale della fibra (la silice).

Ad esempio, i **sensori FBG** (*Fiber Bragg Grating*) e **LPG** (*Long period grating*) effettuano misure puntuali o quasi-distribuite e sono caratterizzate dall'aver molti punti di misura sulla stessa fibra.

I **sensori basati su fenomeni di scattering** (*Reyleigh, Brillouin o Raman*), invece, effettuano misurazioni distribuite su tutta la lunghezza della fibra.

I **sensori interferometrici** effettuano una misurazione integrale lungo uno o più tratti di fibra.

### 1.3 Fiber Bragg Grating

I **reticoli di Bragg**, *Fiber Bragg Grating (FBG)*, vengono realizzati mediante un'opportuna modulazione locale dell'indice di rifrazione del core di una fibra ottica fotosensibile, effettuata per mezzo di una sorgente energetica, come ad esempio i raggi UV [4].

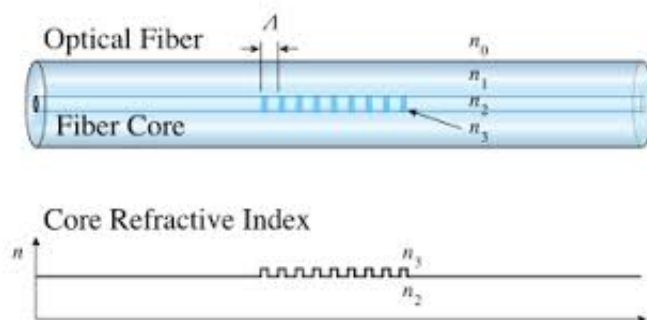


Figura 1.13. Reticolo di Bragg in fibra e modulazione dell'indice di rifrazione.

A causa della periodicità dell'indice di rifrazione nel nucleo della fibra ottica la luce che si propaga nel reticolo viene riflessa parzialmente da ogni successiva perturbazione dell'indice di rifrazione. Normalmente la quantità di luce riflessa è molto piccola, tranne quando la luce ha una lunghezza d'onda nella regione della *lunghezza d'onda di Bragg*  $\lambda_B$ :

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad , \quad (1.3)$$

dove  $n_{eff}$  è l'indice di rifrazione efficace del modo propagante e  $\Lambda$  è il periodo del reticolo.

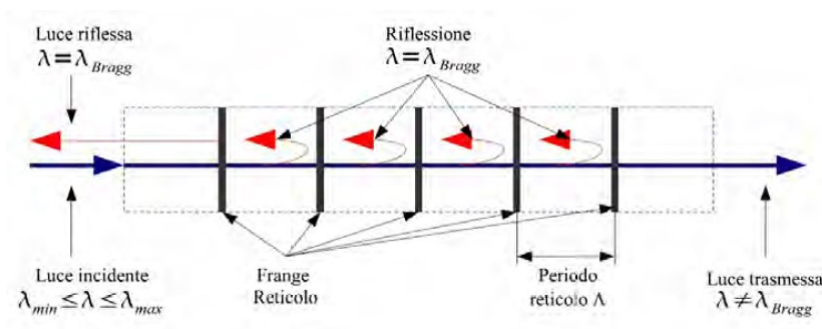


Figura 1.14. Riflessione della luce nel reticolo di Bragg.

Alla lunghezza d'onda di Bragg, ogni riflessione dalle successive perturbazioni dell'indice è in fase con quella successiva. Le riflessioni si sommano in modo coerente e si ottiene un forte segnale di luce riflessa.

La riflettività di un reticolo può avvicinarsi al 100% alla lunghezza d'onda di Bragg, mentre la luce alle lunghezze d'onda più lunghe o più corte della lunghezza d'onda di Bragg passa attraverso il reticolo con trascurabile perdita.

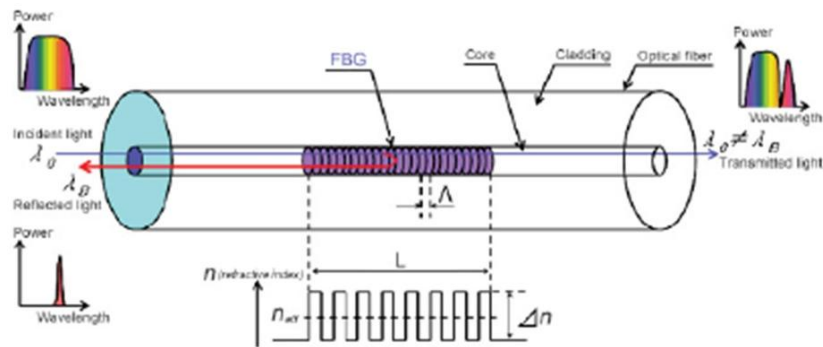


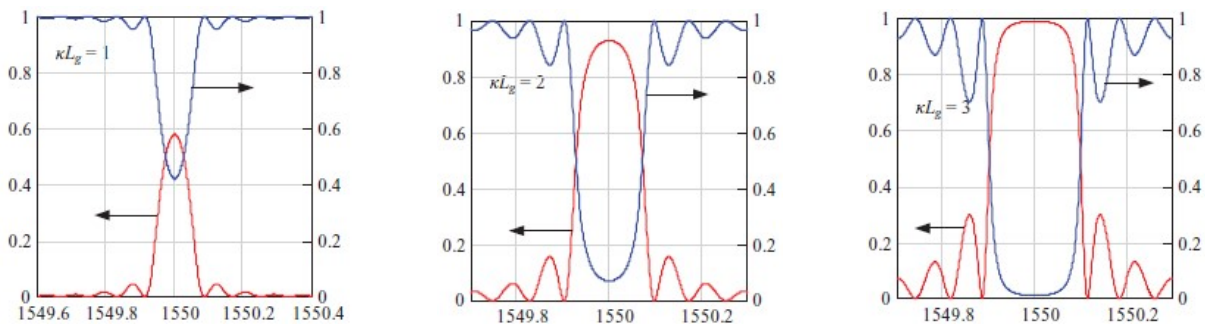
Figura 1.15. Rappresentazione schematica degli spettri di riflessione e trasmissione prodotti da un grating.

Ricorrendo alla teoria dei modi accoppiati, si possono ricavare informazioni quantitative sull'efficienza di diffrazione e sulla dipendenza spettrale dei reticoli. Si giunge ad una formula per la riflettività che è

$$R = \frac{\sinh^2(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2}L)}{\cosh^2(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2}L) - \frac{\sigma^2}{\kappa^2}}, \quad (1.4)$$

dove  $\kappa$  è il *coefficiente di accoppiamento "puntuale"* (dipende dalla lunghezza d'onda operativa e dall'ampiezza della perturbazione dell'indice di rifrazione  $\Delta n$ ),  $L$  è la lunghezza del reticolo e  $\sigma$  è il coefficiente di accoppiamento medio su un periodo.

Di seguito si mostrano alcuni grafici di riflettività/trasmittività del reticolo per tre diversi valori del parametro  $\kappa L$ :





### 1.3.1 Legame foto-termo-elastico

L'equazione di Bragg implica che la lunghezza d'onda  $\lambda_B$  subisca una variazione ad ogni alterazione delle proprietà fisiche o meccaniche del reticolo.

L'applicazione di una deformazione provocherà, ad esempio, una variazione del passo del reticolo e/o dell'indice di rifrazione effettivo attraverso effetti ottici. In modo analogo il reticolo risponderà diversamente se soggetto a modifiche della temperatura.

Per questo motivo i reticoli di Bragg possono essere utilizzati come sensori per la misura di deformazione e temperatura attraverso la variazione della lunghezza d'onda di Bragg. L'intensità della risposta del sensore dipende dalla lunghezza del reticolo di Bragg e quindi dal numero di variazioni dell'indice di rifrazione all'interno del reticolo.

Ora, a partire dall'equazione di Bragg ( $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ ), si ricava come varia  $\lambda_B$  al variare dei parametri da cui dipende differenziando l'equazione [3]:

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{1}{\lambda_B} \frac{\partial \lambda_B}{\partial T} dT + \frac{1}{\lambda_B} \frac{\partial \lambda_B}{\partial L} dL \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial \lambda_B}{\partial T} = 2n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + 2\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \quad \frac{\partial \lambda_B}{\partial L} = 2n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial L} + 2\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} \quad (1.6)$$

Ora si sostituisce all'interno di queste l'equazione di Bragg:

$$\frac{\partial \lambda_B}{\partial T} = \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \frac{\lambda_B}{\Lambda} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \frac{\lambda_B}{n_{eff}} \quad \frac{\partial \lambda_B}{\partial L} = \frac{\partial \Lambda}{\partial L} \frac{\lambda_B}{\Lambda} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} \frac{\lambda_B}{n_{eff}} \quad (1.7)$$

Quindi sostituendo queste due all'interno della prima equazione si ottiene

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \underbrace{\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} dT + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial L} dL}_{\frac{d\Lambda}{\Lambda}} + \underbrace{\frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} dT + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} dL}_{\frac{dn_{eff}}{n_{eff}}} \quad (1.8)$$

L'equazione precedente, utilizzando le formule dell'effetto elettro-ottico<sup>2</sup> e di quello elasto-ottico<sup>3</sup>, può essere riscritta come segue:

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T + (1 - \rho_e)\epsilon_z \quad (1.9)$$

dove  $\alpha$  rappresenta l'*espansione termica* della silice,  $\xi$  rappresenta il *coefficiente termo-ottico* (il quale sancisce la dipendenza dell'indice di rifrazione dalla temperatura),  $\rho_e$  rappresenta il *coefficiente foto-elastico* (che rappresenta la variazione dell'indice di rifrazione a causa della deformazione) e  $\epsilon_z$  è la deformazione longitudinale lungo il reticolo.

<sup>2</sup>Si chiama effetto elettro-ottico la modificazione dell'indice di rifrazione di un materiale sotto l'azione di un campo elettrico esterno. Nei casi in cui la variazione dell'indice di rifrazione  $\Delta n$  è proporzionale al campo elettrico applicato,  $E$ , l'effetto elettro-ottico prende il nome di *effetto Pockels*.

<sup>3</sup>L'effetto elasto-ottico rappresenta il cambio della costante dielettrica e dell'indice di rifrazione in funzione di un campo di pressioni applicate esternamente.

### 1.3.2 Fabbricazione

In questo paragrafo si analizzano le principali tecniche di fabbricazione di FBG [5].

#### Olografia

Con questa tecnica un singolo fascio laser UV è diviso in due componenti, che vengono successivamente ricombinate sulla fibra producendo il pattern di interferenza che realizzerà il reticolo (Fig.1.16).

Il *metodo olografico* è molto flessibile perché permette di regolare facilmente l'angolo tra i due fasci in modo da creare reticoli con differenti periodi e quindi FBG a differenti lunghezze d'onda. Tuttavia lo svantaggio di questo metodo è che la posizione e la spaziatura tra le frange di interferenza è molto sensibile all'allineamento ottico del sistema. Inoltre il mantenimento di un adeguato contrasto tra frange richiede una notevole stabilità meccanica e un buon isolamento dalle vibrazioni dell'ambiente.

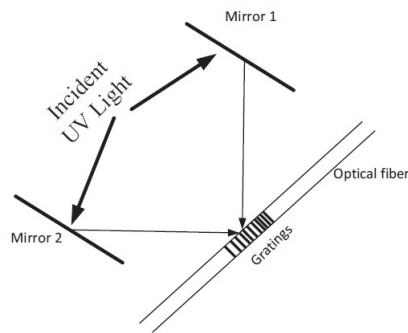


Figura 1.16. Scrittura di un FBG mediante olografia.

#### Phase mask

La *phase mask* è costituita da una lastra piana di vetro di silice che è trasparente all'ultravioletto. Su una delle superfici piate viene incisa una struttura di rilievo superficiale periodica unidimensionale usando tecniche fotolitografiche [6]. La forma del motivo periodico si avvicina a un'onda quadra per periodi più lunghi, mentre per periodi più corti tende ad essere quasi-sinusoidale.

La luce ultravioletta, che è incidente perpendicolarmente alla phase mask, passa attraverso di essa e viene diffratta dalle corrugazioni periodiche della maschera di fase. Normalmente, la maggior parte della luce diffratta è contenuta negli ordini diffratti 0, 1 e -1 ma la maschera di fase e la profondità delle ondulazioni sono progettate in modo da sopprimere la diffrazione nell'ordine zero.

Questi fasci creano un pattern di interferenza nella regione in cui si sovrappongono, scrivendo così l'FBG sul nucleo fotosensibile della fibra. Il periodo dell'FBG sarà la metà di quello della phase mask [5].

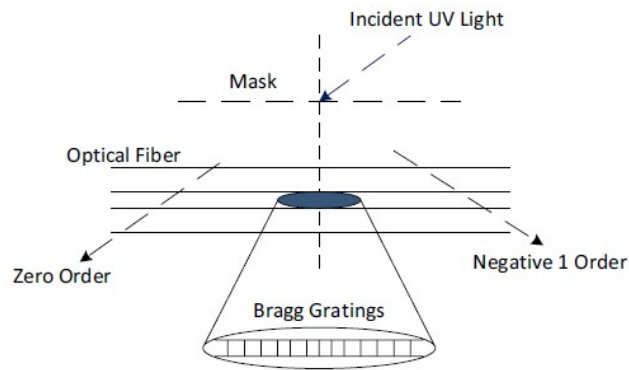


Figura 1.17. Scrittura di un FBG mediante phase mask.

### Point by point

Con questa tecnica un singolo raggio UV viene usato per scrivere un reticolo in una fibra, punto per punto. Il laser ha un fascio ristretto uguale al periodo del reticolo.

Nella Fig.1.18 si mettono a confronto le tecniche *phase mask* e *point by point*:

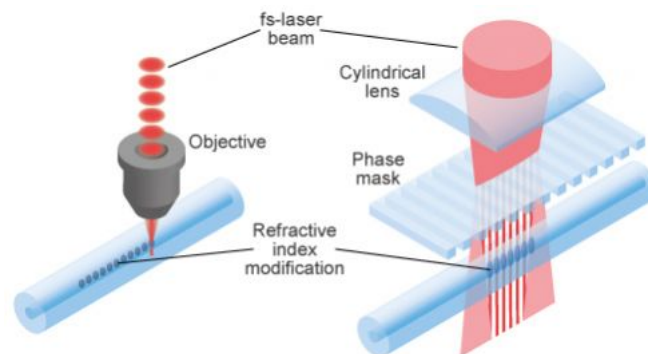


Figura 1.18. Schematizzazione della tecnica point by point (a sinistra) e phase mask (a destra).

### 1.3.3 Tipologie di reticoli

Il termine “tipo” è, in questo contesto, riferito al meccanismo fotosensibile con cui le frange del reticolo vengono create nella fibra. I differenti metodi di creazione delle frange del reticolo hanno un effetto significativo sugli attributi che caratterizzeranno il mezzo ottico, in particolare sulla risposta in temperatura [6].

- I **reticoli di tipo I** o **standard** si formano in una fibra standard delle telecomunicazioni (silice con nucleo drogato al germanio) mediante un unico processo di assorbimento di fotoni UV. La radiazione UV interagisce solo coi difetti introdotti dal germanio, detti centri ossigeno-deficienti. Questo tipo di reticoli mostra una variazione positiva dell'indice di rifrazione e un decadimento in riflettività che dipende

dalla temperatura.

La fotosensibilità richiesta per la formazione del Tipo I può essere incrementata attraverso un processo chiamato *hydrogen loading* [8] (arricchimento di idrogeno), in cui la fibra ottica è esposta ad idrogeno ad alta pressione a temperatura ambiente.

- I **reticoli di tipo IA** differiscono da quelli di tipo I per un tempo di esposizione maggiore ai raggi UV. Ciò comporta, evidentemente, una diversa risposta alle radiazioni. Infatti, dai risultati sperimentali si denota chiaramente che gli FBGs di tipo IA sono caratterizzati da una sensibilità maggiore alle radiazioni. Questi reticoli mostrano uno spostamento della  $\lambda_B$  verso lunghezze d'onda più grandi.
- I **reticoli di Tipo II** sono scritti mediante un processo di *ionizzazione multifotonica* (diversi fotoni con energia al di sotto della soglia di ionizzazione possono combinare le loro energie per ionizzare un atomo), per mezzo di un singolo impulso di sorgente laser UV ad una intensità di picco tale da superare la soglia di danneggiamento della silice. Per questo motivo sono detti *damage gratings*. Possono raggiungere una riflettività del 99%.
- I **reticoli di tipo IIA** sono caratterizzati da una concentrazione di atomi di Germanio più alta, ma, in contrasto con i risultati ottenuti per gli FBGs di tipo I, questi possiedono una resistenza alle radiazioni più alta. Nel caso di fibre drogate solo con atomi di Germanio, il picco della lunghezza d'onda di Bragg si sposta verso il blu [9], quindi verso lunghezze d'onda minori.
- Gli **FBG realizzati con laser al femtosecondo** sono realizzati mediante sorgenti laser al femtosecondo ed è possibile sfruttare sia sorgenti UV che IR. L'fs-laser produce modulazioni locali dell'indice di rifrazione nel core della fibra tramite il processo di scrittura *point by point*. Il processo è indipendente dal materiale con cui è realizzata la fibra, il che rende non necessario il drogaggio. Oltre la soglia di intensità di ionizzazione  $I_{th}$ , il processo porta a fusione localizzata, compattazione del materiale e formazione di vuoti che causano un cambio d'indice di rifrazione, stabile fino al raggiungimento della temperatura di transizione del materiale.

### 1.3.4 Effetto della radiazione ionizzante sui reticoli di Bragg

Il sistema di sensori in fibra ottica a reticolo di Bragg di cui tratta questo lavoro di tesi è installato all'interno dell'acceleratore di particelle LHC del CERN, un ambiente con altissimo livello di radiazioni. Per questo motivo è bene osservare come si comportano i reticoli di Bragg quando investiti da raggi  $\gamma$ . Il comportamento di questi ultimi differisce a seconda del modello con cui il reticolo è stato fabbricato.

È stato osservato che l'effetto principale dei raggi  $\gamma$  sui reticoli è quello di spostare  $\lambda_B$  verso lunghezze d'onda più alte.

Nel caso di sistemi ottici basati sulla modulazione dell'indice di rifrazione, come i reticoli di Bragg, si ha che l'indice di rifrazione cambia per effetto dei raggi  $\gamma$ , il che può influenzare il comportamento dei dispositivi.

La sensibilità alle radiazioni ionizzanti può essere quantificata, in generale, con uno spostamento della lunghezza d'onda di Bragg  $\lambda_B$ , una variazione della larghezza del lobo

principale del segnale riflesso e in una modifica d'ampiezza di quest'ultimo. La spostamento della lunghezza d'onda è considerato l'effetto più interessante e importante [10].

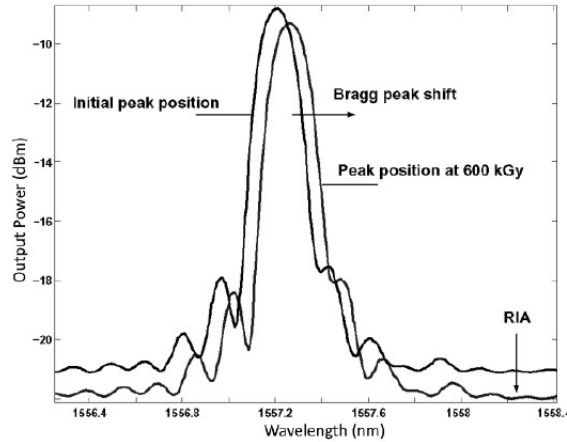


Figura 1.19. Traslazione della  $\lambda_B$  in una fibra ottica fotosensibile.

È possibile comprendere meglio l'effetto della radiazione ionizzante con un esempio. Il funzionamento di un sensore di temperatura basato su FBG si basa sulla relazione lineare tra temperatura e lunghezza d'onda di Bragg<sup>4</sup>:

$$\lambda_B(T) = \lambda_B(T_0) + \alpha(T - T_0) \quad , \quad (1.10)$$

dove  $T_0$  è la temperatura di riferimento e  $\alpha$  è il coefficiente di sensibilità alla temperatura. Lo spostamento relativo della lunghezza d'onda di Bragg, è dato da<sup>5</sup>

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{d\Lambda}{\Lambda} + \frac{dn_{eff}}{n_{eff}} \quad , \quad (1.11)$$

dove  $dn_{eff}$  e  $d\Lambda$  sono rispettivamente le variazioni dell'indice di rifrazione efficace e del periodo del reticolo indotte dalle radiazioni.

Per un FBG con  $\lambda_B \approx 1550nm$ , una variazione dell'indice di rifrazione di  $\sim 10^{-4}$  corrisponde ad uno spostamento della lunghezza d'onda di Bragg di  $\sim 100pm$ .

Uno spostamento della lunghezza d'onda di questa entità è tale da compromettere le prestazioni dei sensori basati su FBG.

In Fig.1.19 si può osservare un esempio di spostamento della lunghezza d'onda di Bragg dovuto ad una radiazione di 600 kGy<sup>6</sup>.

La traslazione della lunghezza d'onda centrale, però, non è l'unico effetto osservabile in

<sup>4</sup>È possibile ricavare la (1.10) dalla (1.9) considerando il primo termine del secondo membro per piccole variazioni di temperatura.

<sup>5</sup>Questa formula è stata dimostrata all'interno del paragrafo 1.3.1.

<sup>6</sup>Il gray (Gy), che equivale a joule su chilogrammo (J/kg), è l'unità di misura della dose assorbita nel SI, corrisponde alla quantità di radiazione necessaria per depositare 1 joule di energia su 1 chilogrammo di ogni tipo di materia.

presenza di una radiazione ionizzante. Infatti, in base al tipo di reticolo considerato, si possono manifestare altre reazioni.

- Il comportamento dei *reticoli di tipo I* dipende fortemente dai processi post-fabbricazione che vengono eseguiti su di essi: la lunghezza d'onda di Bragg di un FBG di tipo I, iscritto in una fibra standard, trattato termicamente, idrogenato e drogato con alte concentrazioni di germanio subisce una variazione considerevole in base alla dose di radiazione assorbita, così come accade per i reticoli di tipo IA. I reticoli di tipo I e IA, quindi, possono essere adoperati in ambienti radiativi solo se opportunamente rivestiti, in maniera tale da ridurre la sensibilità alle radiazioni.
- I *reticoli di tipo II e IIA* invece sono più resistenti ai raggi  $\gamma$  e sono caratterizzati da una stabilità termica più elevata rispetto ai reticoli di tipo I; essi, però, presentano una resistenza meccanica ridotta, ovvero una fragilità maggiore del reticolo.
- L'iscrizione degli FBGs per mezzo di *laser al femtosecondo* permette l'utilizzo di fibre molto resistenti alle radiazioni, a scapito di elevati costi di produzione. Nella Fig.1.20, sono stati raggruppati alcuni risultati, mettendo in risalto le differenze fra le diverse fibre utilizzate per vari tipi di FBG iscritti mediante laser IR al femtosecondo e due FBG di tipo I, con e senza hydrogen loading. Nel caso specifico, lo spostamento della lunghezza d'onda di Bragg è stato ottenuto irradiando raggi  $\gamma$  con un dose da 0 a 100 kGy a temperatura ambiente. Si può notare subito che l'innesto di idrogeno ha un effetto molto forte sulla sensibilità alle radiazioni del FBG, che subisce un incremento. Gli FBG di tipo I senza hydrogen loading, sia realizzati con fascio UV che IR, hanno uno spostamento di  $\lambda_B$  identico, mentre gli FBG iscritti in fibre che presentano idrogeno mostrano caratteristiche differenti. I tipi I-IR e II-IR con hydrogen loading sono più sensibili alle radiazioni.

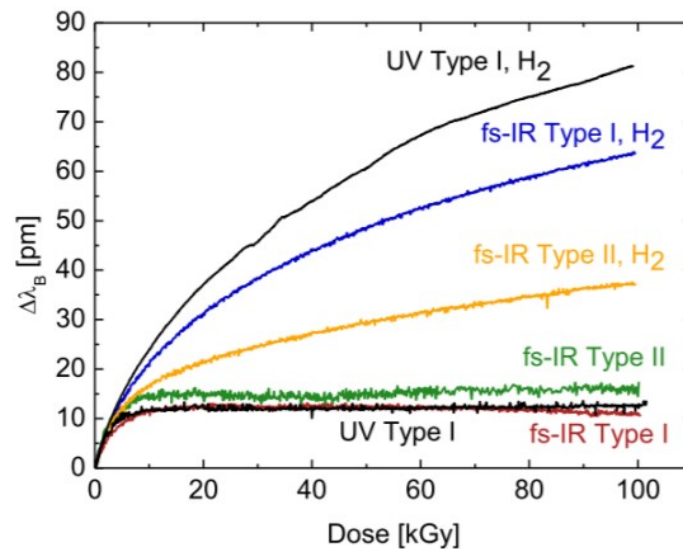


Figura 1.20. Caratteristiche di alcuni reticoli di tipo I e II, con e senza hydrogen loading, scritti mediante laser Fs-IR.

È emerso quindi che le più sensibili alle radiazioni ionizzanti sono le fibre ottiche drogate con germanio e poi sottoposte alla tecnica di *hydrogen loading*, mentre la pre-irradiazione può aumentare la resistenza alle radiazioni.

I reticoli che si sono dimostrati meno sensibili agli effetti dei raggi  $\gamma$  sono quelli fabbricati mediante la scrittura con radiazione laser al femtosecondo, il che li rende i più adatti a lavorare in ambienti con livelli di radiazione molto elevati<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup>Per questo motivo, infatti, questa è la tipologia di sensori utilizzata all'interno del progetto I-Pipe.

# Capitolo 2

## Utilizzo di sensori FBG per il sistema di monitoraggio I-Pipe

### 2.1 Il Large Hadron Collider

Il **Large Hadron Collider** (LHC) è l'acceleratore di particelle più grande e potente esistente sulla Terra, per mezzo del quale è possibile accelerare adroni (protoni e ioni pesanti) fino al 99.9999991% della velocità della luce, e farli poi collidere con un'energia che può raggiungere i 13 TeV nel centro di massa[11]. Si trova nello stesso tunnel realizzato in precedenza per l'acceleratore *Large Electron Positron collider* (LEP) [12].

Nell'acceleratore viaggiano due fasci di particelle, i quali vengono accelerati mediante una serie di acceleratori prima di entrare all'interno del LHC, e la loro traiettoria viene regolata mediante magneti superconduttori di Niobio e Titanio che producono un campo magnetico di circa 8 Tesla. Questi due fasci si propagano in tubi a vuoto viaggiando in direzioni opposte; vengono poi portati a collidere in quattro punti del LHC, intorno ai quali sono stati costruiti 4 esperimenti:

- **ALICE** (*A Large Ion Collider Experiment*) [13]: studia collisioni tra ioni pesanti Pb-Pb ad un'energia nel centro di massa di 2.76 TeV;
- **ATLAS** (*A Toroidal LHC Apparatus*) [14]: un esperimento multi-purpose, ovvero di carattere generale, progettato per ricostruire il maggior numero possibile di processi fisici e per la ricerca di nuove particelle;
- **CMS** (*Compact Muon Solenoid*) [15]: l'altro esperimento multi-purpose del LHC insieme ad ATLAS. La sua peculiarità è il potente campo magnetico e l'elevata capacità di ricostruzione del leptone muonico. Il presente lavoro di tesi si inquadra nell'ambito di questo esperimento;
- **LHCb** (*Large Hadron Collider beauty*) [16]: ha principalmente lo scopo di capire l'asimmetria tra materia e antimateria.

La disposizione dei rivelatori è raffigurata nella Figura 2.1. Si tratta di grandi apparati costituiti da numerosi sottomoduli che operano intorno al punto in cui i fasci collidono. Nelle collisioni vengono prodotte, grazie alla trasformazione di una parte dell'altissima energia in massa, numerosissime particelle le cui caratteristiche vengono misurate dai rivelatori.



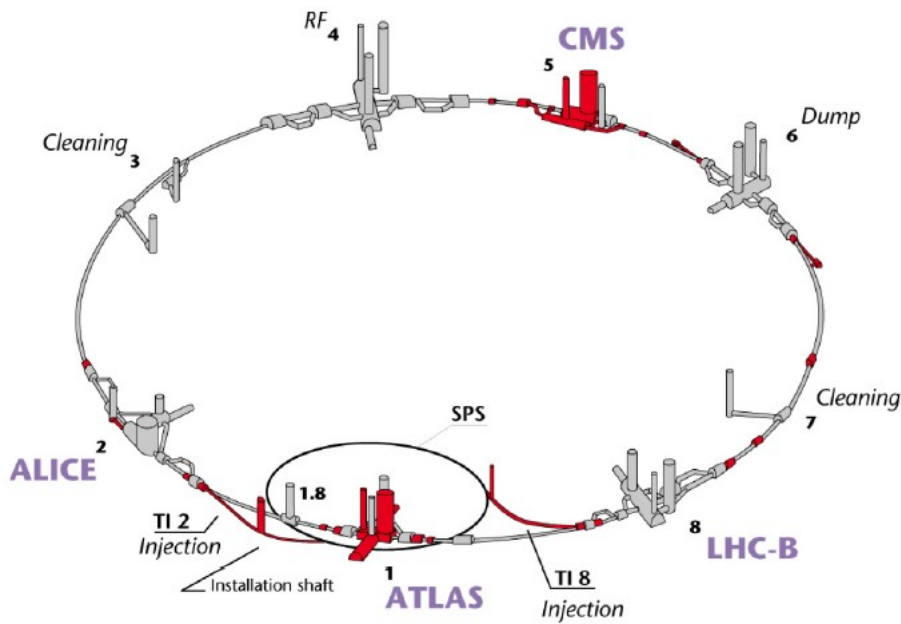


Figura 2.1. LHC e i suoi esperimenti.

### 2.1.1 Principio di funzionamento

Le particelle nel LHC viaggiano all'interno di un tubo a vuoto, mantenuto in condizioni di *ultra-high vacuum* (fino a  $10^{-13}$  atm), e sono manipolate attraverso delle cavità risonanti<sup>1</sup> e una grande varietà di magneti.

I protoni riescono ad accelerare "assorbendo" potenza dalle cavità risonanti a radiofrequenza (RF) che attraversa. I magneti si occupano, invece, di regolare la traiettoria dei fasci di particelle.

Per far sì che protoni con energia di  $\sim 7$  TeV viaggino seguendo una traiettoria circolare è necessario un campo magnetico di  $\sim 8$  T. Per avere un campo magnetico così elevato non è possibile utilizzare un elettromagnete convenzionale, poiché sarebbero necessarie correnti troppo elevate, la cui naturale conseguenza sarebbe una dissipazione di potenza elevatissima. Per questo motivo si utilizzano dei *magneti superconduttori*. Tutti i solenoidi dei magneti e le cavità acceleratrici sono stati costruiti con dei materiali speciali (niobio e titanio) che diventano superconduttori a temperature molto basse, conducendo l'elettricità necessaria a creare campi elettrici e magnetici senza resistenza elettrica. Per raggiungere la loro massima produttività è necessario che i magneti siano raffreddati a  $-271.3$  °C (1.9 K) - una temperatura minore di quella dello spazio interplanetario. Per raffreddare i magneti, a seconda delle necessità, sono utilizzati elio o azoto liquido [19]. Ogni fascio che viaggia all'interno dell'acceleratore è costituito da quasi 3000 pacchetti di particelle, di cui ognuno di essi contiene circa  $10^{11}$  particelle. All'interno dei rivelatori dei diversi esperimenti i protoni si scontrano 40 milioni di volte ogni secondo. In totale, ogni

<sup>1</sup>Idealmente una cavità risonante non è altro che uno spazio chiuso. Al suo interno vengono prodotte onde di qualche tipo, e le pareti che delimitano la cavità sono tali da riflettere completamente le onde, che, pertanto, rimangono completamente intrappolate all'interno.

secondo, avvengono circa  $10^9$  collisioni.

Prima di raggiungere l'LHC le particelle vengono accelerate gradualmente da una catena di acceleratori e aumentano la propria energia.

I protoni sono provvisti da una bottiglia piena di gas idrogeno. Gli atomi di idrogeno consistono di un protone e un elettrone. Gli elettroni vengono rimossi mediante una scarica elettrica, dopo di ciò i protoni sono guidati verso gli acceleratori mediante campi elettrici e magnetici [19].

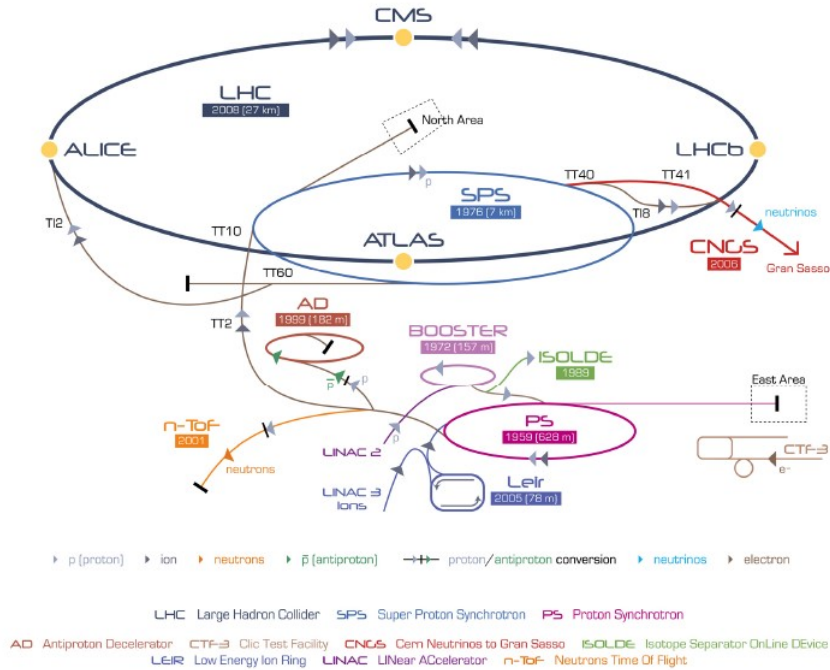


Figura 2.2. Il complesso di acceleratori.

I protoni entrano quindi nel primo stadio di accelerazione, l'acceleratore lineare *Linac2*, il quale cede i protoni con un'energia di 50 MeV al secondo acceleratore, il *Proton Synchrotron booster* (PSb), che aumenta a sua volta l'energia a 1,4 GeV. Successivamente le particelle sono trasferite al Proton Synchrotron (PS) e vengono ulteriormente accelerate fino ad avere un'energia di 25 GeV. L'ultimo stadio acceleratore è costituito dal *Super Proton Synchrotron* (SPS), dove l'energia raggiunge i 450 GeV, valore con cui entra all'interno dell'LHC [18].

Dopo il processo di accelerazione i fasci di protoni circolano all'interno dell'LHC per un tempo che va da 10 a 20 ore, durante il quale le particelle vengono fatte collidere nei quattro punti di collisione dove vi sono gli apparati sperimentali ATLAS, CMS, ALICE e LHCb.

## 2.2 Compact Muon Solenoid

Il **Compact Muon Solenoid** (CMS) è uno dei 4 esperimenti principali di LHC. È un esperimento *general purpose* costruito per rivelare i differenti tipi di particelle conosciute e indagare processi di nuova fisica.

Il CMS è stato costruito cercando di soddisfare le seguenti esigenze:

- identificazione e misura dell'impulso dei muoni<sup>2</sup>;
- ottima risoluzione nelle misure di posizione e impulso di particelle cariche e fotoni;
- contenimento delle dimensioni del rivelatore per minimizzare i costi.

Per questo motivo è stata scelta come struttura quella di un rivelatore cilindrico, dotato di un magnete superconduttore in grado di fornire un campo magnetico solenoidale di quasi 4 T, e differenti rivelatori con compiti diversi nella misura e nell'identificazione delle particelle.

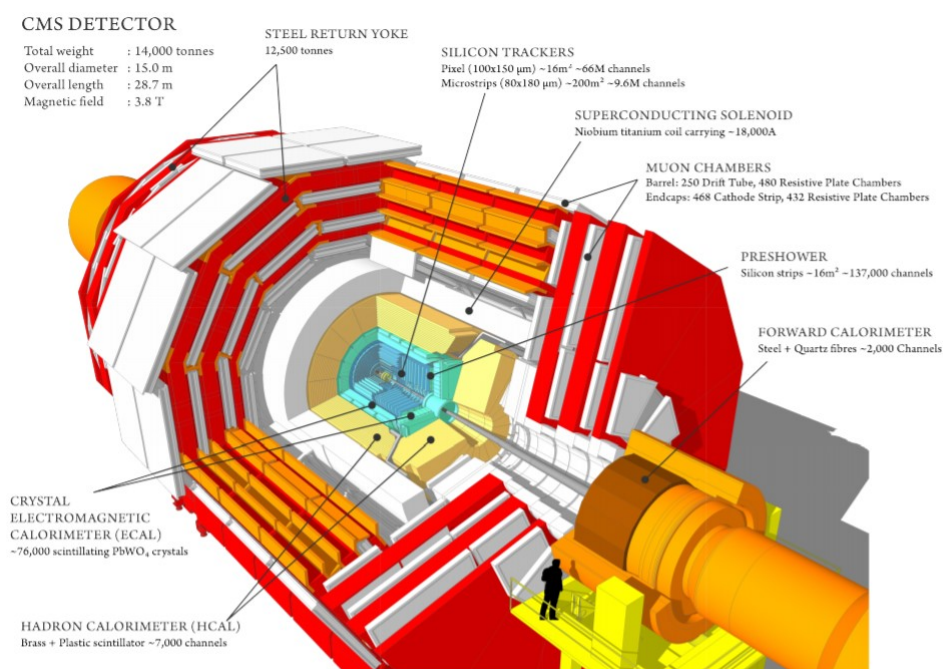


Figura 2.3. Il rivelatore CMS e tutti i sottorivelatori che lo compongono.

È dotato di un magnete solenoidale superconduttore lungo 13 m con diametro interno di 5.9 m che genera un campo magnetico di 3.8 T. All'esterno del magnete è collocato un sistema di rivelatori di muoni lungo 21 m con diametro di 14.6 m.

CMS è costituito da diversi rivelatori, come mostrato in Fig.2.3, che impiegano differenti

<sup>2</sup>Il muone è una particella elementare con carica elettrica negativa e spin (il quale definisce la rotazione della particella intorno al proprio asse) pari a 1/2.

materiali e tecnologie, per tracciare le traiettorie e misurare energie e momenti delle particelle generate nelle collisioni alle altissime energie di LHC.

CMS è quindi costituito dai seguenti componenti:

- un sistema tracciante al silicio per la rivelazione di particelle cariche, necessario per una misura precisa dell'impulso delle particelle cariche;
- un calorimetro<sup>3</sup> elettromagnetico (ECAL) per la misura dell'energia di fotoni ed elettroni;
- un calorimetro adronico (HCAL) per la misura dell'energia degli adroni<sup>4</sup>;
- un magnete superconduttore capace di produrre l'intenso campo magnetico di 4 T;
- camere a muoni inserite all'interno di strati di ferro che fungono anche da spire di ritorno per il campo magnetico.

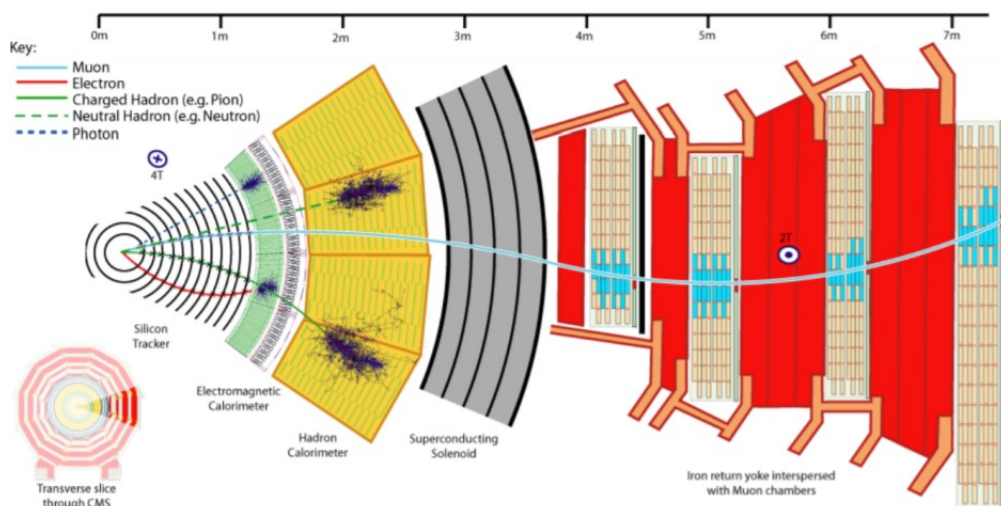


Figura 2.4. Sezione trasversale di CMS.

<sup>3</sup>La proprietà di base di un calorimetro è di convertire l'energia di una particella incidente in un segnale che può essere di varia natura (elettrico, ottico, termico, acustico), mantenendo la proporzionalità tra energia rilasciata e segnale raccolto.

<sup>4</sup>Un adrone è una particella subatomica composta da quark o da quark e antiquark, legati dalla forza nucleare forte.

## 2.3 Progetto I-Pipe

Il **sistema I-Pipe** [21] è un innovativo sistema di monitoraggio costituito da sensori FBG che monitora a contatto diretto un tratto del LHC, nello specifico la **Beam Pipe** (BP) del CMS, ossia la sezione del CMS in cui avvengono le collisioni protone-protone ad alta energia. Il sistema è stato installato per la prima volta durante il *Long Shutdown* LS1 avvenuto tra il 2013 e il 2015.

Durante il primo progetto I-Pipe, relativo al Long Shutdown 1, il sistema I-Pipe era basato sul monitoraggio della sola sezione centrale della pipe, la Central Beam Pipe (CBP), ed era formato da 4 fibre con 16 sensori FBG ciascuna. Di questi, 28 erano strettamente a contatto con la superficie esterna della pipe per il monitoraggio della deformazione, gli altri 36 erano soltanto poggiati e servivano per il monitoraggio della temperatura.

Durante la fase di Long Shutdown 2, iniziata nel 2019, la Beam Pipe è stata smontata e riprogettata. Visti i risultati e l'interesse che hanno suscitato le misure fatte dal sistema I-Pipe, nel nuovo progetto il sistema di monitoraggio è stato esteso a tutta la Beam Pipe, con misure di temperatura in tempo reale 24/7 per tutta la fase di Run 3 (che, presumibilmente, inizierà nel 2021 e terminerà nel 2025) e oltre.

La BP deve resistere a condizioni di vuoto estremo (fino a  $10^{-13}$  atm) e, allo stesso tempo, non deve interferire con le nuove particelle derivanti dalle collisioni [19].

Inoltre necessita di essere continuamente monitorata per avere informazioni circa la sua struttura e il suo stato di salute. Il sistema di monitoraggio da installare, però, non deve interferire in alcun modo con i rivelatori di particelle.

Questo sistema deve essere quindi in grado di funzionare in presenza di radiazioni ionizzanti, presentare un layout semplice e fornire la possibilità di multiplexing. Per questi motivi è stato progettato un sistema di monitoraggio basato su sensori FBG che è stato denominato *sistema di monitoraggio I-Pipe*, il cui obiettivo è quello di monitorare le condizioni termiche.

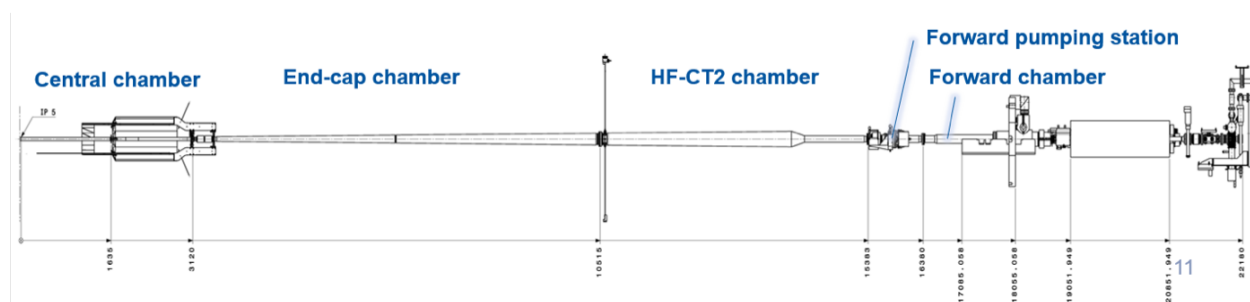


Figura 2.5. Illustrazione tecnica della Beam Pipe.



La Fig.2.5 illustra soltanto metà della pipe, l'altra parte è simmetrica rispetto alla sezione central.

Lungo la beam pipe sono disposti dei *patch panel* per connettere le fibre e portarle al sistema di lettura, posizionato all'interno della caverna sperimentale.

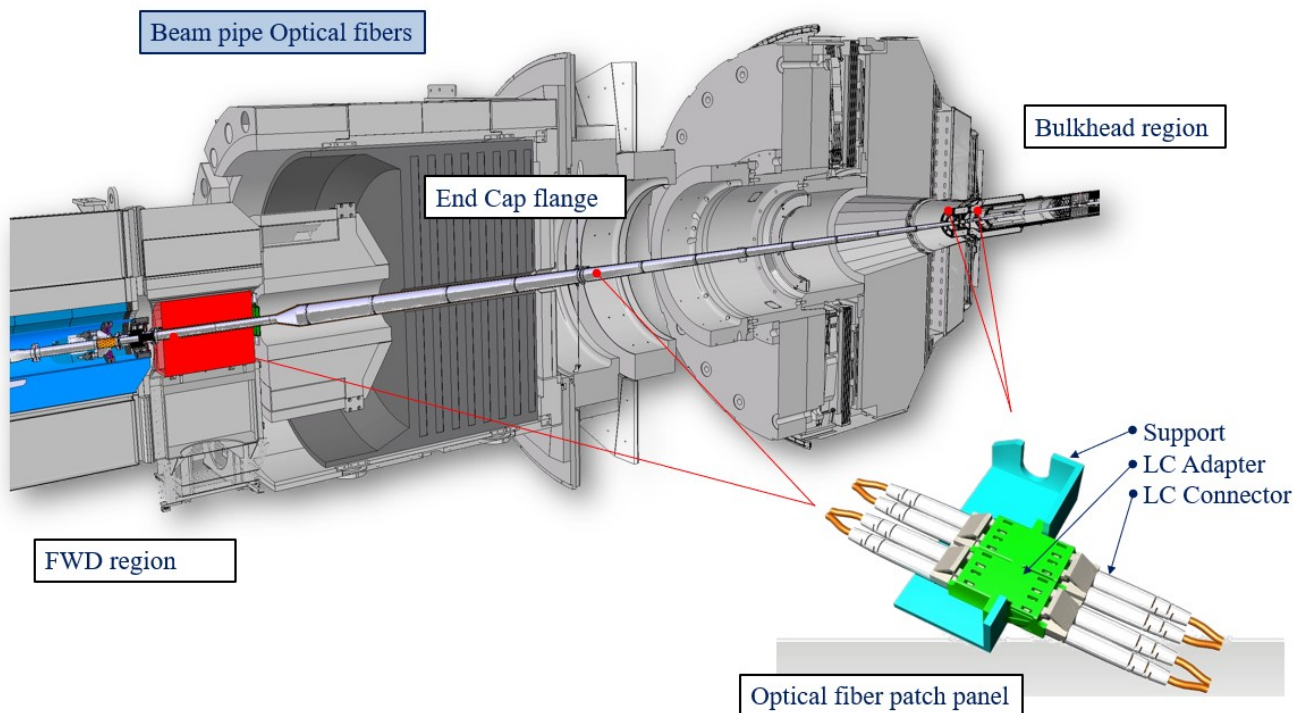


Figura 2.6. Illustrazione tecnica della Beam Pipe, in cui è riportata anche la sezione del rivelatore CMS, e dove sono evidenziate le posizioni dei patch panel.

### 2.3.1 Utilizzo dei sensori FBG

Il CMS, come si è visto nel Par.2.2, è un ambiente molto complesso che necessita di continui monitoraggi di temperatura, deformazione, umidità, campo magnetico e radiazioni. Nelle condizioni di lavoro del CMS (e in generale di tutto l'LHC), a causa degli elevati livelli di radiazioni e dei campi magnetici molto grandi, sensori elettronici convenzionali non sono adatti a questi scopi. Per questo tipo di utilizzo i sensori FBG costituiscono la migliore soluzione al problema per le caratteristiche descritte all'interno del Cap.1, che vengono riassunte brevemente di seguito [20]:

- i sensori FBG hanno dimensioni molto ridotte (hanno dimensioni longitudinali di qualche mm e trasversali di circa  $125 \mu\text{m}$ ), sono leggeri e non invasivi;
- alcune tipologie presentano un'alta resistenza alle radiazioni ionizzanti;
- presentano forte immunità alle interferenze elettromagnetiche;
- sono ideali per multiplexing e quindi per creare reti di sensori. Decine di sensori con  $\lambda_B$  diverse tra loro possono essere disposti in serie lungo la medesima fibra;

- la risposta del sensore alle deformazioni meccaniche e alle variazioni di temperatura cui è sottoposto viene codificata in una grandezza spettrale ( $\lambda_B$ ). La risposta del sensore è assoluta ed autoreferenziale e non dipende da rumori ambientali, fluttuazioni di potenza della sorgente luminosa, attenuazioni di intensità luminosa lungo la fibra (dovute, ad esempio, a giunzioni non ottimali della fibra);
- esistono soluzioni commerciali che li rendono disponibili a prezzi ragionevoli.

## Collocazione

Il sistema consiste attualmente di 5 fibre installate sulle posizioni cardinali della beam pipe.

Il progetto I-Pipe installato durante il Long Shutdown 1, come accennato precedentemente, consisteva di 4 fibre da 16 sensori ciascuna, tutte installate sulla sezione centrale, la Central Beam Pipe.

Nel nuovo progetto I-Pipe, in fase di realizzazione durante il presente Long Shutdown 2, il monitoraggio attraverso sensori FBG è stato esteso ad altre due sezioni: ENDCAP e HF-CT2. In realtà esistono 2 sezioni ENDCAP e 2 sezioni HF-CT2, simmetriche rispetto alla sezione centrale. Infatti si parla di ENDCAP e HF-CT2 *positiva e negativa*.

Nella sezione *central* l'array è formato da 7 sensori FBG distanziati di 1 metro tra di loro. In questo caso si hanno delle fibre "nude", non inserite all'interno di alcun buffer, poiché non devono interferire con i prodotti delle collisioni.

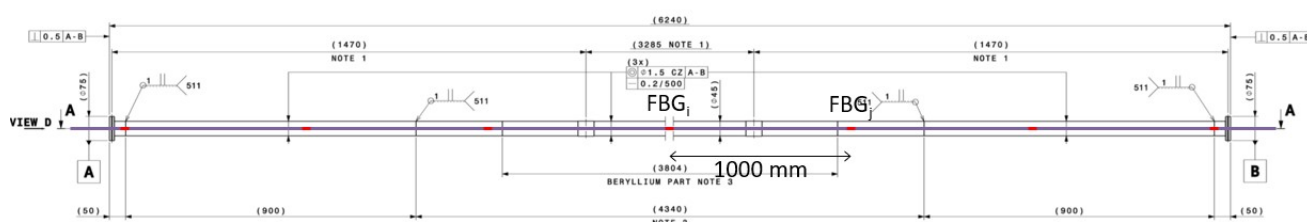


Figura 2.7. Sistema di monitoraggio della sezione central.

Nella sezione *ENDCAP* l'array è formato da 8 sensori FBG distanziati tra loro, in media, di 82 cm. Siccome la nuova Beam Pipe prevede che le strutture riscaldanti del bake-out<sup>5</sup> siano installate in maniera permanente, al fine di evitare che queste strutture possano danneggiare le fibre, queste ultime vengono inserite all'interno di capillari d'acciaio.

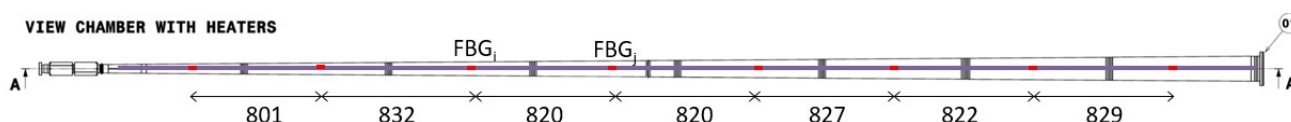


Figura 2.8. Sistema di monitoraggio della sezione ENDCAP.

<sup>5</sup>Processo di "cottura" della Pipe che sarà spiegato in seguito.

Nella sezione *HF-CT2* l'array è formato da 9 sensori FBG distanziati tra loro circa 80 cm, tranne nella sezione cerchiata in Fig.2.9, in cui la distanza diminuisce a 7 cm per lo studio del fenomeno di *beam induced heating*<sup>6</sup>. In questo caso, come nella sezione ENDCAP, le fibre sono inserite all'interno di capillari d'acciaio.

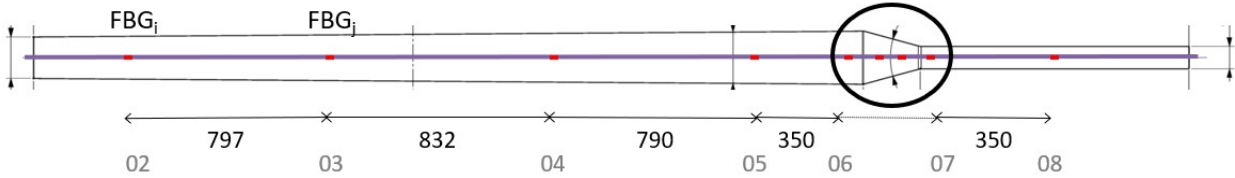


Figura 2.9. Sistema di monitoraggio della sezione HF-CT2.

### Caratteristiche

L'insieme dei sistemi di monitoraggio a fibra ottica installati sul CMS è identificato con l'acronimo FOS4CMS (*Fiber Optic Sensor for CMS*) [19]. Per i sistemi FOS4CMS, di cui fa parte il sistema I-Pipe, si è scelto di utilizzare l'**architettura di interrogazione WDM** (*Wavelength Division Multiplexing*) al fine di massimizzare il numero di sensori interrogabili con una sola fibra.

In logica WDM un certo numero di sensori può essere interrogato contemporaneamente sfruttando le loro diversità spettrali: poiché ogni FBG riflette una porzione della luce incidente, mettendo sulla stessa fibra una serie di reticoli in serie, il sistema di interrogazione della lunghezza d'onda leggerà uno spettro in riflessione composto dalle lunghezze d'onda centrali di ciascun reticolo. Il numero di sensori interrogabili in logica WDM dipende dalla banda della sorgente e dallo shift massimo che possono avere le lunghezze d'onda di picco dei sensori FBG.

Nella seguente tabella sono riassunte alcune caratteristiche principali degli FBG utilizzati:

FBG specification	Reflectivity [%]	FWHM [nm]	SLSR [dB]	FBG length [mm]
value	50	0,4	15	5
tolerance +/- min/max	min	max	min	max

Tabella 2.1. Principali caratteristiche dei FBG

Le fibre utilizzate per il monitoraggio di temperatura e deformazione montate sulle sezioni ENDCAP e HF, in realtà, non sono prive di rivestimento, ma sono inserite in un capillare d'acciaio. Questo rivestimento è necessario poiché queste sezioni vengono periodicamente sottoposte a quel processo che va sotto il nome di *bake-out*, ovvero una "cottura" della Pipe (la temperatura viene alzata fino a circa 250°C), in modo da eliminare le impurità ed essere in condizioni di estremo vuoto<sup>7</sup> [21]. Durante il *bake-out* relativo al LS2, effettuato nel mese di novembre 2020, tutti i sensori sono sopravvissuti al processo grazie al

<sup>6</sup>Il fenomeno di *beam induced heating* consiste nel verificarsi di un surriscaldamento locale dovuto all'aumento dell'intensità del fascio di particelle circolante nell'acceleratore.

<sup>7</sup>Le camere a vuoto di LHC (Beam Pipe) reggono un vuoto che va da  $10^{-11}$  a  $10^{-13}$  Pa.



rivestimento in acciaio.

Nella nuova Beam Pipe, in montaggio durante il Long Shutdown 2, il sistema di bake-out viene installato stabilmente intorno ad essa. Nella pratica si è utilizzato un foglio di Kapton<sup>8</sup> con all'interno una serpentina riscaldante che viene messo intorno alla Pipe.



Figura 2.10. Imballaggio con i fogli di Kapton.

Il rivestimento in acciaio è quindi necessario a fare in modo che la fibra resista alle temperature del processo di bake-out.

L'imballaggio con fogli di Kapton fornisce un secondo motivo per cui inserire la fibra in capillari d'acciaio. Infatti, se questi non fossero presenti, si metterebbe in tensione la fibra (il che comporterebbe una modifica delle misurazioni) e si rischierebbe di romperla durante il processo di imballaggio.

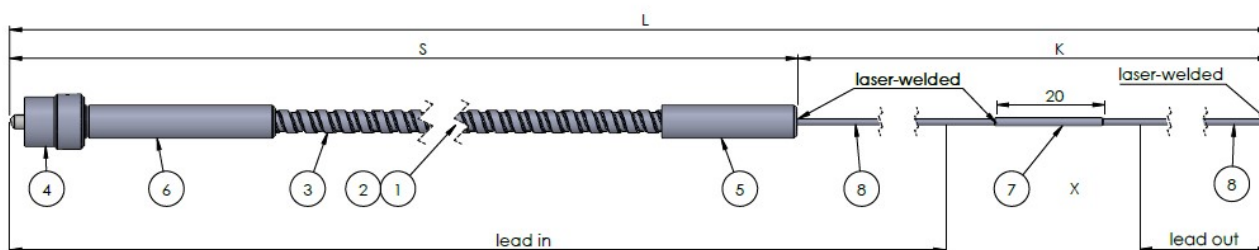


Figura 2.11. Disegno tecnico della fibra inserita nel capillare d'acciaio.

Le fibre delle sezioni ENDCAP e HF-CT2 sono quindi inserite all'interno del capillare

<sup>8</sup>Il Kapton è una pellicola poliimide sviluppata dalla DuPont in grado di rimanere stabile in un'ampia gamma di temperature, dai -269 °C a +400 °C. Il Kapton è usato, tra le altre cose, nei circuiti stampati flessibili e nello strato esterno delle tute spaziali degli astronauti, progettate per garantire protezione termica e dalle micrometeoroidi.

POS-NR	DESIGNATION	QUANTITY
1	fiber	1
2	glass fiber hose	S+0,5
3	hose SL	S+0,5
4	FC/APC connector	1
5	hose connection SL 2,5	1
6	hose connection FC/APC	1
7	VA tube $\text{\O}1.5 \times 0.25 \times 20$ X	X
8	VA tube $\text{\O}1.5 \times 0.25 \times 20$ X	1
9	VA tube $\text{\O}1.5 \times 0.25 \times 20$ X	0.1
10	VA tube $\text{\O}1.5 \times 0.25 \times 20$ X	0.1

Tabella 2.2. Sezioni della Fig.2.11.

d'acciaio visibile nel disegno tecnico di Fig.2.11 (7) (le varie sezioni della Fig.2.11 sono specificate nella Tab.2.2). Questa è l'unica parte montata sulla pipe: la parte più massiccia collega la fibra al sistema di lettura. Il tutto è poi collegato all'interrogatore<sup>9</sup>, presente nella caverna sperimentale di LHC.

## Layout

Di seguito vengono mostrati il layout e le caratteristiche dei vari array calibrati.

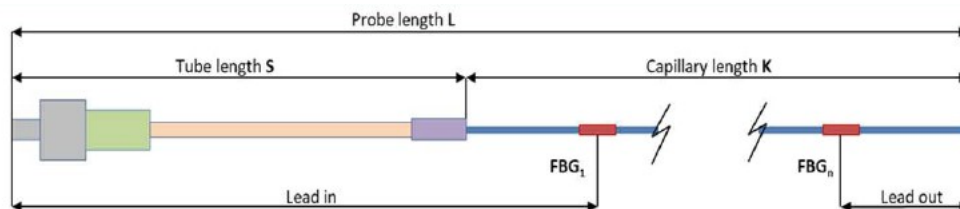


Figura 2.12. Layout delle fibre del sistema I-Pipe.

### 1) HF-CT2 array pipe 1

Sono elencate di seguito le caratteristiche della fibra:

- tipo di connettore: FC-APC;
- diametro esterno del capillare: 1 mm;
- lunghezza del capillare (K): 4420 mm;
- materiale del tubo: acciaio inossidabile;

<sup>9</sup>L'interrogatore utilizzato è un *Micron Optics SM-225-800* a 16 canali, in grado di lavorare in un range di lunghezze d'onda che va da 1510 a 1590 nm.

- diametro esterno del tubo: 4 mm;
- lunghezza del tubo (S): 1500 mm.

Di seguito sono mostrati i valori di lunghezza d'onda nominali dell'array e le posizioni dei FBG sulla fibra che sono individuate dai parametri *lead in* e *lead out* con rif. alla Fig.2.12:

- Riflettività min: 50%;
- FWHM<sup>10</sup> max: 0,4 nm;
- SLSR min: 15 dB;
- lunghezza max: 5,0 mm.

Di seguito sono mostrati i valori di lunghezza d'onda nominali dell'array e le posizioni dei FBG sulla fibra che sono individuate dai parametri *lead in* e *lead out* con rif. alla Fig.2.12:

FBG wavelength [nm]		wavelength tolerance +/-	
equal spacing	5,0		
wavelength FBG1	1530	0,3	
FBG#	wavelength in nm	FBG lead in [mm]	FBG lead out [mm]
FBG1	1530	2500	3420
FBG2	1535	2850	3070
FBG3	1540	2940	2980
FBG4	1545	3030	2890
FBG5	1550	3120	2800
FBG6	1555	3470	2450
FBG7	1560	4270	1650
FBG8	1565	5070	850
FBG9	1570	5870	50

Tabella 2.3. Valori di lunghezza d'onda nominali dell'array e posizioni degli FBG (HF-CT2-1).

<sup>10</sup>Full width at half maximum (Larghezza a mezza altezza).

## 2) HF-CT2 array pipe 2

Sono elencate di seguito le caratteristiche della fibra:

- tipo di connettore: FC-APC;
- diametro esterno del capillare: 1 mm;
- lunghezza del capillare (K): 4420 mm;
- materiale del tubo: acciaio inossidabile;
- diametro esterno del tubo: 4 mm;
- lunghezza del tubo (S): 1500 mm.

Di seguito sono riportate le caratteristiche dei FBG:

- Riflettività min: 50%;
- FWHM max: 0,4 nm;
- SLSR min: 15 dB;
- lunghezza max: 5,0 mm.

Di seguito sono mostrati i valori di lunghezza d'onda nominali dell'array e le posizioni dei FBG sulla fibra che sono individuate dai parametri *lead in* e *lead out* con rif. alla Fig.2.12:

FBG wavelength [nm]		wavelength tolerance +/-	
equal spacing	5,0		
wavelength FBG1	1527,5	0,3	
FBG#	wavelength in nm	FBG lead in [mm]	FBG lead out [mm]
FBG1	1527,5	2500	3420
FBG2	1532,5	2850	3070
FBG3	1537,5	2940	2980
FBG4	1542,5	3030	2890
FBG5	1547,5	3120	2800
FBG6	1552,5	3470	2450
FBG7	1557,5	4270	1650
FBG8	1562,5	5070	850
FBG9	1567,5	5870	50

Tabella 2.4. Valori di lunghezza d'onda nominali dell'array e posizioni degli FBG (HF-CT2-2).

### 3) Endcap pipe array 1

Sono elencate di seguito le caratteristiche della fibra:

- tipo di connettore: FC-APC;
- diametro esterno del capillare: 1 mm;
- lunghezza del capillare (K): 6190 mm;
- materiale del tubo: acciaio inossidabile;
- diametro esterno del tubo: 4 mm;
- lunghezza del tubo (S): 1500 mm.

Di seguito sono riportate le caratteristiche dei FBG:

- Riflettività min: 50%;
- FWHM max: 0,4 nm;
- SLSR min: 15 dB;
- lunghezza max: 5,0 mm.

Di seguito sono mostrati i valori di lunghezza d'onda nominali dell'array e le posizioni dei FBG sulla fibra che sono individuate dai parametri *lead in* e *lead out* con rif. alla Fig.2.12:

FBG wavelength [nm]		wavelength tolerance +/-	
equal spacing	5,0		
wavelength FBG1	1530	0,3	
FBG#	wavelength in nm	FBG lead in [mm]	FBG lead out [mm]
FBG1	1530	1900	5790
FBG2	1535	2720	4970
FBG3	1540	3540	4150
FBG4	1545	4360	3330
FBG5	1550	5180	2510
FBG6	1555	6000	1690
FBG7	1560	6820	870
FBG8	1565	7640	50

Tabella 2.5. Valori di lunghezza d'onda nominali dell'array e posizioni degli FBG (ENDCAP-1).

#### 4) Endcap array pipe 2

Sono elencate di seguito le caratteristiche della fibra:

- tipo di connettore: FC-APC;
- diametro esterno del capillare: 1 mm;
- lunghezza del capillare (K): 6190 mm;
- materiale del tubo: acciaio inossidabile;
- diametro esterno del tubo: 4 mm;
- lunghezza del tubo (S): 1500 mm.

Di seguito sono riportate le caratteristiche dei FBG:

- Riflettività min: 50%;
- FWHM max: 0,4 nm;
- SLSR min: 15 dB;
- lunghezza max: 5,0 mm.

Di seguito sono mostrati i valori di lunghezza d'onda nominali:

FBG wavelength [nm]		wavelength tolerance +/-	
equal spacing	5,0		
wavelength FBG1	1527,5	0,3	
FBG#	wavelength in nm	FBG lead in [mm]	FBG lead out [mm]
FBG1	1527,5	1900	5790
FBG2	1532,5	2720	4970
FBG3	1537,5	3540	4150
FBG4	1542,5	4360	3330
FBG5	1547,5	5180	2510
FBG6	1552,5	6000	1690
FBG7	1557,5	6820	870
FBG8	1562,5	7640	50

Tabella 2.6. Valori di lunghezza d'onda nominali dell'array e posizioni degli FBG (ENDCAP-2).

# Capitolo 3

## Calibrazione in temperatura dei FBG

### 3.1 Calibrazione dei sensori FBG

I sensori FBG che saranno installati sulla BP del CMS sono stati calibrati al CERN, in un laboratorio dedicato, utilizzando una camera climatica. Per ottenere il monitoraggio della temperatura vicino ad ogni FBG è stato messo un sensore elettronico di temperatura RTD PT1000<sup>1</sup>. La temperatura della camera è stata fatta variare in un range che va da 5 a 55 °C, intervallo molto più grande di quello in cui i sensori andranno ad operare. Di ogni reticolo si conosce la risposta in lunghezza d'onda tramite un interrogatore *Micron Optics SM-225-800* (MOI - Micron Optics Interrogator) [22], mediante il quale si conoscono gli spostamenti della lunghezza d'onda di picco al variare della temperatura. La lettura della risposta dei sensori FBG avviene quindi mediante questo interrogatore, il quale è connesso ad un computer tramite un collegamento ethernet e per mezzo del quale è possibile acquisire i dati relativi allo spettro, mediante il software proprietario *Enlight*. È possibile osservare la strumentazione adottata per il processo di calibrazione nella Fig.3.1:



Figura 3.1. Strumentazione adottata per il processo di calibrazione (a sinistra) e fibre con sensori di temperatura (a destra).

---

<sup>1</sup>Un RTD è un tipo di sensore di temperatura basato sulla correlazione tra metalli e temperatura. Non appena la temperatura di un metallo aumenta così fa la sua resistenza al flusso di elettricità. "Pt" sta per platino mentre "1000" indica che il sensore di temperatura ha una resistenza di 1000 ohm a 0 °C.

Le fibre sono state inserite nella camera climatica, come è possibile vedere in Fig.3.2.

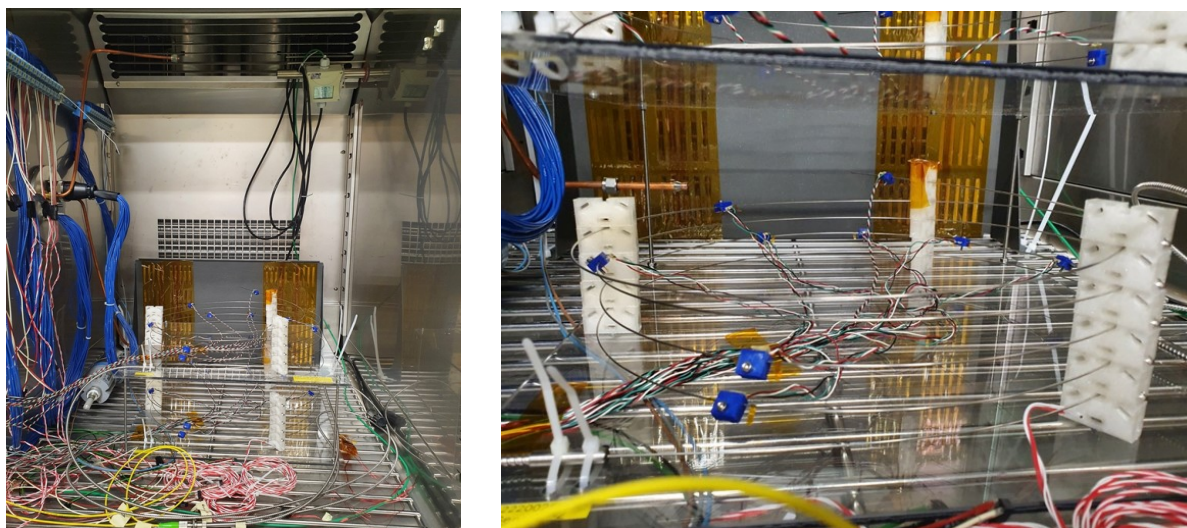


Figura 3.2. Fibre all'interno della camera climatica.

In basso a sinistra, nella prima immagine di Fig.3.1, è presente un interrogatore a 16 canali di *Micron Optics SM-225-800* per conoscere la variazione di lunghezza d'onda. Considerato che i sensori in questione lavoreranno nella caverna sperimentale di CMS ad una temperatura media di  $20^{\circ}\text{C}$  e che dovranno monitorare le variazioni di temperatura collegate ai fenomeni di *beam induced heating*, che sono dell'ordine di qualche grado, la calibrazione è stata fatta in un range che va da  $5^{\circ}\text{C}$  a  $55^{\circ}\text{C}$ .

Di seguito (Fig.3.3) è mostrato il monitoraggio di temperatura per un sensore (nello specifico il sensore RTD PT1000 vicino al reticolo ENDCAP 3-1 (FBG2)):

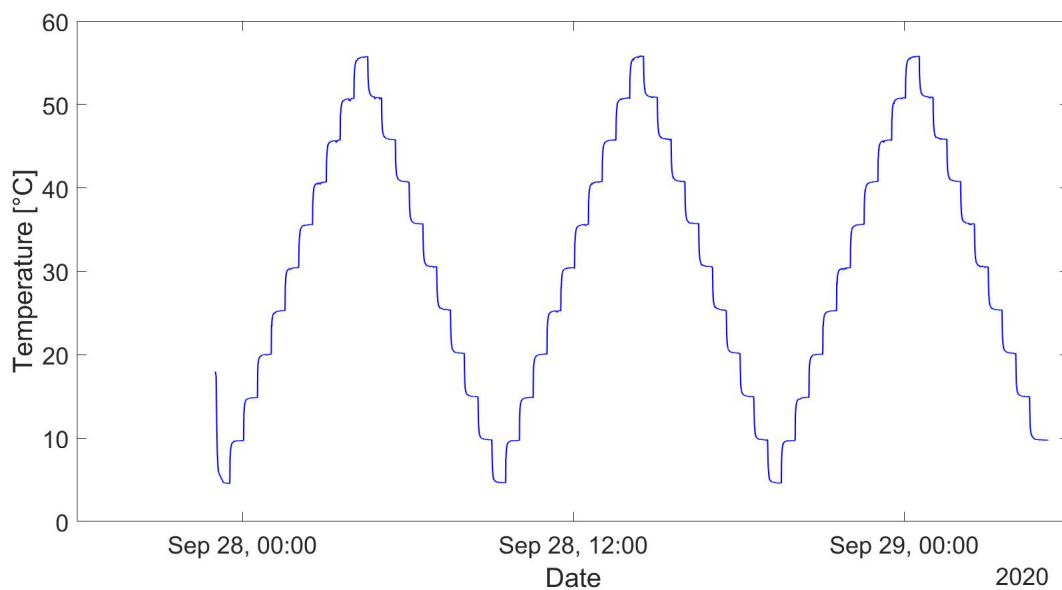


Figura 3.3. Monitoraggio della temperatura del sensore RTD PT1000 vicino al FBG2 della sezione ENDCAP 3-1.



È possibile osservare il monitoraggio della lunghezza d'onda in Fig.3.4<sup>2</sup>:

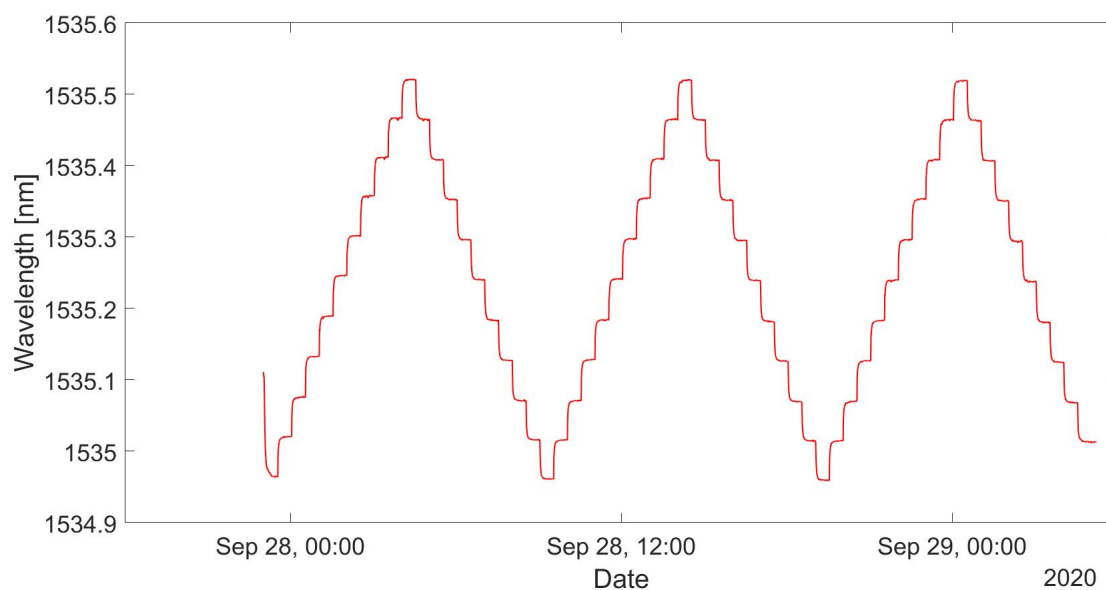


Figura 3.4. Monitoraggio della lunghezza d'onda del sensore FBG2 della sezione ENDCAP 3-1.

Nei plateau, ovvero le zone piatte del grafico, ci sono i dati di temperatura "stabili", mentre nei transienti i punti sono presenti in numero molto più piccolo.

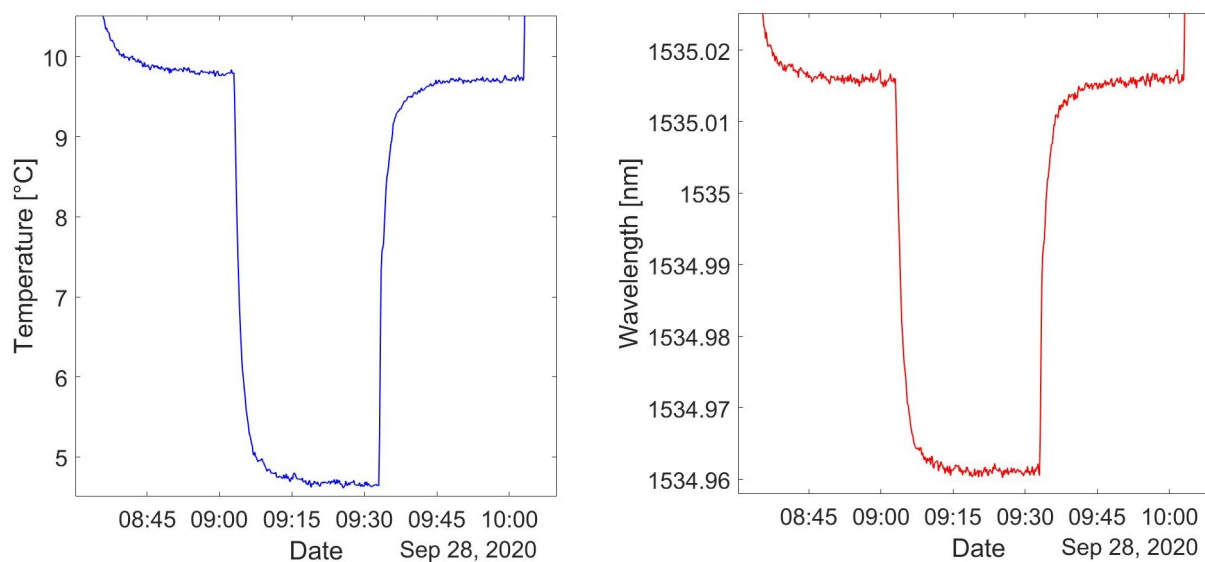


Figura 3.5. Distribuzione dei punti su plateau e transienti.

<sup>2</sup>Il codice MATLAB per l'ottenimento di tutti i grafici mostrati è riportato nell'Appendice B.

Sovrapponendo i grafici delle Figg. 3.3 e 3.4 si può notare che i due set di dati acquisiti sono perfettamente sincronizzati:

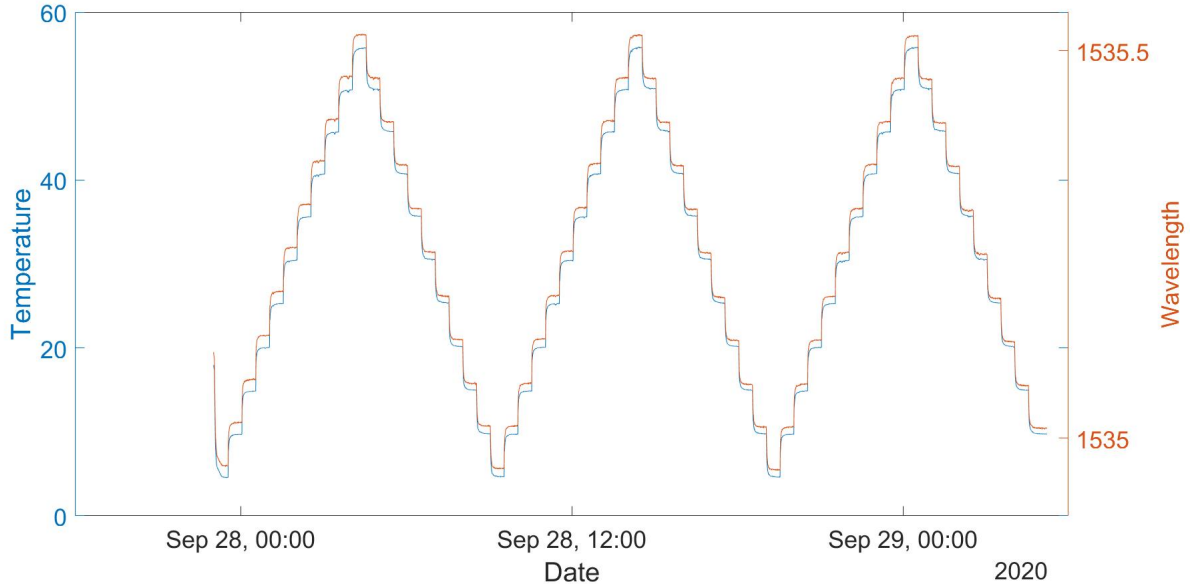


Figura 3.6. Sincronismo tra sensore di temperatura e interrogatore.

## 3.2 Procedura di calibrazione

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di ricavare i parametri di calibrazione per ogni sensore FBG del sistema I-Pipe delle sezioni ENDCAP e HF-CT2.

La tecnica utilizzata in questo lavoro di tesi è il **Metodo dei Minimi Quadrati**<sup>3</sup>, per mezzo del quale si trova la funzione che minimizza la somma dei quadrati delle distanze tra i dati osservati e quelli della curva che rappresenta la funzione stessa. Si ricerca quindi un polinomio  $P$  di grado  $N$  esprimibile come

$$P(x) = p_1x^N + p_2x^{N-1} + \dots + p_Nx + p_{N+1}, \quad (3.1)$$

tale che minimizzi la distanza tra i dati  $Y$  ed i valori  $P(x)$ :

$$\|Y - P(x)\| = \sqrt{\sum_{i=1}^N |Y(x_i) - P(x_i)|^2}. \quad (3.2)$$

Dato che per piccole escursioni di temperatura la relazione tra quest'ultima e la lunghezza d'onda è lineare si parte facendo una regressione di tipo lineare. In seguito, tramite

<sup>3</sup>(In inglese OLS: Ordinary Least Squares) è una tecnica di ottimizzazione (o regressione) che permette di trovare una funzione, rappresentata da una curva ottima (o curva di regressione), che si avvicini il più possibile ad un insieme di dati (tipicamente punti del piano).

valutazioni statistiche, si stabilisce quanto il fit di tipo lineare è adatto a rappresentare i dati a nostra disposizione. Si riduce quindi il polinomio P dell'Eq.3.1 alla retta

$$y = Ax + B \quad \rightarrow \quad \lambda = \alpha T + \lambda_0 . \quad (3.3)$$

Il coefficiente A ( $\alpha$ ), ovvero la pendenza della retta, rappresenta il **coefficiente di sensibilità termica**, mentre B, ovvero  $\lambda_0$ , rappresenta l'intercetta della retta con l'asse delle ordinate.

Applicando il Metodo dei Minimi Quadrati si ottengono i parametri della retta, A e B:

$$A = \frac{n \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{n \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \quad B = \bar{y} - A\bar{x} \quad (3.4)$$

dove  $y_i$  e  $x_i$  sono i dati osservati e  $\bar{y}$  e  $\bar{x}$  rappresentano i loro valori medi.

L'ambiente di calcolo numerico MATLAB, utilizzato in questo lavoro di tesi, permette, mediante particolari funzioni, di elaborare i valori di temperatura e lunghezza d'onda, in maniera tale da ottenere la retta di regressione lineare applicando il Metodo dei Minimi Quadrati.

Le incertezze associate alla pendenza e all'intercetta della retta sono state calcolate attraverso le seguenti formule:

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\sigma_y^2 n}{n \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2}} \quad \sigma_B = \sqrt{\frac{\sigma_y^2 \left( \sum_{i=1}^N x_i^2 \right)}{n \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N x_i \right)^2}} , \quad (3.5)$$

dove n rappresenta il numero totale di coppie di dati mentre  $\sigma_y$  rappresenta la deviazione standard relativa alla regressione, detta anche *errore standard*, che coincide con la deviazione standard della somma dei quadrati dei residui. Il suo valore è dato da

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^N (y_i - B - Ax_i)^2} . \quad (3.6)$$

Per verificare la correttezza del fitting risulta molto importante la valutazione del **coefficiente di determinazione**<sup>4</sup>  $R^2$ , parametro che varia tra 0 e 1: il valore 0 indica che il modello statistico utilizzato non è esplicativo per i dati in possesso; quando il suo valore tende a 1 il modello adoperato è corretto. Il coefficiente di determinazione è dato dal

<sup>4</sup>In statistica, il coefficiente di determinazione, (più comunemente  $R^2$ ), è una proporzione tra la variabilità dei dati e la correttezza del modello statistico utilizzato.

rapporto tra la devianza<sup>5</sup> spiegata dal modello ( $ESS = \text{Explained Sum of Squares}$ ) e la devianza totale ( $TSS = \text{Total Sum of Squares}$ ):

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS} = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad , \quad (3.7)$$

dove  $\hat{y}_i$  sono i dati stimati dal modello ottenuto dalla regressione.

A titolo di esempio si mostrano nel seguito i parametri di calibrazione per il sensore ENDCAP 3-1 (FBG2) (i dati di calibrazione di tutti i sensori sono riportati nell'Appendice A). Applicando quindi le formule (3.4), (3.5), (3.6) e (3.7), attraverso il software MATLAB, si ottiene

$$\alpha = (0.010945 \pm 0,000002) \frac{nm}{^\circ C} \quad \lambda_0 = (1534,90783 \pm 0,00007) nm \quad R^2 = 0,9996 \quad .$$

Una volta ottenuti questi parametri è possibile andare a graficare la curva di regressione lineare del sensore in questione:

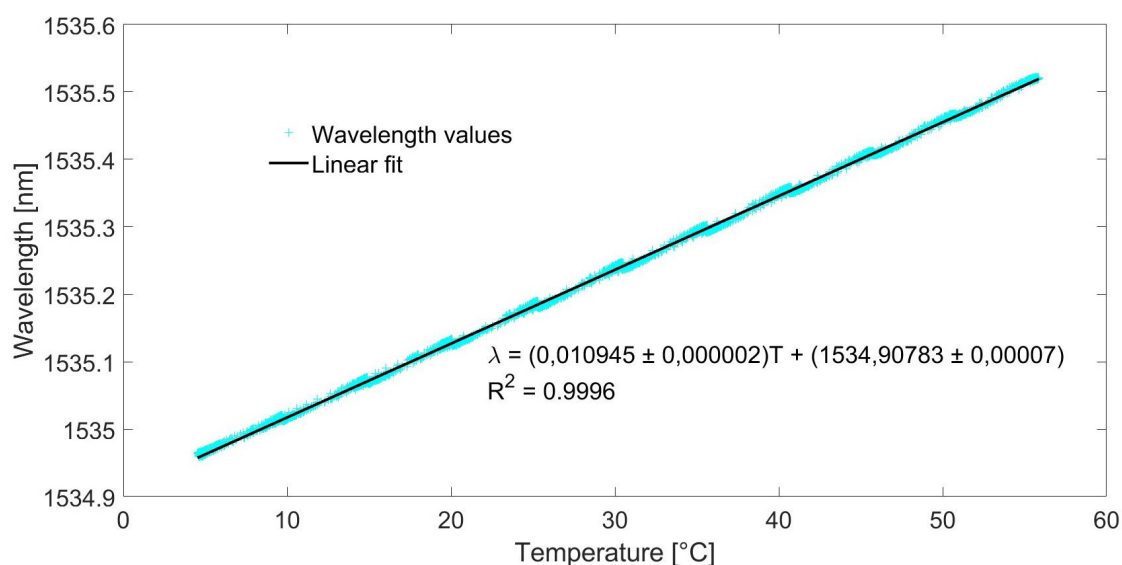


Figura 3.7. Curva di regressione lineare

<sup>5</sup>In statistica la devianza, o somma dei quadrati degli scarti dalla media, è un indice di dispersione dei dati. È anche chiamata somma dei quadrati, dall'inglese "sum of squares".

### 3.2.1 Confronto fit lineare - fit cubico

Siccome in letteratura, tipicamente, viene utilizzata una polinomiale di terzo grado per descrivere il comportamento di un sensore FBG, è stato effettuato di seguito il confronto del fit lineare con uno di tipo cubico<sup>6</sup>.

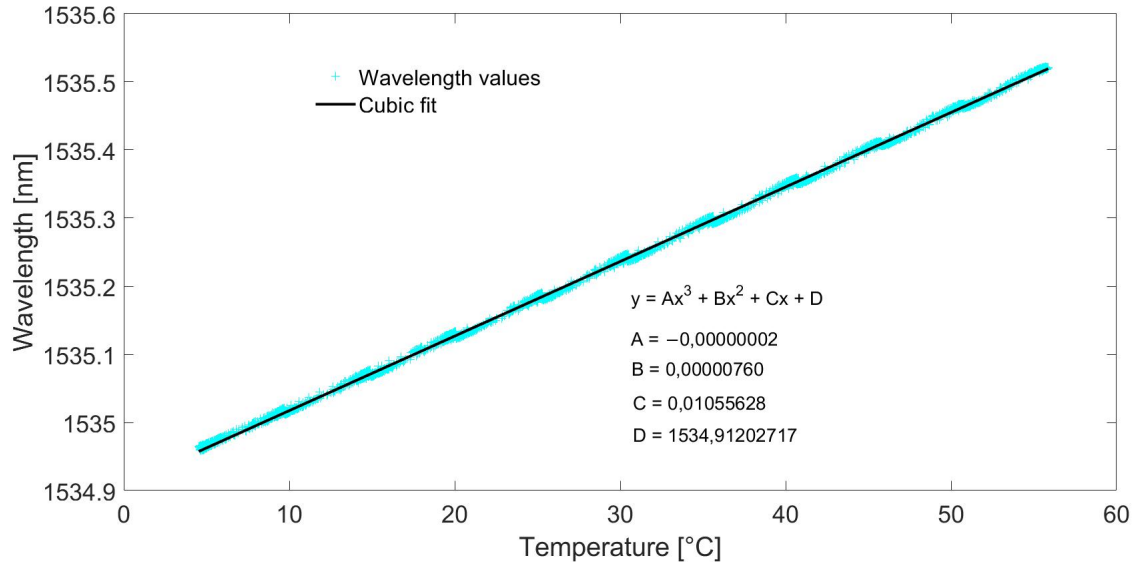


Figura 3.8. Fit cubico.

I parametri ottenuti per l'equazione del fit cubico ( $y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D$ ) sono

$$\begin{aligned} A &= -0,00000022520 & B &= 0,000007604211 \\ C &= 0,010556283143 & D &= 1534,912027178903 \end{aligned}$$

Il calcolo dei parametri del fit cubico è stato esteso a tutti i sensori, ed è stato quindi possibile andare a fare dei diagrammi delle occorrenze per il termine cubico e quello quadratico (Figg. 3.9 e 3.10). Il valor medio e la varianza dei due termini sono i seguenti:

$$\begin{cases} \mu = -6,26183 \cdot 10^{-8} & \sigma^2 = 1,59636 \cdot 10^{-14} & (\text{termine cubico}) \\ \mu = 9,77618 \cdot 10^{-6} & \sigma^2 = 6,20924 \cdot 10^{-11} & (\text{termine quadratico}) \end{cases}$$

Essendo i coefficienti del termine cubico (A) e di quello quadratico (B) molto piccoli (in media quasi nulli), questo fit cubico tende ad essere molto simile ad uno lineare, il che dimostra che nel range di temperatura considerato (5÷55 °C) il comportamento del sensore è di tipo lineare.

<sup>6</sup>Il fit di tipo cubico è chiamato anche "interpolazione spline". Questo è un particolare metodo di interpolazione basato sulle funzioni spline, le quali sono delle funzioni costituite da un insieme di polinomi raccordati tra loro, il cui scopo è interpolare in un intervallo un insieme di punti (detti nodi della spline), in modo tale che la funzione sia continua almeno fino ad un dato ordine di derivate in ogni punto dell'intervallo.

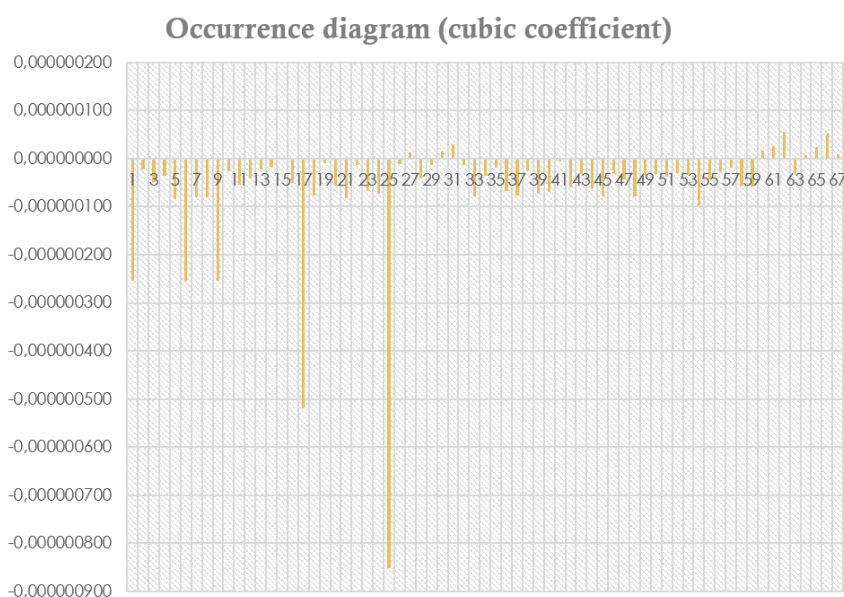


Figura 3.9. Diagramma delle occorrenze per il termine cubico del fit.

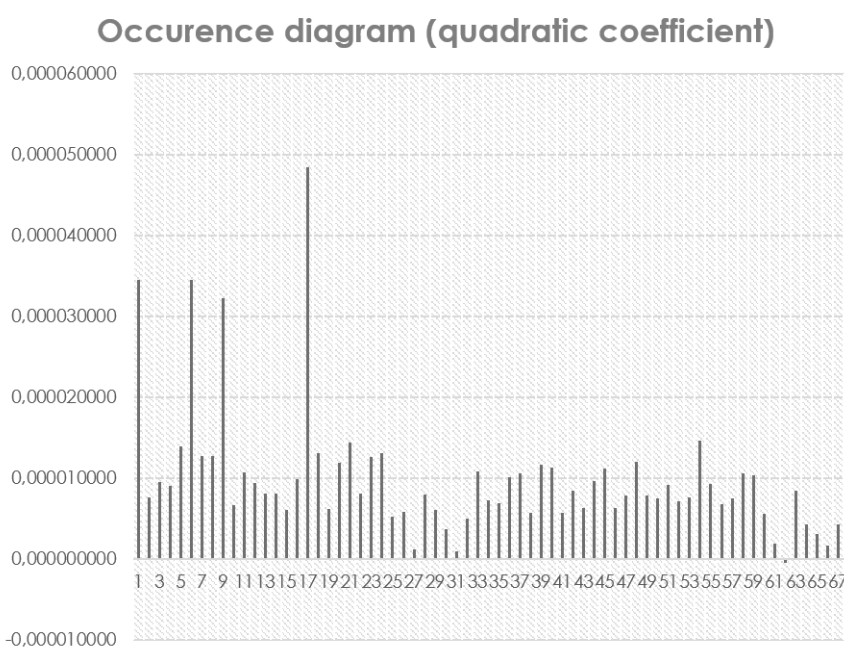


Figura 3.10. Diagramma delle occorrenze per il termine quadratico del fit.

In questo caso, quindi, conviene utilizzare un fit di tipo lineare poiché, in questo modo, si riesce a semplificare l'analisi gestendo meno parametri, senza nuocere la validità del fitting.

### 3.2.2 Fit con punti di temperatura e lunghezza d'onda "stabili"

Nell'analisi fatta fino a questo momento, sia per quanto riguarda il fit lineare che per quello cubico, si sono considerati tutti i punti dei grafici delle Figg. 3.3 e 3.4.

Adesso si svolge un'analisi diversa, formalmente più corretta, in cui si considerano soltanto i punti di temperatura e lunghezza d'onda "stabili", ossia quelli collocati sui plateau (zone piatte del grafico), in modo da eliminare i punti collocati sui transienti (che sono in numero molto minore rispetto ai plateau). Per fare questo si è ragionato sulla pendenza tra due punti consecutivi, creando un programma automatico che, indipendentemente dal numero di plateau e dal range di temperatura, è in grado di eliminare le parti di grafico in cui la pendenza tra due punti successivi è molto alta (ovvero i transienti). In questo modo i grafici delle Figg. 3.3 e 3.4 si modificano quanto segue:

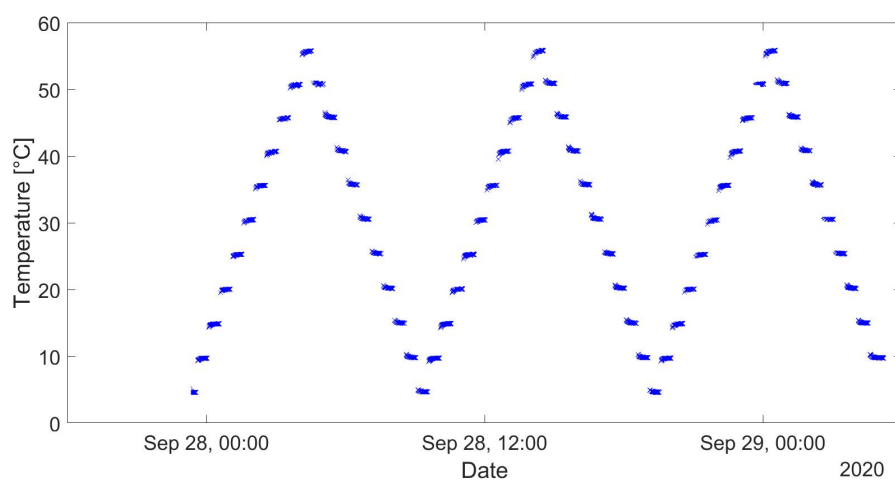


Figura 3.11. Grafico temperatura-tempo considerando solo i plateau (ENDCAP 3-1 (FBG2)).

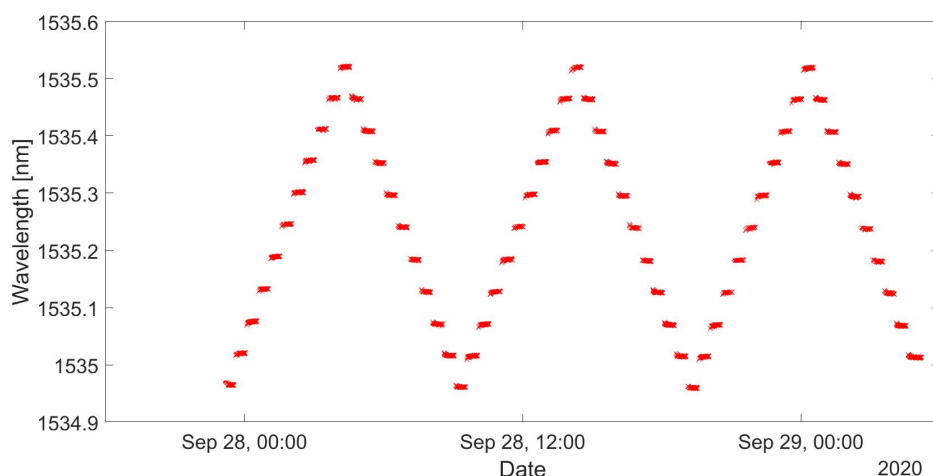


Figura 3.12. Grafico lunghezza d'onda-tempo considerando solo i plateau (ENDCAP 3-1 (FBG2)).

È possibile osservare la distribuzione statistica dei punti di un determinato livello di temperatura o lunghezza d'onda attraverso un istogramma<sup>7</sup>:

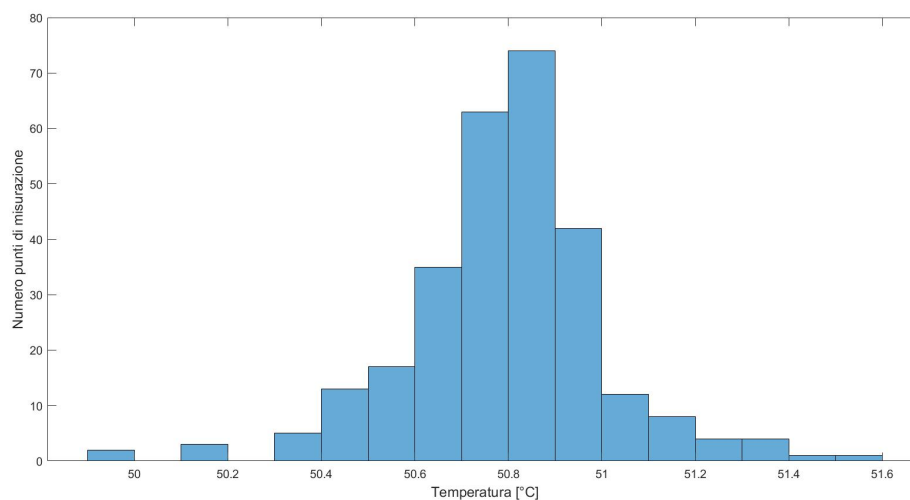


Figura 3.13. Distribuzione statistica dei punti di un plateau.

Dal grafico precedente si evince quindi che i punti, per ogni livello di temperatura e lunghezza d'onda, si distribuiscono lungo una gaussiana.

In seguito, considerando soltanto i valori medi di ogni livello di temperatura e lunghezza d'onda si è proceduto a fare un nuovo fit lineare dei dati per vedere come varia, in questo caso, rispetto al fit precedente in cui si sono considerati tutti i punti acquisiti.

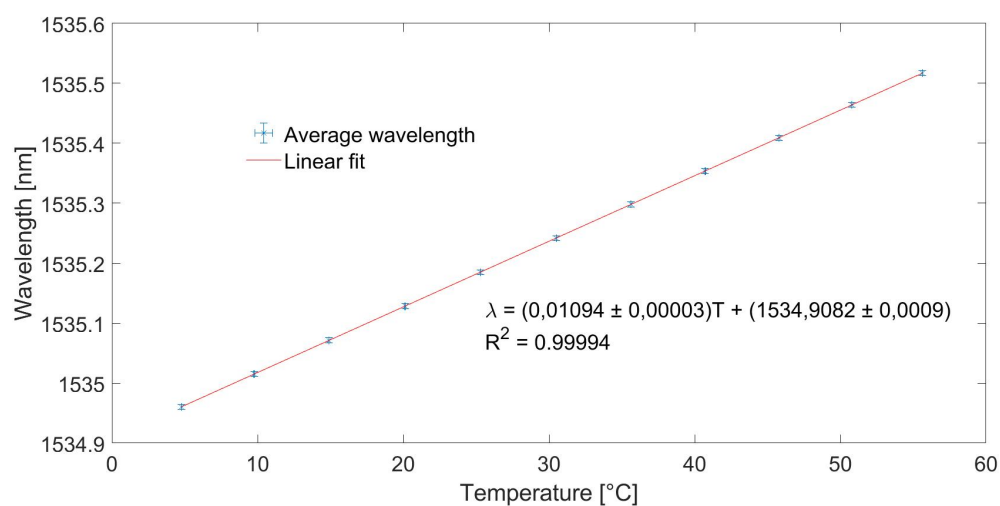


Figura 3.14. Fit lineare ottenuto dalle medie con barre d'errore.

<sup>7</sup>Quello rappresentato in figura 3.10 è l'istogramma relativo al livello di temperatura di 50°C.



Si vanno quindi a mettere a confronto le equazioni ottenute per i due fit:

$$\begin{cases} \lambda = (0,010945 \pm 0,000002)T + (1534,90783 \pm 0,00007) & (1) \\ \lambda = (0,01096 \pm 0,00001)T + (1534,9085 \pm 0,0007) & (2) \end{cases} ,$$

dove (1) rappresenta l'equazione del fit lineare ottenuta considerando tutti i punti rilevati dai sensori, mentre (2) rappresenta quella ottenuta considerando solo i punti di temperatura e lunghezza d'onda stabili.

Confrontando queste due equazioni evince il fatto che le due diverse tecniche di fitting offrono risultati molto simili, e quindi è possibile affermare che le due sono equivalenti.

Questo processo di calibrazione è stato effettuato per tutti i sensori del sistema I-Pipe installati sulle sezioni ENDCAP e HF-CT2, per un totale di 68 FBG.

Tutti i parametri di calibrazione sono riportati nell'appendice A, mentre i grafici di tutte le curve di calibrazione sono riportati nell'appendice C.

### 3.2.3 Ricalibrizioni

Spesso gli FBG disegnati e progettati per misurazioni di temperatura presentato un packaging intorno al reticolo, il quale migliora la conducibilità termica della fibra e assicura che, in qualsiasi modo venga maneggiata la fibra, il reticolo resti sempre libero da tensioni. I package di questi reticoli, però, hanno lo svantaggio di essere al quanto invasivi, il che va in contrasto con l'applicazione descritta. Per questo motivo si potrebbero utilizzare delle fibre "nude", ovvero prive di rivestimento.

Le fibre utilizzate nell'attuale progetto, per quanto riguarda le sezioni ENDCAP e HF-CT2, come visto nel Par.2.3, sono inserite in dei capillari d'acciaio. Questo comporta che una volta installate le fibre cambieranno le condizioni meccaniche delle stesse. In questo caso non verrà modificata la sensibilità (la quale dipende dal reticolo stesso), ma ci sarà uno shift della caratteristica della lunghezza d'onda.

Quindi, in seguito al processo di calibrazione dei sensori FBG effettuato prima dell'installazione, una volta che le fibre verranno messe sulla BP sarà necessario un processo di **ricalibrazione**, ovvero sarà necessario ricalcolare l'intercetta del fit lineare.

### 3.2.4 Risposta in temperatura

Al fine di analizzare la risposta in temperatura sono stati calcolati, tramite formula inversa, i valori di temperatura corrispondenti ad ogni valore di lunghezza d'onda dei sensori FBG:

$$\lambda = \alpha T^* + \lambda_0 \quad \rightarrow \quad T^* = \frac{\lambda - \lambda_0}{\alpha} . \quad (3.8)$$

In Fig.3.15, come esempio, è mostrato il confronto tra la risposta in temperatura del sensore FBG2 dell'array ENDCAP 3-1 (in rosso) e la temperatura misurata dal sensore RTD PT1000 (in blu):

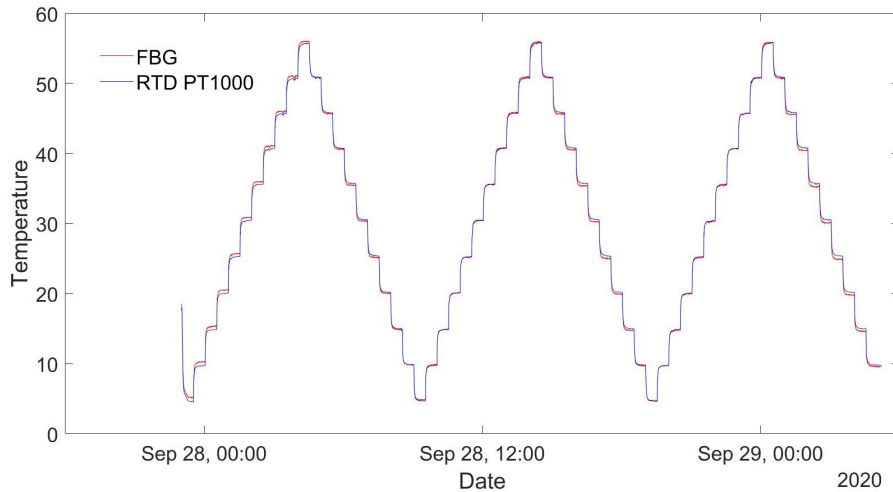


Figura 3.15. Risposta in temperatura del sensore ENDCAP 3-1 (FBG2) e del sensore RTD PT1000.

Per evidenziare la differenza nella risposta del FBG e del sensore RTD PT1000 in Fig.3.16 si può osservare uno zoom relativo al livello di temperatura di 10°C:

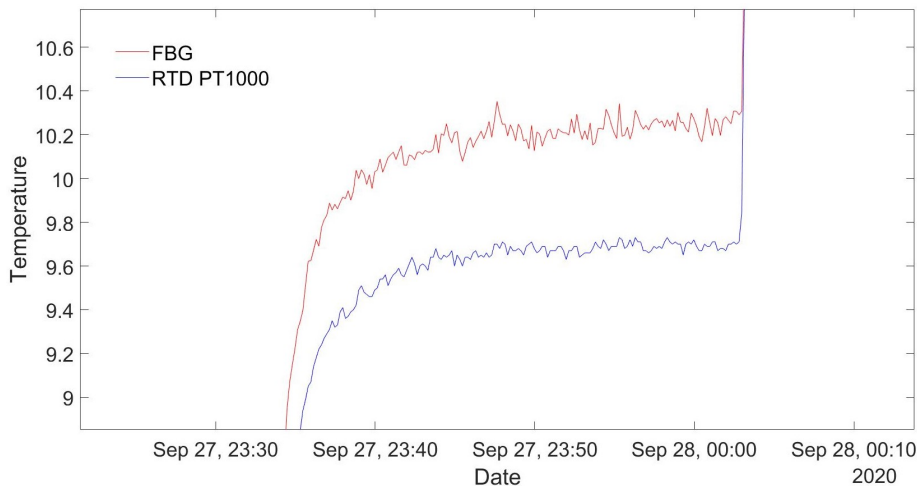


Figura 3.16. Risposta in temperatura del sensore ENDCAP 3-1 (FBG2) e del sensore RTD PT1000 relative al plateau di 10°C.

Ricordando che lo strumento tramite il quale si misurano i valori di lunghezza d'onda è un Micron Optics SM-225-800, che ha un'accuratezza di 1 pm, dati i parametri di intercetta e pendenza calcolati per ogni sensore, si ottiene l'errore sul valore di temperatura calcolato utilizzando la legge della propagazione delle incertezze<sup>8</sup>

Ad esempio, considerato il sensore ENDCAP 3-1 (FBG2) per cui si ha un valore di pendenza  $\alpha = (0,010945 \pm 0,000002) \frac{nm}{^{\circ}C}$  e un valore di intercetta pari a  $\lambda_0 = (1534,90783 \pm 0,00007) nm$ , con un valore di  $\lambda = (1535,02061 \pm 0,00007) nm$  si ottiene un valore di temperatura di  $(9,7100 \pm 0,015) ^{\circ}C$ , ovvero si ha un errore del 1,5% nella determinazione della temperatura.

---

<sup>8</sup>Per propagazione degli errori si intende l'effetto dell'errore (o variabilità) di un vettore di variabili aleatorie sull'errore associato ad una funzione di esso. Tali variabili, quando oggetto di rilevazione sperimentale, sono inoltre soggette a variabilità osservazionale dovuta a limitazioni nella misura (dovuta ad esempio alla precisione degli strumenti di misura), che si propaga alla funzione delle osservazioni.

# Conclusioni

Il lavoro svolto in questa attività tesi ha riguardato la calibrazione dei sensori FBG per il monitoraggio della temperatura della Beam Pipe dell'esperimento CMS al CERN.

In particolare sono stati calibrati 68 sensori FBG che costituiscono parte del nuovo sistema di monitoraggio I-Pipe della nuova Beam Pipe dell'esperimento CMS.

LHC è attualmente in fase di Long Shutdown 2. In questa fase al CMS è stata sostituita tutta la Beam Pipe. Di conseguenza, il sistema di monitoraggio I-Pipe, che era già operativo dal 2014, è stato riprogettato.

La Beam Pipe dell'esperimento CMS è suddivisa in sezioni. In particolare le due sezioni ENDCAP, le due sezioni HF-CT2 e la sezione Central sono monitorate dal sistema I-Pipe. Su ognuna di queste sezioni sono installate due fibre ottiche, ognuna contenente un dato numero di sensori. In questo lavoro mi sono occupato della calibrazione dei sensori installati sulle sezioni HF-CT2 ed ENDCAP, per un totale di 68 sensori FBG.

Al fine di ricavarne i parametri di calibrazione, i sensori FBG in questione sono stati inseriti in una camera climatica, nella quale è stata fatta variare opportunamente la temperatura. Tali misure di calibrazione sono state effettuate in un laboratorio al CERN. Sulla base dei dati acquisiti durante tali misurazioni, nel presente lavoro di tesi, ho sviluppato un algoritmo per ricavare i parametri che legano la lunghezza d'onda alla temperatura per ognuno dei 68 sensori FBG.

Partendo dai dati sperimentali, per ogni sensore sono state ricavate le curve di calibrazione ed è emerso che la curva che meglio rappresenta i dati è data da un polinomio di primo grado. Fit di ordine superiore, infatti, andrebbero soltanto ad aumentare la difficoltà computazionale senza aumentare significativamente la precisione della curva di fitting.

La validità del fit è stata provata attraverso valutazioni statistiche.

I sensori qui calibrati sono in fase di montaggio sulla Beam Pipe a partire dai mesi di ottobre-novembre 2020 e serviranno per acquisire dati di temperatura almeno per tutta la fase di Run 3 dell'LHC (quindi almeno fino al 2025).

I risultati del presente lavoro di tesi si inseriscono in una collaborazione tra l'Università degli Studi di Napoli "Federico II", l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e il CERN, che ha come obiettivo quello di progettare un sistema di monitoraggio per la Beam Pipe. I risultati ottenuti in questo lavoro hanno contribuito a tale obiettivo, determinando, per ogni sensore, la variazione della lunghezza d'onda di Bragg  $\lambda_B$  ad ogni variazione della temperatura.

# Appendice A

## Dati di calibrazione

### A.1 Parametri del fit lineare

	SENSOR	$\alpha$	$\sigma_A$	$\lambda_0$	$\sigma_B$	$R^2$
ENDCAP 3-1	1	0,011	0,00001	1529,881	0,0004	0,98999
	2	0,010945	0,000002	1534,908	0,00007	0,9996
	3	0,011025	0,000002	1539,868	0,00006	0,99969
	4	0,011052	0,000002	1544,847	0,00006	0,99972
	5	0,011128	0,000002	1549,882	0,00006	0,99969
	6	0,011162	0,000002	1554,854	0,00005	0,99978
	7	0,011237	0,000002	1559,85	0,00006	0,99975
	8	0,011196	0,000002	1564,756	0,00006	0,99974
ENDCAP 4-1	1	0,01102	0,00001	1527,331	0,0004	0,98979
	2	0,010955	0,000002	1532,353	0,0008	0,9995
	3	0,011	0,000002	1537,319	0,0006	0,99967
	4	0,011077	0,000002	1542,301	0,0007	0,99966
	5	0,011083	0,000002	1547,289	0,0006	0,9998
	6	0,01114	0,000002	1552,28	0,0006	0,99976
	7	0,011184	0,000002	1557,268	0,0006	0,99973
	8	0,011164	0,000002	1562,279	0,0005	0,9998
ENDCAP 3-2	1	0,011261	0,000009	1530,01	0,00029	0,99132
	2	0,010983	0,000002	1535,024	0,00006	0,99967
	3	0,011033	0,000002	1540,02	0,00005	0,99975
	4	0,011054	0,000002	1545,014	0,00005	0,99974
	5	0,011107	0,000001	1549,985	0,00005	0,99978
	6	0,011141	0,000001	1554,979	0,00004	0,99981
	7	0,011182	0,000001	1559,965	0,00004	0,99984
	8	0,011186	0,000001	1564,976	0,00004	0,99983
ENDCAP 4-2	1	0,010976	0,000001	1527,225	0,00004	0,99981
	2	0,011043	0,000002	1532,267	0,00008	0,99937
	3	0,011111	0,000002	1537,253	0,00005	0,99975
	4	0,011115	0,000001	1542,268	0,00005	0,99977
	5	0,011117	0,000001	1547,399	0,00004	0,99984

*Dati di calibrazione*

	6	0,011167	0,000002	1552,236	0,00005	0,99977
	7	0,011222	0,000001	1557,193	0,00004	0,99983
	8	0,011187	0,000001	1562,23	0,00004	0,99984
HF-CT2- 1-1	1	0,011267	0,000003	1529,804	0,00011	0,99908
	2	0,011266	0,000002	1534,8	0,00008	0,99952
	3	0,011303	0,000002	1539,797	0,00008	0,99956
	4	0,011384	0,000003	1544,813	0,00009	0,99947
	5	0,011436	0,000003	1549,782	0,00009	0,9994
	6	0,011513	0,000003	1554,795	0,00009	0,99944
	7	0,011579	0,000003	1559,76	0,00085	0,99945
	8	0,011583	0,000002	1564,745	0,00008	0,99959
	9	0,011542	0,000002	1569,712	0,00006	0,99976
HF-CT2- 1-2	1	0,011244	0,000003	1529,816	0,00012	0,99898
	2	0,011276	0,000002	1534,804	0,00008	0,99949
	3	0,011329	0,000002	1539,811	0,00008	0,99957
	4	0,011383	0,000003	1544,786	0,00009	0,99945
	5	0,011424	0,000002	1549,772	0,00008	0,99949
	6	0,0115	0,000003	1554,772	0,00009	0,99935
	7	0,011525	0,000002	1559,739	0,00008	0,99954
	8	0,011609	0,000002	1564,744	0,00007	0,99962
	9	0,011609	0,000002	1569,741	0,00005	0,99981
HF-CT2- 2-1	1	0,01134	0,000002	1527,3	0,00007	0,99957
	2	0,011341	0,000002	1532,301	0,00006	0,9997
	3	0,01137	0,000002	1537,298	0,00006	0,99976
	4	0,011454	0,000002	1542,284	0,00007	0,99958
	5	0,011466	0,000002	1547,293	0,00008	0,99953
	6	0,01156	0,000002	1552,265	0,00006	0,99975
	7	0,011527	0,000001	1557,258	0,00005	0,99985
	8	0,011552	0,000001	1562,274	0,00003	0,99991
	9	0,011524	0,000001	1567,246	0,00004	0,9999
HF-CT2- 2-2	1	0,011436	0,000003	1527,297	0,00009	0,99938
	2	0,011426	0,000002	1532,3	0,00008	0,99952
	3	0,011464	0,000002	1537,297	0,00008	0,99949
	4	0,01155	0,000003	1542,283	0,00009	0,99932
	5	0,011579	0,000003	1547,293	0,0001	0,99922
	6	0,011667	0,000002	1552,262	0,00008	0,99953
	7	0,011683	0,000002	1557,256	0,00008	0,9995
	8	0,011651	0,000002	1562,274	0,00006	0,99976
	9	0,011593	0,000002	1567,246	0,00006	0,99974

## A.2 Parametri del fit cubico

$$y = Ax^3 + Bx^2 + Cx + D$$

	SENSOR	A	B	C	D
ENDCAP 3-1	1	-0,000000255	0,000034517	0,009720404	1529,892443553
	2	-0,000000023	0,000007604	0,010556283	1534,912027179
	3	-0,000000048	0,000009534	0,010597870	1539,872740036
	4	-0,000000035	0,000009055	0,010611733	1544,852018085
	5	-0,000000085	0,000013872	0,010557758	1549,887838775
	6	-0,000000033	0,000009219	0,010708911	1554,858541609
	7	-0,000000080	0,000012783	0,010714920	1559,855307278
	8	-0,000000070	0,000012263	0,010671290	1564,761234367
ENDCAP 4-1	1	-0,000000254	0,000032259	0,009866926	1527,341505859
	2	-0,000000027	0,000006678	0,010637880	1532,355812271
	3	-0,000000055	0,000010668	0,010527905	1537,323624624
	4	-0,000000042	0,000009381	0,010640250	1542,305419768
	5	-0,000000022	0,000008131	0,010662896	1547,293847444
	6	-0,000000018	0,000008070	0,010710617	1552,284659723
	7	-0,000000001	0,000006034	0,010825206	1557,272488830
	8	-0,000000050	0,000009911	0,010720788	1562,283723088
ENDCAP 3-2	1	-0,000000519	0,000048511	0,009960199	1530,018844650
	2	-0,000000077	0,000013075	0,010442335	1535,028773914
	3	-0,000000009	0,000006216	0,010691076	1540,023983950
	4	-0,000000057	0,000011957	0,010516406	1545,018827244
	5	-0,000000082	0,000014445	0,010499651	1549,990576799
	6	-0,000000013	0,000008089	0,010703817	1554,983094128
	7	-0,000000068	0,000012660	0,010636777	1559,970330885
	8	-0,000000073	0,000013148	0,010622635	1564,981531124
ENDCAP 4-2	1	-0,000000851	0,000005186	0,010673844	1527,227757654
	2	-0,000000011	0,000005817	0,010732960	1532,270647589
	3	0,000000013	0,000001173	0,011000834	1537,254431564
	4	-0,000000042	0,000008029	0,010765488	1542,271362453
	5	-0,000000013	0,000006019	0,010800431	1547,402256582
	6	0,000000014	0,000003715	0,010907756	1552,239297630
	7	0,000000029	0,000000960	0,011079086	1557,194571107
	8	-0,000000014	0,000004983	0,010931851	1562,232676695
HF-CT2- 1-1	1	-0,000000079	0,000010881	0,010857408	1529,808114880
	2	-0,000000035	0,000007254	0,010937669	1534,803723458
	3	-0,000000020	0,000006950	0,010945006	1539,800411585
	4	-0,000000068	0,000010080	0,010986204	1544,816790155
	5	-0,000000077	0,000010643	0,011032196	1549,785829259
	6	-0,000000026	0,000005669	0,011250654	1554,797394126
	7	-0,000000073	0,000011617	0,011101411	1559,765145564
	8	-0,000000069	0,000011365	0,011110621	1564,749334703
	9	-0,000000006	0,000005769	0,011211048	1569,715957251

*Dati di calibrazione*

HF-CT2- 1-2	1	-0,000000059	0,000008501	0,010915972	1529,818962535
	2	-0,000000031	0,000006355	0,010991085	1534,806843936
	3	-0,000000061	0,000009644	0,010938575	1539,814416321
	4	-0,000000078	0,000011148	0,010954431	1544,790061010
	5	-0,000000031	0,000006276	0,011142495	1549,774919538
	6	-0,000000043	0,000007858	0,011161052	1554,775613980
	7	-0,000000078	0,000012038	0,011040966	1559,743426387
	8	-0,000000034	0,000007857	0,011239926	1564,747983418
	9	-0,000000032	0,000007454	0,011258216	1569,744362331
HF-CT2- 2-1	1	-0,000000038	0,000009163	0,010905110	1527,304401682
	2	-0,000000030	0,000007167	0,011003417	1532,304108152
	3	-0,000000034	0,000007572	0,011021116	1537,301554258
	4	-0,000000098	0,000014626	0,010880311	1542,289557759
	5	-0,000000044	0,000009253	0,011043999	1547,297744695
	6	-0,000000028	0,000006782	0,011237423	1552,267914474
	7	-0,000000018	0,000007514	0,011129853	1557,261934939
	8	-0,000000056	0,000010558	0,011092330	1562,278898889
	9	-0,000000058	0,000010317	0,011083764	1567,250679206
HF-CT2- 2-2	1	0,000000016	0,000005603	0,011046150	1527,301783867
	2	0,000000026	0,000001958	0,011228016	1532,302332921
	3	0,000000055	-0,000000433	0,011320540	1537,298764398
	4	-0,000000031	0,000008422	0,011141499	1542,287525584
	5	0,000000007	0,000004314	0,011298548	1547,296181300
	6	0,000000024	0,000003146	0,011402618	1552,264847849
	7	0,000000052	0,000001689	0,011420245	1557,259509017
	8	0,000000009	0,000004319	0,011364577	1562,277223340
	9	-0,000000006	0,000005676	0,011272034	1567,249277164



### A.3 Parametri del fit delle medie dei plateau

	SENSOR	$\alpha$	$\sigma_A$	$\lambda_0$	$\sigma_B$	$R^2$
ENDCAP 3-1	1	0,01101	0,00006	1529,881	0,002	0,99977
	2	0,01094	0,00003	1534,908	0,001	0,99994
	3	0,01102	0,00003	1539,869	0,001	0,99995
	4	0,01105	0,00003	1544,848	0,001	0,99994
	5	0,01112	0,00003	1549,882	0,001	0,99993
	6	0,01116	0,00003	1554,854	0,001	0,99994
	7	0,01123	0,00003	1559,851	0,001	0,99994
	8	0,01119	0,00003	1564,757	0,001	0,99994
ENDCAP 4-1	1	0,01104	0,00006	1527,331	0,002	0,99977
	2	0,01095	0,00003	1532,353	0,008	0,99996
	3	0,01100	0,00003	1537,319	0,001	0,99994
	4	0,01100	0,00003	1537,319	0,001	0,99996
	5	0,01109	0,00003	1547,289	0,001	0,99994
	6	0,01115	0,00003	1552,280	0,001	0,99993
	7	0,01118	0,00003	1557,269	0,001	0,99994
	8	0,01116	0,00003	1562,280	0,001	0,99994
ENDCAP 3-2	1	0,01114	0,00010	1530,015	0,004	0,99936
	2	0,01098	0,00004	1535,024	0,001	0,99991
	3	0,01104	0,00004	1540,020	0,001	0,99992
	4	0,01106	0,00004	1545,014	0,001	0,99991
	5	0,01111	0,00004	1549,985	0,001	0,99991
	6	0,01116	0,00004	1554,978	0,001	0,99992
	7	0,01118	0,00004	1559,966	0,001	0,99990
	8	0,01119	0,00003	1564,976	0,001	0,99992
ENDCAP 4-2	1	0,01098	0,00003	1527,225	0,001	0,99994
	2	0,01105	0,00003	1532,267	0,001	0,99995
	3	0,01111	0,00002	1537,253	0,001	0,99997
	4	0,01116	0,00002	1542,267	0,001	0,99997
	5	0,01112	0,00003	1547,399	0,001	0,99995
	6	0,01118	0,00003	1552,236	0,001	0,99993
	7	0,01123	0,00002	1557,193	0,001	0,99997
	8	0,01118	0,00002	1562,230	0,001	0,99996
HF-CT2- 1-1	1	0,01126	0,00002	1529,804	0,001	0,99997
	2	0,01126	0,00002	1534,800	0,001	0,99997
	3	0,01130	0,00002	1539,797	0,001	0,99996
	4	0,01138	0,00002	1544,813	0,001	0,99996
	5	0,01144	0,00002	1549,782	0,001	0,99996
	6	0,01151	0,00002	1554,795	0,001	0,99997
	7	0,01158	0,00002	1559,761	0,001	0,99996
	8	0,01157	0,00003	1564,745	0,001	0,99995
	9	0,01154	0,00002	1569,712	0,001	0,99996

*Dati di calibrazione*

---

HF-CT2- 1-2	1	0,01126	0,00002	1529,815	0,001	0,99998
	2	0,01130	0,00002	1534,803	0,001	0,99998
	3	0,01134	0,00002	1539,810	0,001	0,99998
	4	0,01138	0,00002	1544,786	0,001	0,99996
	5	0,01144	0,00002	1549,771	0,001	0,99998
	6	0,01150	0,00002	1554,772	0,001	0,99997
	7	0,01153	0,00002	1559,739	0,001	0,99996
	8	0,01161	0,00002	1564,744	0,001	0,99996
	9	0,01161	0,00002	1569,741	0,001	0,99997
HF-CT2- 2-1	1	0,01133	0,00003	1527,300	0,001	0,99994
	2	0,01134	0,00002	1532,301	0,001	0,99996
	3	0,01137	0,00002	1537,298	0,001	0,99997
	4	0,01145	0,00003	1542,285	0,001	0,99992
	5	0,01147	0,00003	1547,294	0,001	0,99995
	6	0,01156	0,00002	1552,265	0,001	0,99997
	7	0,01153	0,00003	1557,258	0,001	0,99994
	8	0,01155	0,00003	1562,275	0,001	0,99995
	9	0,01152	0,00002	1567,247	0,001	0,99996
HF-CT2- 2-2	1	0,01144	0,00003	1527,297	0,001	0,99992
	2	0,01143	0,00002	1532,300	0,001	0,99997
	3	0,01147	0,00002	1537,297	0,001	0,99996
	4	0,01156	0,00003	1542,283	0,001	0,99993
	5	0,01159	0,00002	1547,293	0,001	0,99996
	6	0,01167	0,00003	1552,262	0,001	0,99995
	7	0,01169	0,00003	1557,256	0,001	0,99993
	8	0,01165	0,00002	1562,274	0,001	0,99996
	9	0,01160	0,00002	1567,246	0,001	0,99996

# Appendice B

## Codice MATLAB

---

```
1  %CODICE MATLAB RELATIVO AL SENSORE ENDCAP 3-1 (FBG2)

3  close all
   clear all
5  clc

7  %Carico il file CSV
   Sensor = readtable('EndCap_31_2.csv');
9
   %Converto in una matrice
11 Sensor = table2array(Sensor);

13 %CONVERSIONE DEL FORMATO DATA
   unixtime = Sensor(:,1);
15 T = Sensor(:,5);
   data = datetime(unixtime,'ConvertFrom','posixtime');
17 lambda = Sensor(:,2);

19
   %-----%
21

23 %GRAFICI T-DATA E L-DATA
   %{
25 figure1 = figure('WindowState','maximized');
   axes1 = axes('Parent',figure1);
27 plot(data,T,'b','linewidth',1);
   xlabel('Date');
29 ylabel('Temperature [ C ]','fontsize',12);
   axis square
31 set(axes1,'FontSize',18);
   figure
33 figure2 = figure('WindowState','maximized');
   axes2 = axes('Parent',figure2);
35 plot(data,lambda,'r','linewidth',1);
```

```

    xlabel('Date');
37 ylabel('Wavelength [nm]', 'fontsize', 12);
    axis square
39 set(axes2, 'FontSize', 18);
    %}
41
42 %GRAFICI LAMBDA-t E T-t SOVRAPPOSTI
43 %{
    [Axis, h1, h2] = plotyy(data, T, data, lambda);
45 xlabel(Axis(1), 'Date', 'fontsize', 11)
    ylabel(Axis(1), 'Temperature', 'fontsize', 11);
47 set(Axis(1), 'FontSize', 18);
    set(Axis(2), 'ylim', [1534.9 1535.55], 'FontSize', 18);
49 ylabel(Axis(2), 'Wavelength', 'fontsize', 18);
    %}
51
52 %-----%
53
54
55 %FIT LINEARE
56
57 p = polyfit(T, lambda, 1);
    B = p(2);
59 A = p(1);
    fprintf('\nY = Ax + B\n');
61 format long
    fprintf('A = ');
63 disp(A);
    fprintf('B = ');
65 disp(B);
66
67 %y1 = polyval(p, T);
    y1 = A*T + B;
69
70
71 %{
    figure1 = figure('WindowState', 'maximized');
73 axes1 = axes('Parent', figure1);
    plot(T, lambda, 'c+');
75 hold on
    plot(T, y1, 'k', 'linewidth', 2);
77 xlabel('Temperature [ C ]');
    ylabel('Wavelength [nm]', 'fontsize', 12);
79 %axis square;
    %title(['\fontsize{14}', 'y = ', num2str(A), ' X + ', num2str(B)]);
81 set(axes1, 'FontSize', 18);
    %}
83

```

```

85 %COEFFICIENTE DI DETERMINAZIONE
Rsq1 = 1 - sum((y1 - lambda).^2)/sum((lambda - mean(lambda)).^2);
87 fprintf('\nR^2_□=');
disp(Rsq1);
89

91 %ERRORI SULLA PENDENZA E SULL'INTERCETTA
vary = (sum((lambda-B-A*T).^2))/(length(lambda)-2);
93
%y = ax + b;
95 vara = (length(T)*vary)/(length(T)*sum(T.^2)-(sum(T).^2));
erra = sqrt(vara);
97 fprintf('\nerr(A)_□=');
disp(erra);
99
varb = vary*sum(T.^2)/(length(T)*sum(T.^2)-(sum(T).^2));
101 errb = sqrt(varb);
fprintf('\nerr(B)_□=');
103 disp(errb);

105
%CHI QUADRO
107 c2 = chi2gof(lambda);
fprintf('\nX^2:');
109 disp(c2);

111
%-----%
113

115 %FIT CUBICO
p2 = polyfit(T,lambda,3);
117 fprintf('\nParametri_□del_□fit_□cubico:');
disp(p2);
119 %y2 = polyval(p,T);
y2 = p2(1)*T.^3 + p2(2)*T.^2 + p2(3)*T + p2(4);
121

%{
123 figure1 = figure('WindowState','maximized');
axes1 = axes('Parent',figure1);
125 plot(T,lambda,'c+');
hold on
127 plot(T,y2,'k','linewidth',3);
xlabel('Temperature_□[ C ]');
129 ylabel('Wavelength_□[nm]','fontsize',12);
hold on
131 plot(T,y1,'r','linewidth',2)
%axis square;
133 set(axes1,'FontSize',18);

```

```

    %}
135
%Confronto fit lineare e fit cubico
137 %{
    figure1 = figure('WindowState','maximized');
139 axes1 = axes('Parent',figure1);
    plot(T,lambda,'c+');
141 hold on
    plot(T,y1,'b','linewidth',4);
143 hold on
    plot(T,y2,'r','linewidth',2);
145 xlabel('Temperature [ C ]');
    ylabel('Wavelength [nm]', 'fontsize',12);
147 set(axes1,'FontSize',18);
    %}
149
151
%-----%
153
155 %CONSIDERO SOLTANTO I PLATEAU
Matrix = Sensor;
157 data2 = Matrix(:,1);

159 x = 0.001; %pendenza di soglia

161 %Elimino i tratti che hanno pendenza maggiore di x
(elimino i transienti)
163 %%{
    for i = length(T):-1:2
165         if (((T(i)-T(i-1))./(unixtime(i)-unixtime(i-1))) > x) ||
            (((T(i)-T(i-1))./(unixtime(i)-unixtime(i-1))) < -x)
167             Matrix(i,:) = [];
        else
169             Matrix(i,:) = Sensor(i,:);
        end
171     end
    %}
173
T2 = Matrix(:,5);
175 L2 = Matrix(:,2);
unixtime2 = Matrix(:,1);
177 data2 = datetime(unixtime2,'ConvertFrom','posixtime');

179 %Grafici di temperatura e lunghezza d'onda al variare del tempo
(plateau)
181 %{
    figure1 = figure('WindowState','maximized');

```

```

183 axes1 = axes('Parent',figure1);
disp(size(Matrix));
185 plot(data2,T2,'bx');
ylabel('Temperature [ C ]');
187 xlabel('Date','fontsize',12);
set(axes1,'FontSize',18);
189 figure
figure2 = figure('WindowState','maximized');
191 axes2 = axes('Parent',figure2);
plot(data2,L2,'rx');
193 xlabel('Date');
ylabel('Wavelength [nm]','fontsize',12);
195 set(axes2,'FontSize',18);
%}
197

199 %Adesso metto i valori di ogni plateau in un vettore della matrice

201 %Ordino i vettori T2 e L2 in ordine crescente
T2=sort(T2);
203 L2=sort(L2);

205 %Divido i vettori T2 e L2 in sottovettori ragionando sulla differenza
%di temperatura tra due punti successivi (passaggio da un livello di
207 %temperatura o lunghezza d'onda ad un altro
max=length(T2)-1 ;
209
for i=1:1:max
211 diff= T2(i+1)- T2(i) ;
if(diff>-1 & diff<1)
213 x(i)=1 ;
end
215 end
h=1 ;
217
for j=1:1:max
219 if(x(j)==1)
MatT(j,h)=T2(j) ;
221 MatL(j,h)=L2(j);
MatD(j,h)=unixtime2(j);
223 else (x(j)==0)
MatT(j,h)=T2(j);
225 MatL(j,h)=L2(j);
MatD(j,h)=unixtime2(j);
227 h=h+1;
end
229 end

231 %Elimino le colonne che hanno pochi punti (punti spuri)

```

```

for k=size(MatT,2):-1:1
233     if(nnz(MatT(:,k))<5)
           MatT(:,k) = [];
235         MatL(:,k) = [];
           MatD(:,k) = [];
237     end
end
239
%Sostituisco gli zeri con dei null
241 MatT(MatT==0)=NaN;
    MatL(MatL==0)=NaN;
243 MatD(MatD==0)=NaN;

245 %Calcolo le medie e le deviazioni standard per ogni livello di
    temperatura e lunghezza d'onda
247 for l=1:1:size(MatT,2)
           MatMedieT(l)=(mean(MatT(:,l),'omitnan'));
249         DevMedieT(l)=sqrt(var(MatT(:,l),'omitnan'));
           MatMedieL(l)=(mean(MatL(:,l),'omitnan'));
251         DevMedieL(l)=sqrt(var(MatL(:,l),'omitnan'));
end
253

255 %Faccio il fit lineare usando le medie
    X = MatMedieT;
257 Y = MatMedieL;

259 P = polyfit(X,Y,1);
    A2 = P(1);
261 B2 = P(2);
    fprintf('\n0ra_si_considerano_soltanto_i_plateau.\n');
263 fprintf('\nY=A2X+B2\n');
    fprintf('\nA2=');
265 disp(P(1));
    fprintf('\nB2=');
267 disp(P(2));

269 %Y1 = polyval(P,X);
    Y1 = A2*X + B2;
271
    varY = (sum((Y-B2-A2*X).^2))/(length(Y)-2);
273
    %Y = A2X + B2;
275 varA = (length(X)*varY)/(length(X)*sum(X.^2)-(sum(X).^2));
    errA = sqrt(varA);
277 fprintf('\nerr(A2)=');
    disp(errA);
279
    varB = varY*sum(X.^2)/(length(X)*sum(X.^2)-(sum(X).^2));

```



```

281 errB = sqrt(varB);
    fprintf('\nerr(B2) = ');
283 disp(errB);

285
    %{
287     figure1 = figure('WindowState','maximized');
        axes1 = axes('Parent',figure1);
289 plot(X,Y,'bx');
        errorbar(X,Y1,DevMedieL,'both','x');
291 hold on
        plot(X,Y1,'r');
293 xlabel('Temperature [ C ]', 'fontsize',12);
        ylabel('Wavelength [nm]', 'fontsize',12);
295     %axis square
        set(axes1,'FontSize',18);
297     %title(['\fontsize{14}', 'y = ', num2str(A), ' X + ', num2str(B)]);
    %}

299
    %COEFFICIENTE DI DETERMINAZIONE DEL NUOVO FIT
301 Rsq = 1 - sum((Y1 - Y).^2)/sum((Y - mean(Y)).^2);
    fprintf('\nR^2 = ');
303 disp(Rsq);

305
    %Visualizzo la distribuzione statistica delle misure per un solo
307 plateau

309
    %{
311 plot(MatD(:,2),MatT(:,2),'bx');
        xlabel('Data_e_ora', 'fontsize',12);
        ylabel('Temperatura [ C ]', 'fontsize',12);
313 %}

315
    %Istogrammi
    %{
317 histogram(T,500);
        ylabel('Numero_punti_di_misurazione', 'fontsize',12);
319 xlabel('Temperatura [ C ]', 'fontsize',12);
    %}

321
    %{
323 histogram(MatT(:,10));
        ylabel('Number_of_measurement_points', 'fontsize',12);
325 xlabel('Temperature [ C ]', 'fontsize',12);
    %}

327
    %-----%
329

```

```
%VERIFICA SENSORE TEMPERATURA
331 Temp = (lambda - B2)/A2;

333 dev_std_lambda = 1*10^(-3);

335 sigma_diff = sqrt((dev_std_lambda)^2+varB);

337
for i=1:length(Temp)
339 sigma_temp(i,:) = Temp(i)*(((sigma_diff)/(lambda(i)-B2))+(errA/A2));
end
341

343 %Grafico la risposta in temperatura del FBG
%{
345 figure1 = figure('WindowState','maximized');
axes1 = axes('Parent',figure1);
347 plot(data,Temp);
xlabel(axes1,'Date','fontsize',11)
349 ylabel(axes1,'Temperature','fontsize',11);
set(axes1,'fontsize',18);
351 %}

353 %Confronto tra temperatura misurata dal FBG e temperatura misurata
%dal PT1000
355 %{
figure1 = figure('WindowState','maximized');
357 axes1 = axes('Parent',figure1);
plot(data,Temp,'r');
359 hold on
plot(data,T,'b');
361 xlabel(axes1,'Date','fontsize',11)
ylabel(axes1,'Temperature','fontsize',11);
363 set(axes1,'fontsize',18);
%}
```

---

# Appendice C

## Curve di calibrazione

### C.1 HF-CT2-1-1

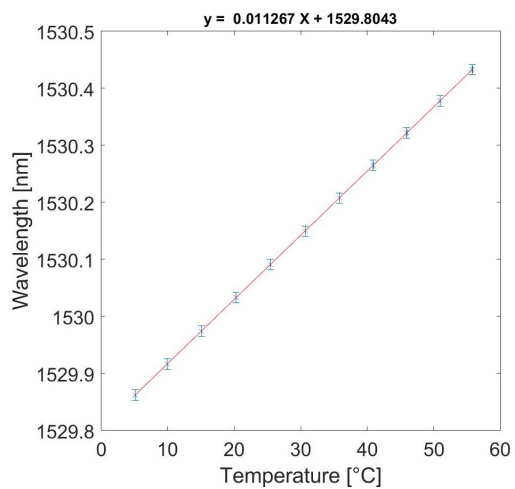


Figura C.1. HF-CT2-1-1 (1)

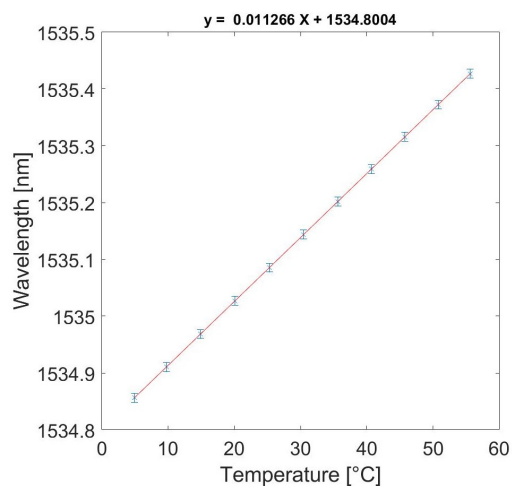


Figura C.2. HF-CT2-1-1 (2)

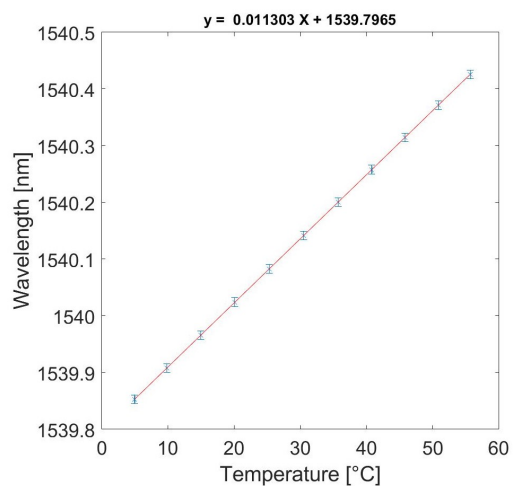


Figura C.3. HF-CT2-1-1 (3)

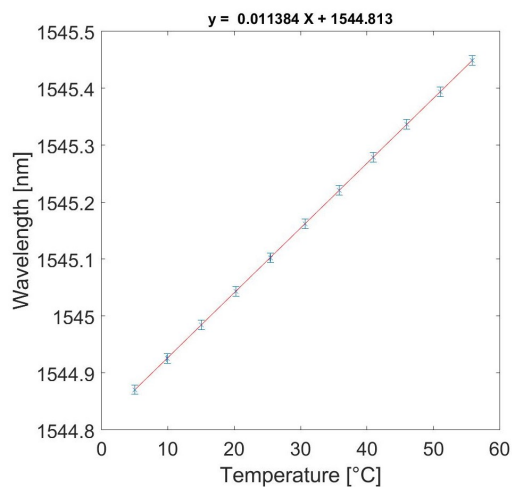


Figura C.4. HF-CT2-1-1 (4)

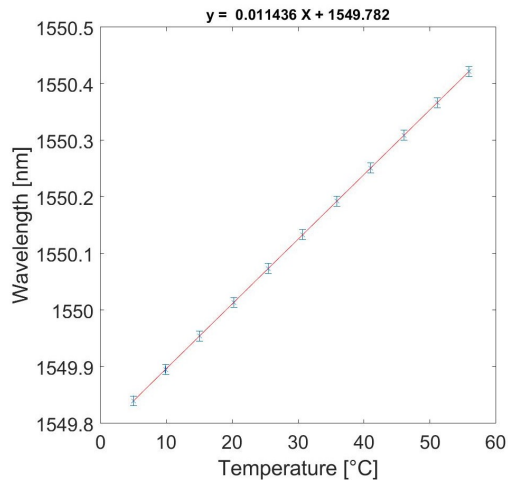


Figura C.5. HF-CT2-1-1 (5)

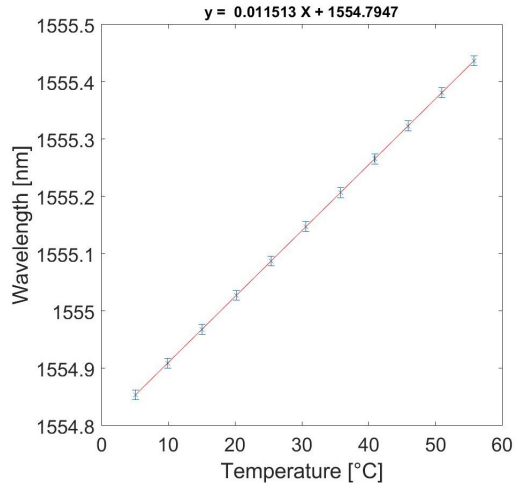


Figura C.6. HF-CT2-1-1 (6)

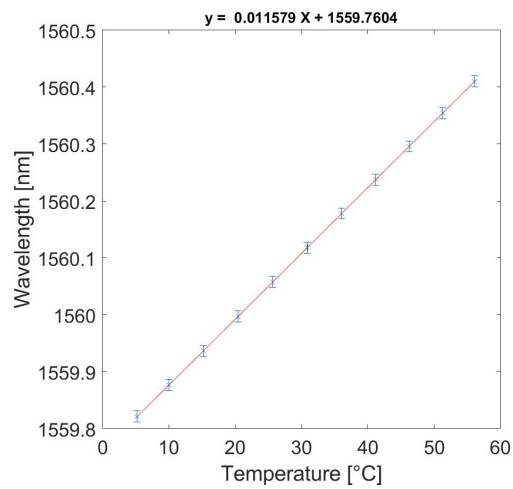


Figura C.7. HF-CT2-1-1 (7)

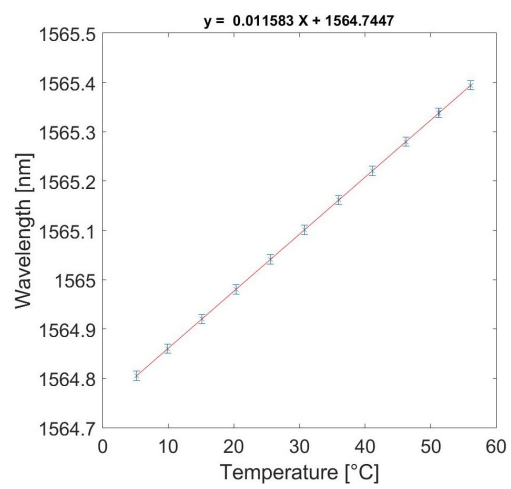


Figura C.8. HF-CT2-1-1 (8)

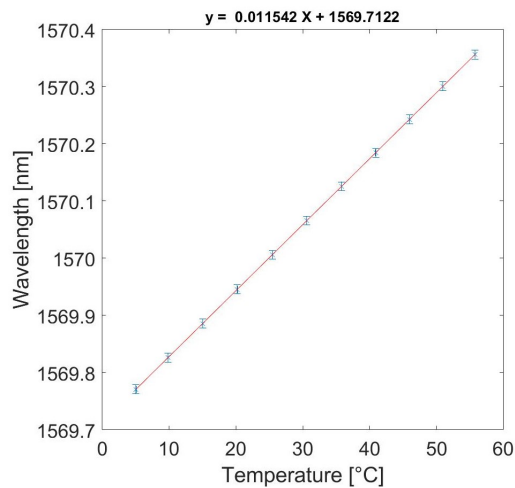


Figura C.9. HF-CT2-1-1 (9)

## C.2 HF-CT2-1-2

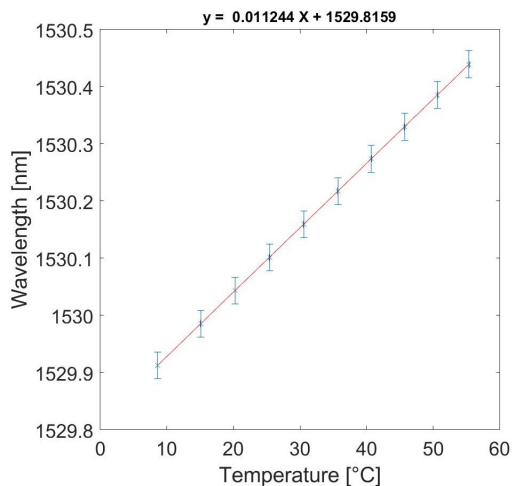


Figura C.10. HF-CT2-1-2 (1)

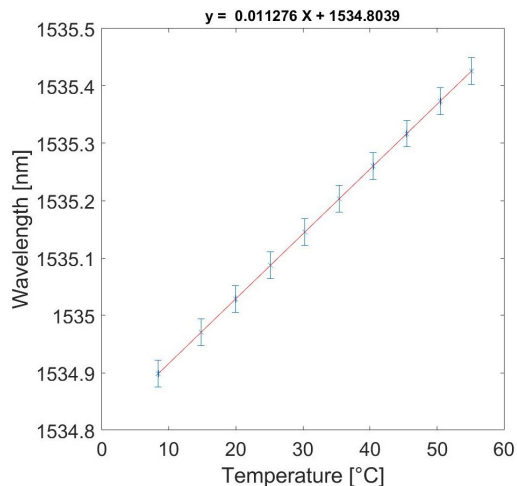


Figura C.11. HF-CT2-1-2 (2)

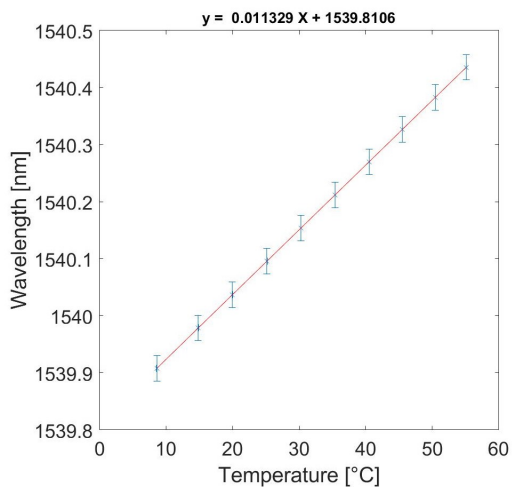


Figura C.12. HF-CT2-1-2 (3)

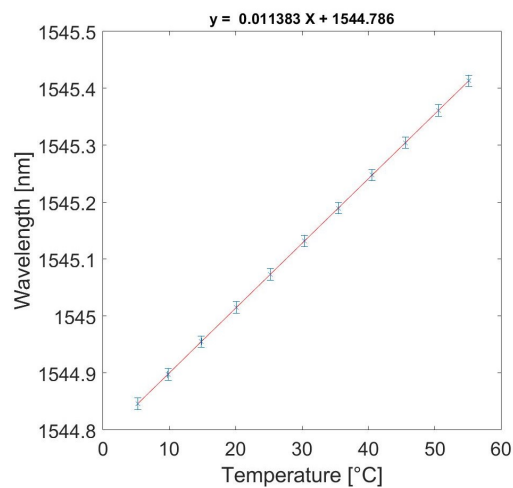


Figura C.13. HF-CT2-1-2 (4)

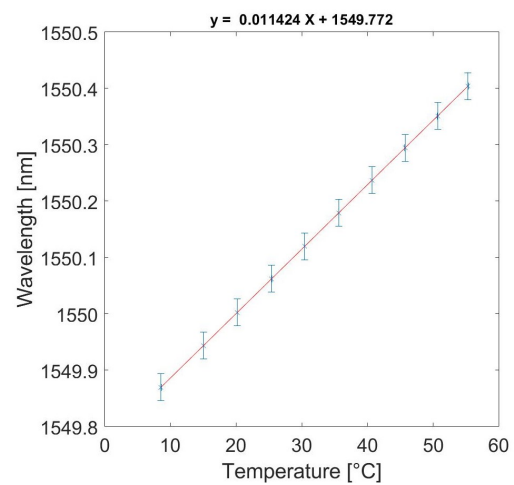


Figura C.14. HF-CT2-1-2 (5)

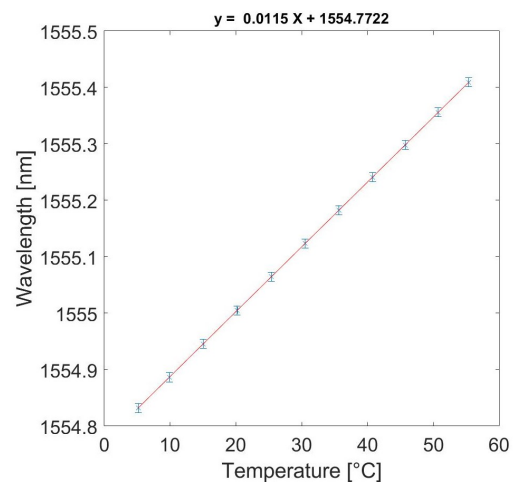


Figura C.15. HF-CT2-1-2 (6)

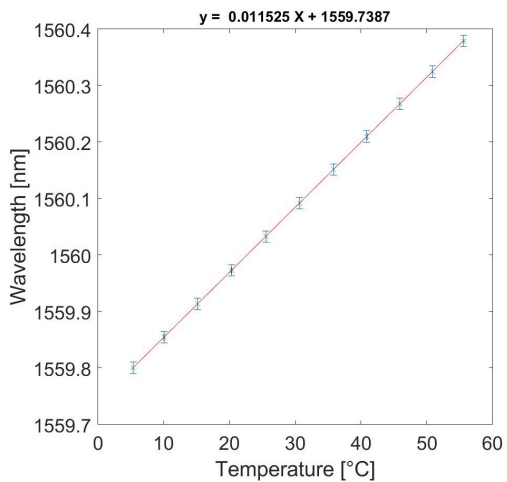


Figura C.16. HF-CT2-1-2 (7)

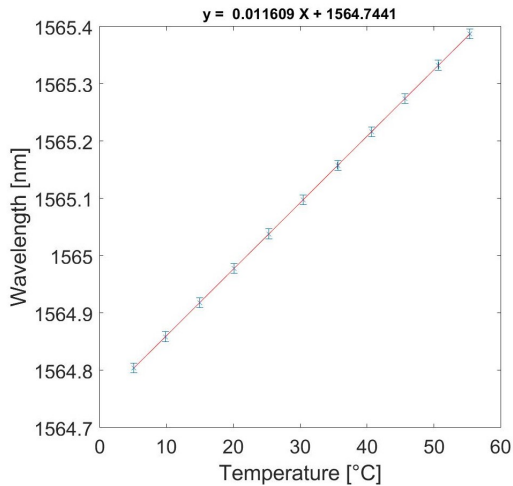


Figura C.17. HF-CT2-1-2 (8)

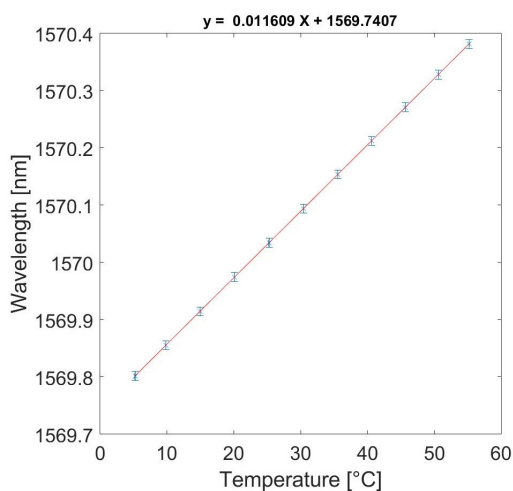


Figura C.18. HF-CT2-1-2 (9)

### C.3 HF-CT2-2-1

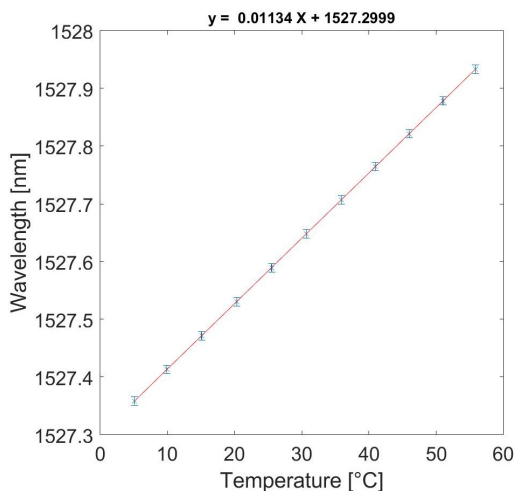


Figura C.19. HF-CT2-2-1 (1)

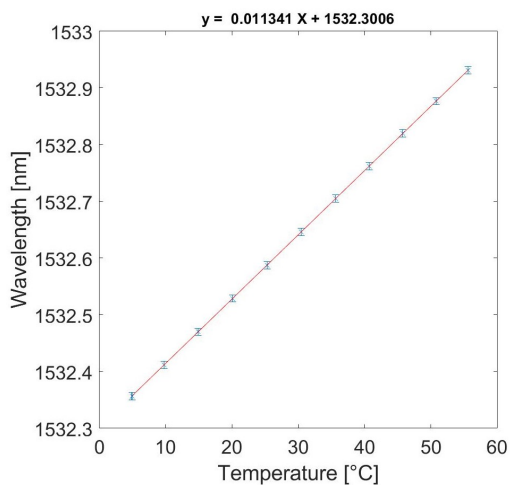


Figura C.20. HF-CT2-2-1 (2)

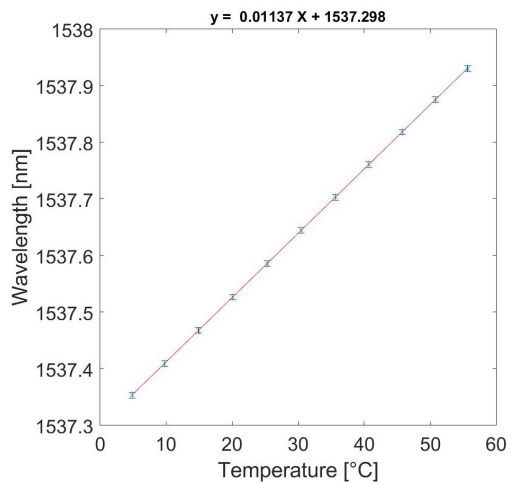


Figura C.21. HF-CT2-2-1 (3)

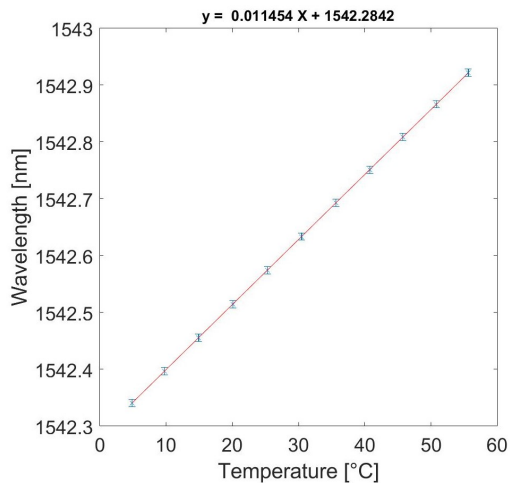


Figura C.22. HF-CT2-2-1 (4)

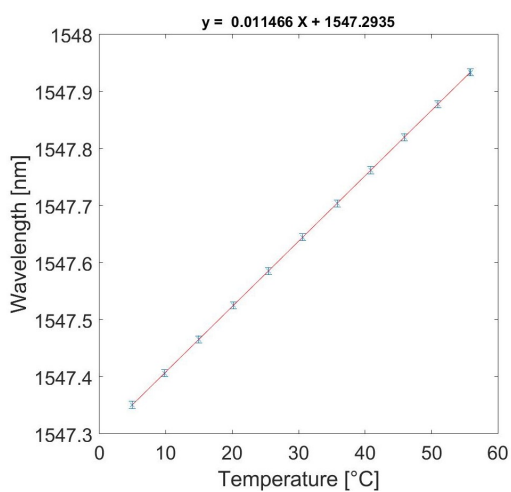


Figura C.23. HF-CT2-2-1 (5)

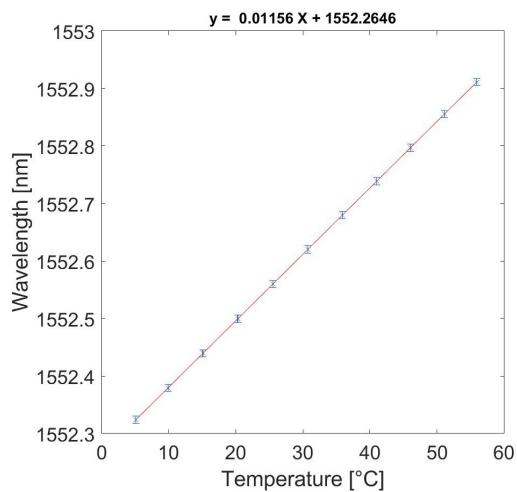


Figura C.24. HF-CT2-2-1 (6)

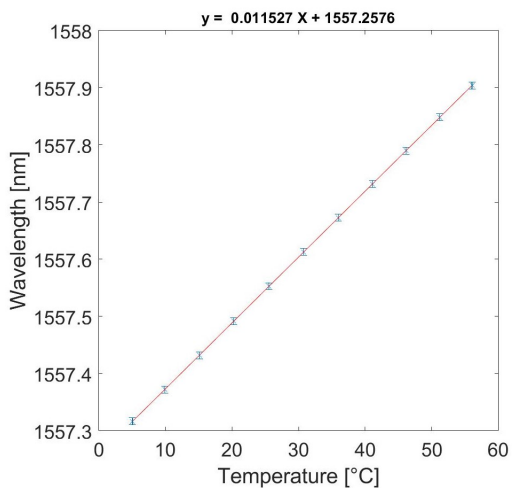


Figura C.25. HF-CT2-2-1 (7)

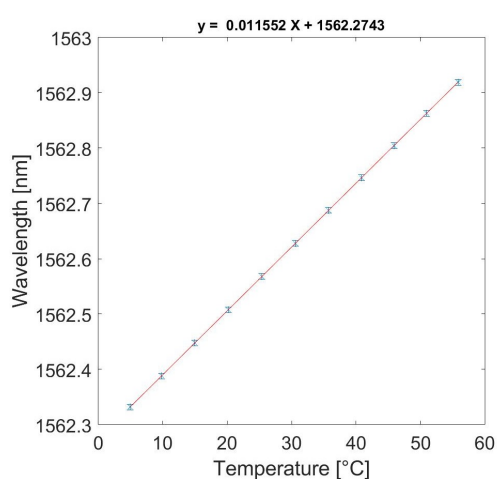


Figura C.26. HF-CT2-2-1 (8)

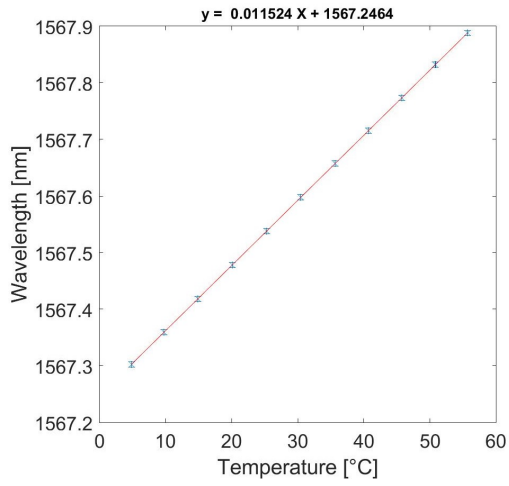


Figura C.27. HF-CT2-1-1 (9)

## C.4 HF-CT2-2-2

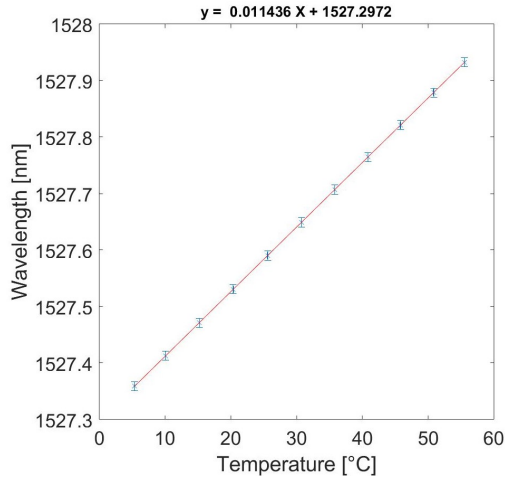


Figura C.28. HF-CT2-2-2 (1)

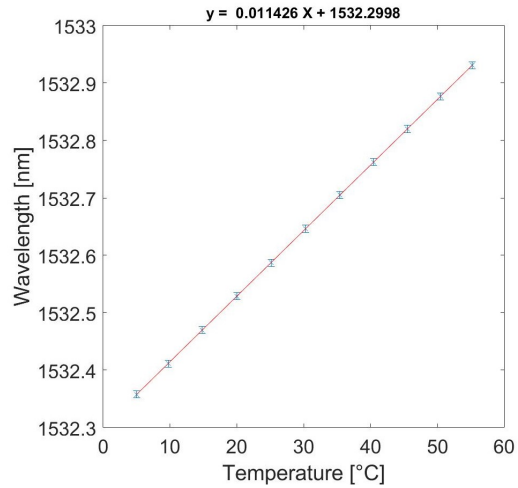


Figura C.29. HF-CT2-2-2 (2)

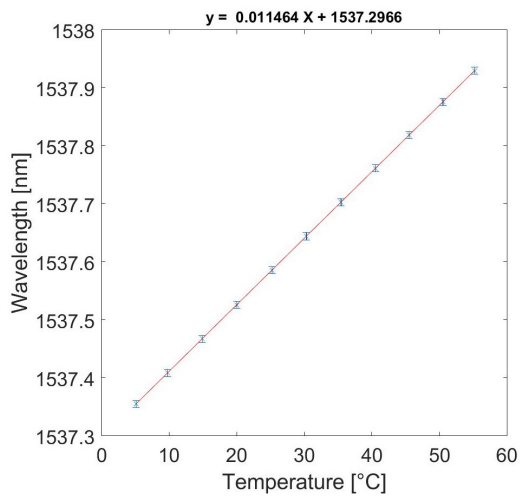


Figura C.30. HF-CT2-2-2 (3)

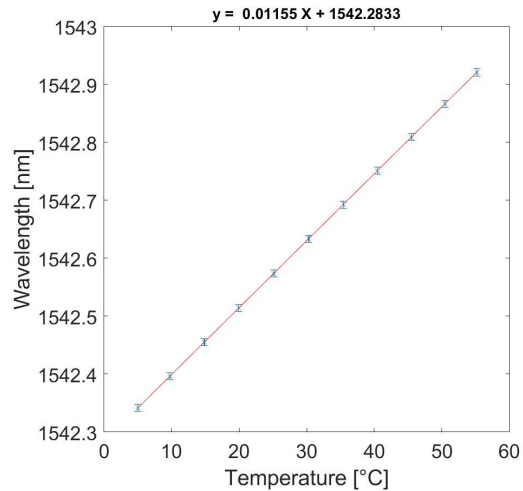


Figura C.31. HF-CT2-2-2 (4)



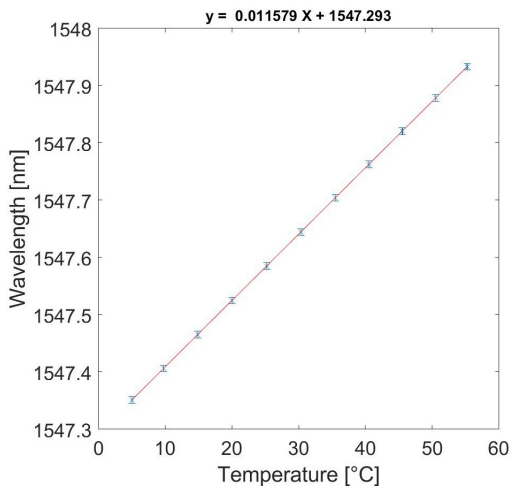


Figura C.32. HF-CT2-2-2 (5)

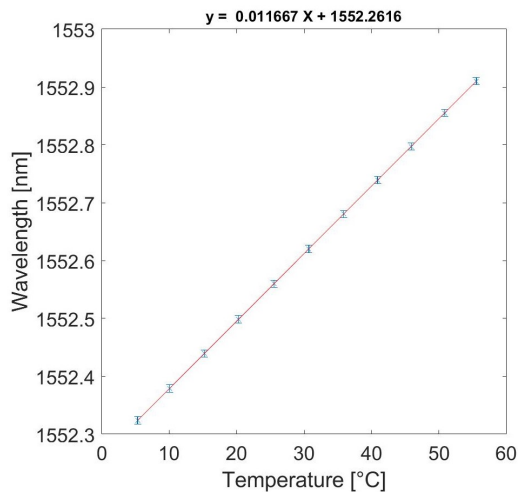


Figura C.33. HF-CT2-2-2 (6)

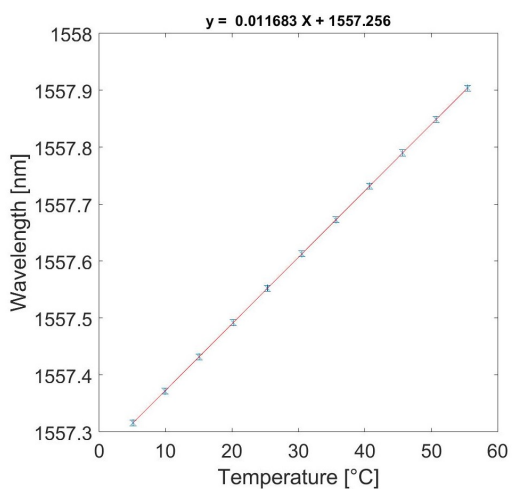


Figura C.34. HF-CT2-2-2 (7)

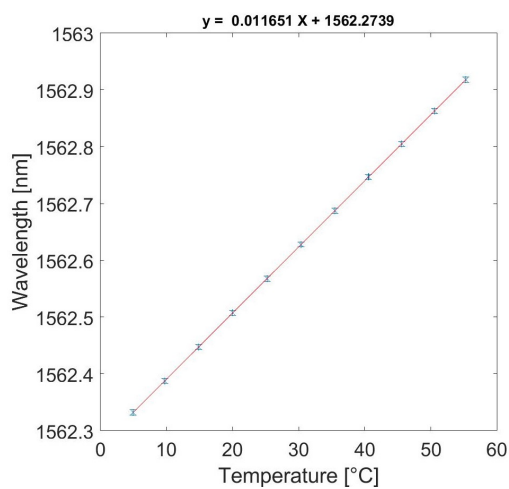


Figura C.35. HF-CT2-2-2 (8)

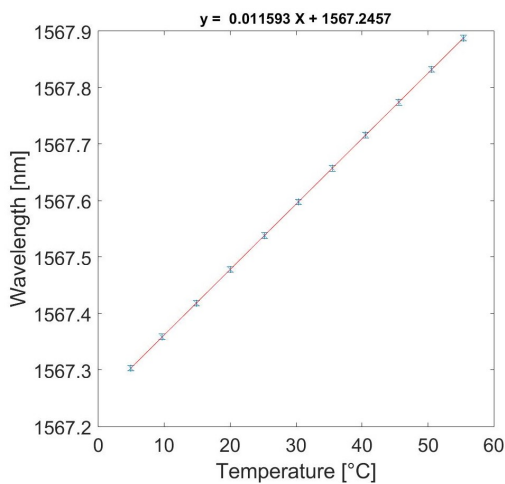


Figura C.36. HF-CT2-2-2 (9)

## C.5 ENDCAP 3-1

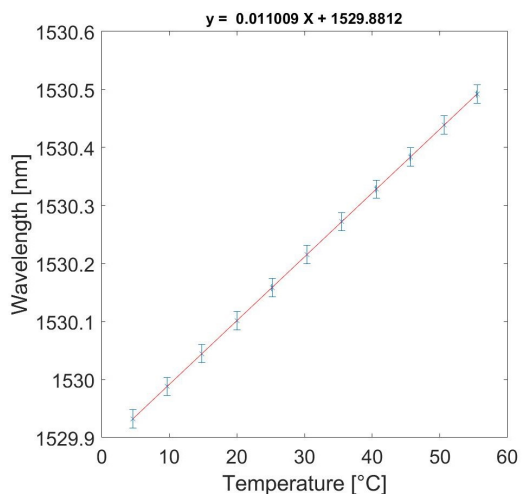


Figura C.37. ENDCAP 3-1 (1)

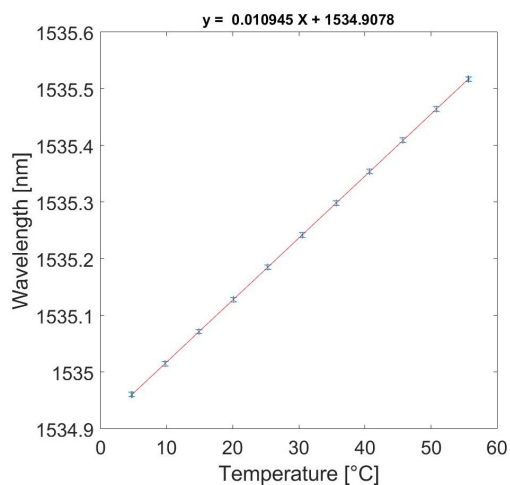


Figura C.38. ENDCAP 3-1 (2)

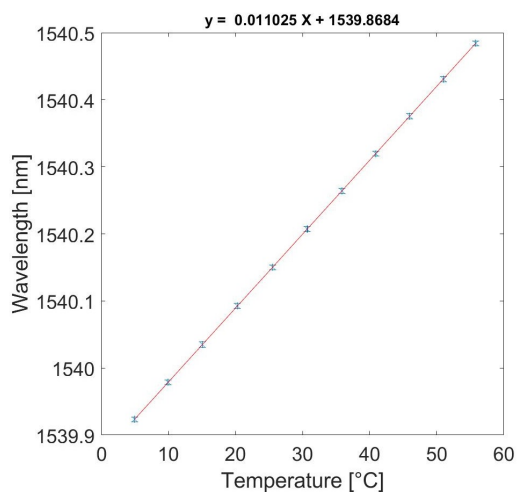


Figura C.39. ENDCAP 3-1 (3)

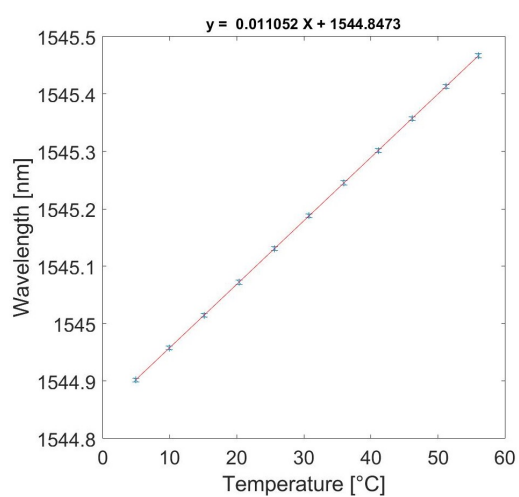


Figura C.40. ENDCAP 3-1 (4)

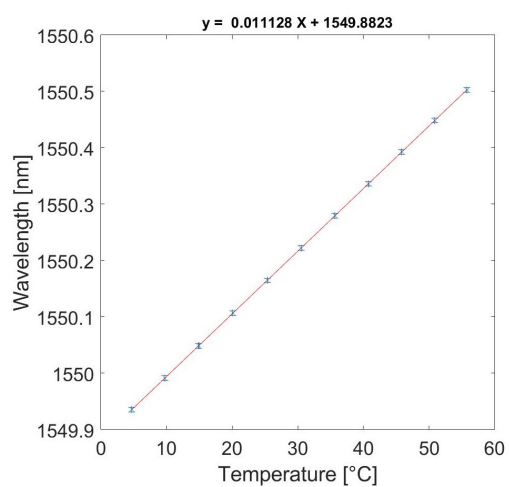


Figura C.41. ENDCAP 3-1 (5)

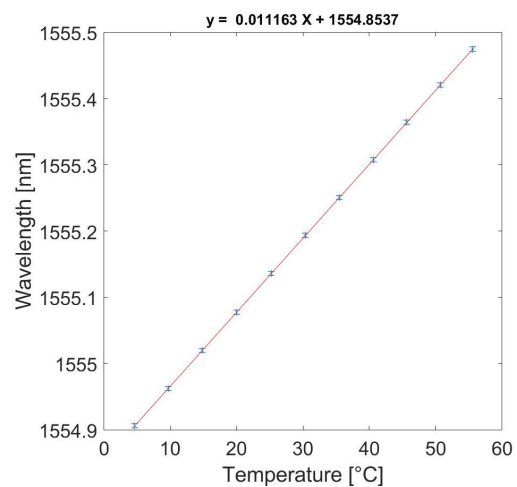


Figura C.42. ENDCAP 3-1 (6)

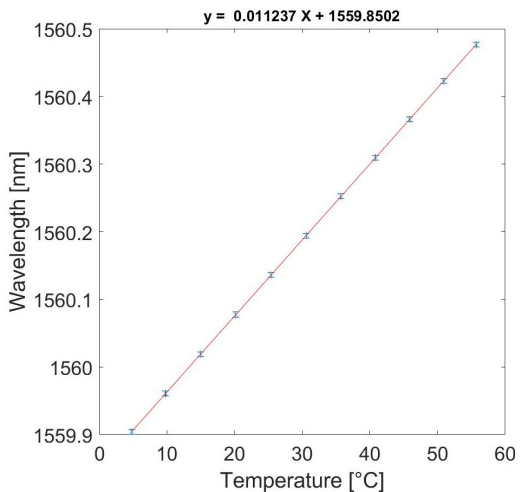


Figura C.43. ENDCAP 3-1 (7)

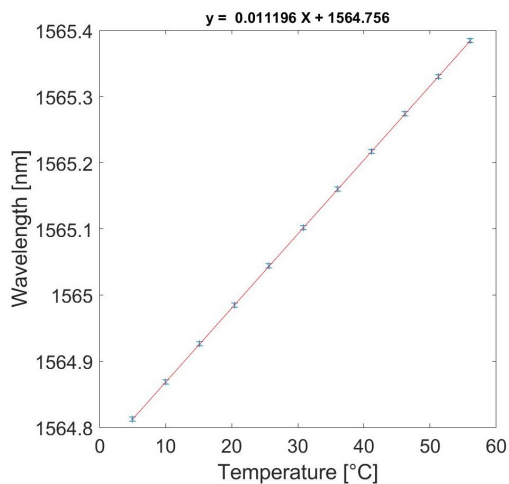


Figura C.44. ENDCAP 3-1 (8)

## C.6 ENDCAP 3-2

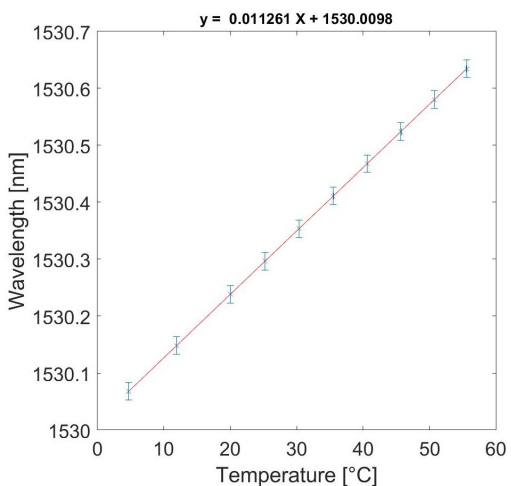


Figura C.45. ENDCAP 3-2 (1)

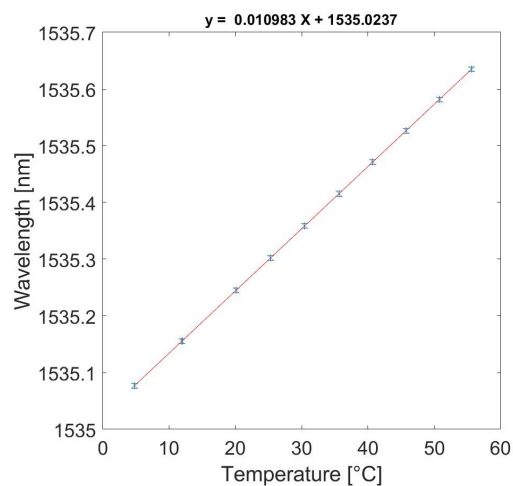


Figura C.46. ENDCAP 3-2 (2)

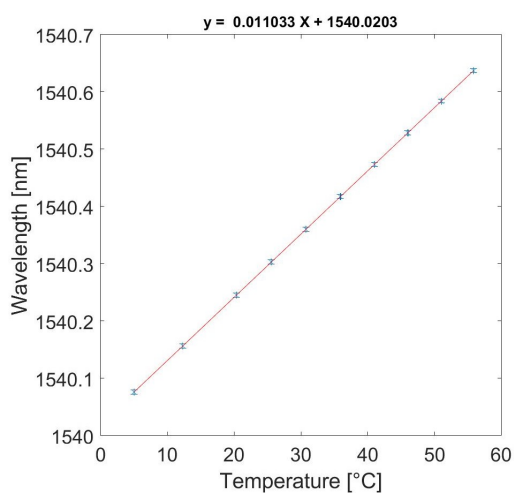


Figura C.47. ENDCAP 3-2 (3)

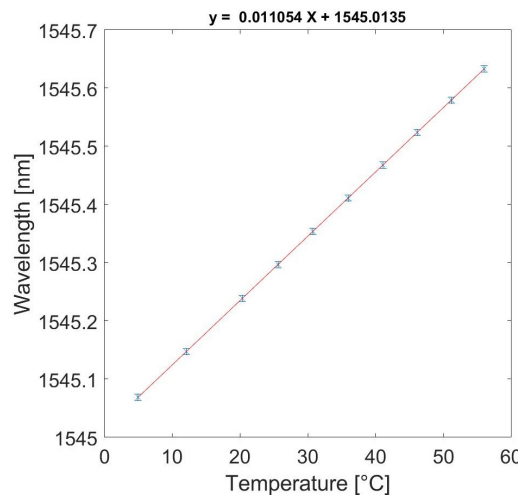


Figura C.48. ENDCAP 3-2 (4)

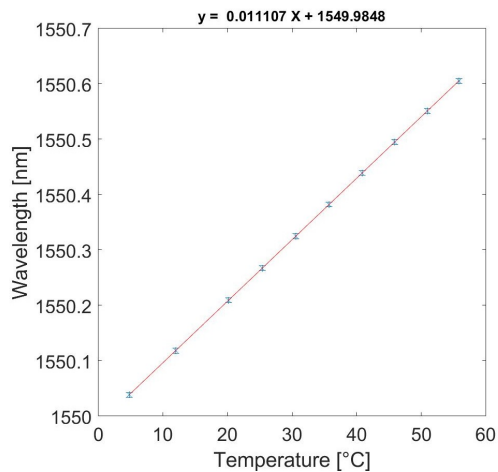


Figura C.49. ENDCAP 3-2 (5)

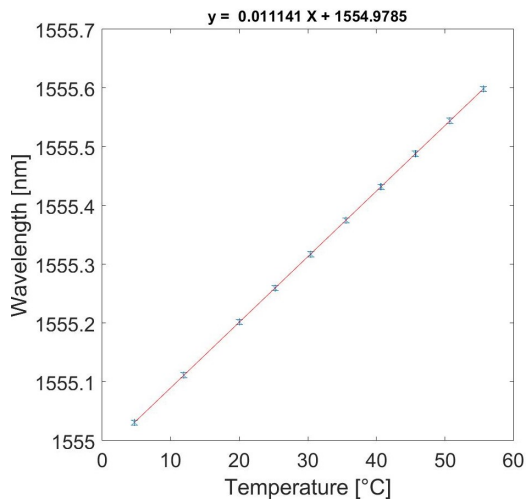


Figura C.50. ENDCAP 3-2 (6)

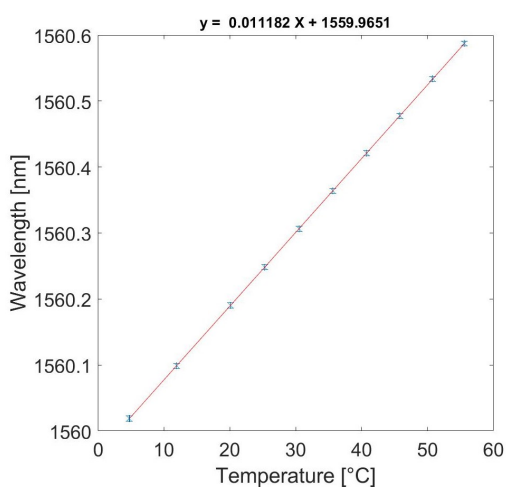


Figura C.51. ENDCAP 3-2 (7)

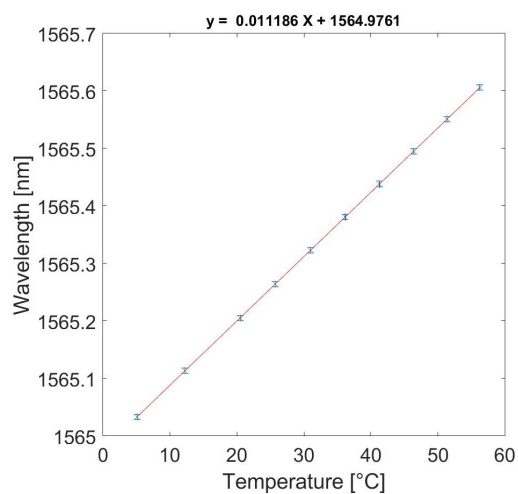


Figura C.52. ENDCAP 3-2 (8)

## C.7 ENDCAP 4-1

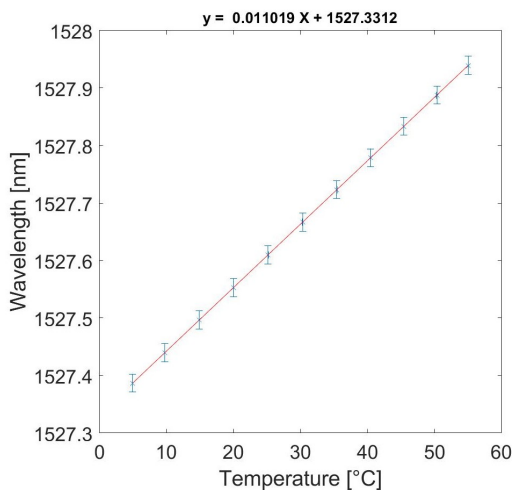


Figura C.53. ENDCAP 4-1 (1)

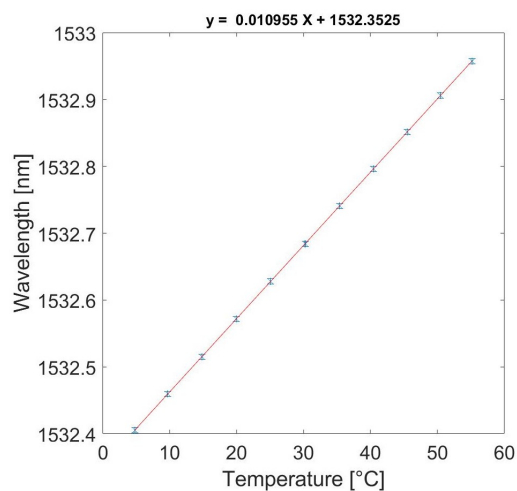


Figura C.54. ENDCAP 4-1 (2)

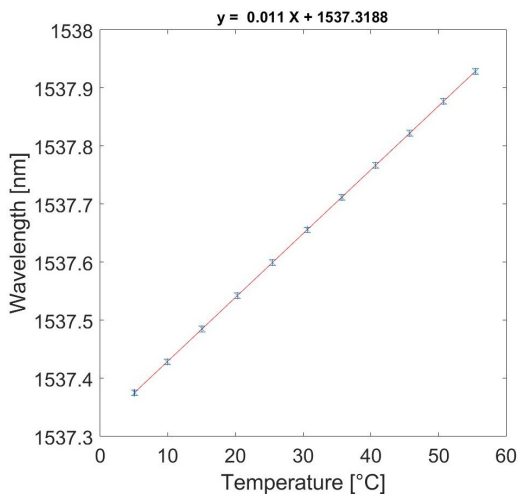


Figura C.55. ENDCAP 4-1 (3)

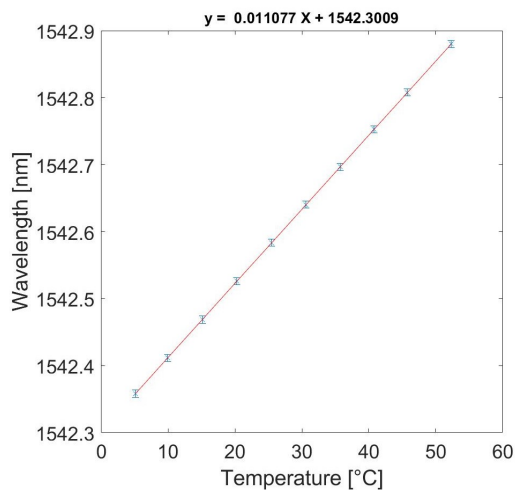


Figura C.56. ENDCAP 4-1 (4)

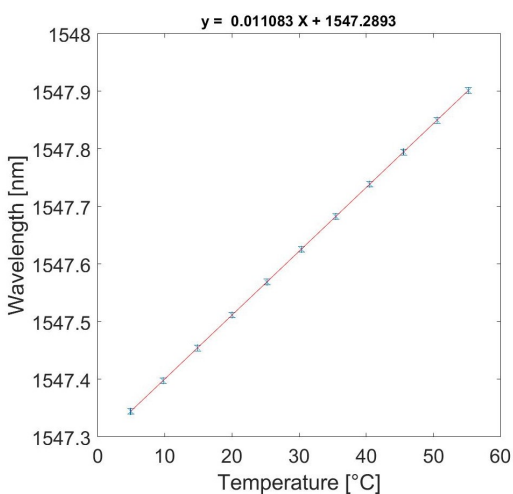


Figura C.57. ENDCAP 4-1 (5)

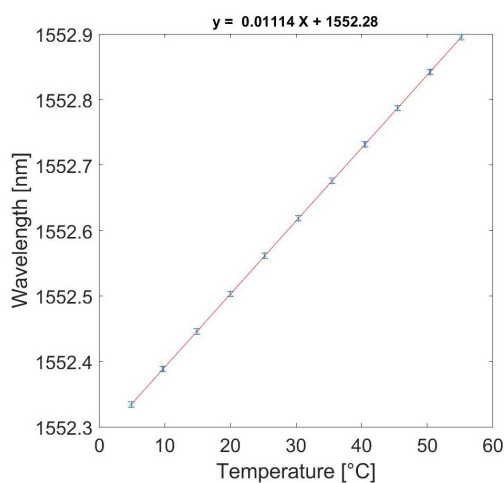


Figura C.58. ENDCAP 4-1 (6)

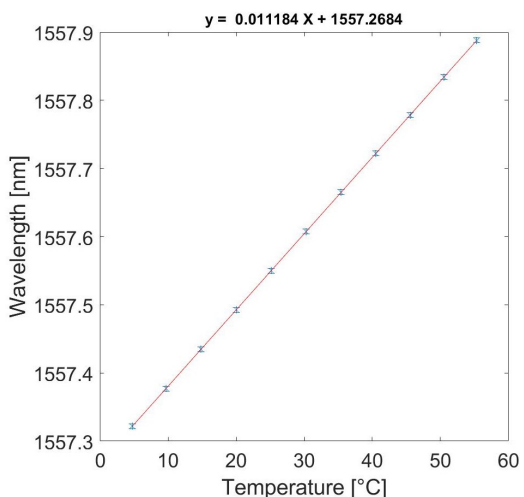


Figura C.59. ENDCAP 4-1 (7)

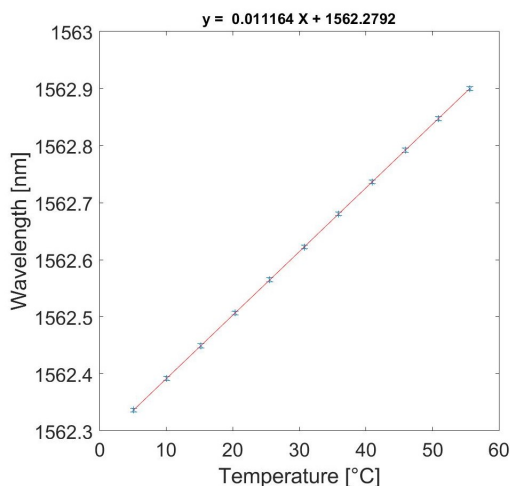


Figura C.60. ENDCAP 4-1 (8)

## C.8 ENDCAP 4-2

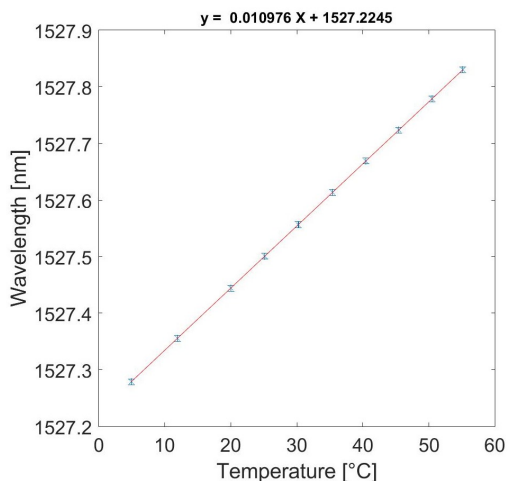


Figura C.61. ENDCAP 4-2 (1)

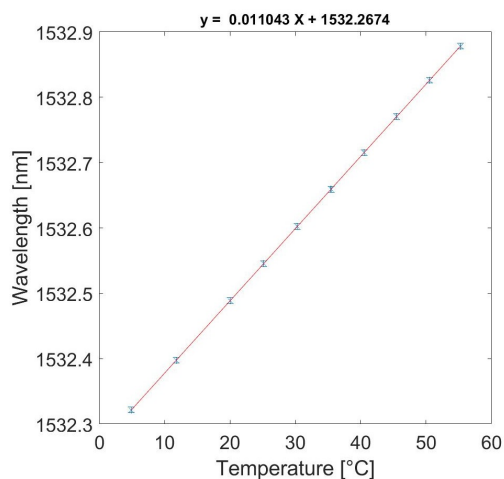


Figura C.62. ENDCAP 4-2 (2)

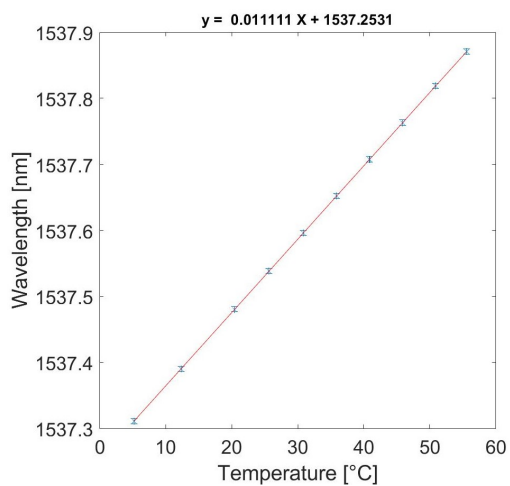


Figura C.63. ENDCAP 4-2 (3)

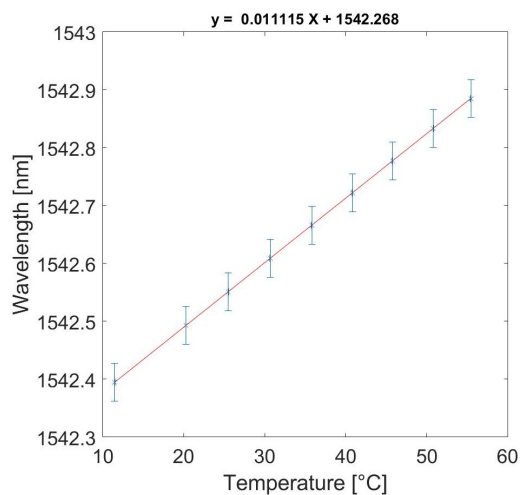


Figura C.64. ENDCAP 4-2 (4)

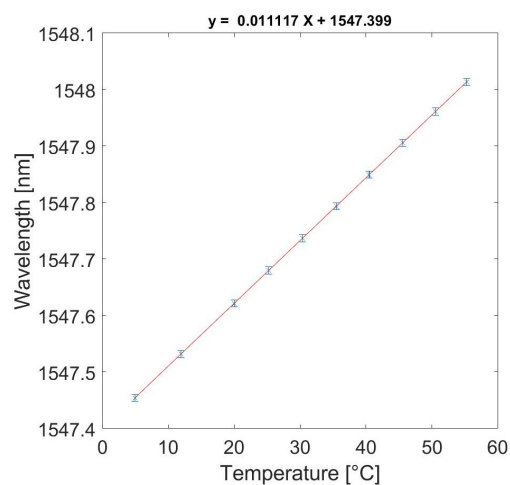


Figura C.65. ENDCAP 4-2 (5)

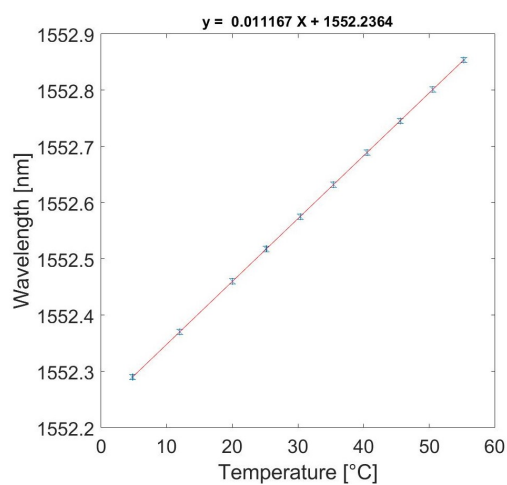


Figura C.66. ENDCAP 4-2 (6)

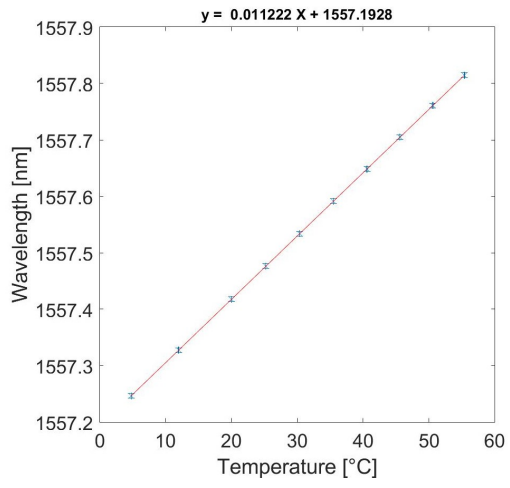


Figura C.67. ENDCAP 4-2 (7)

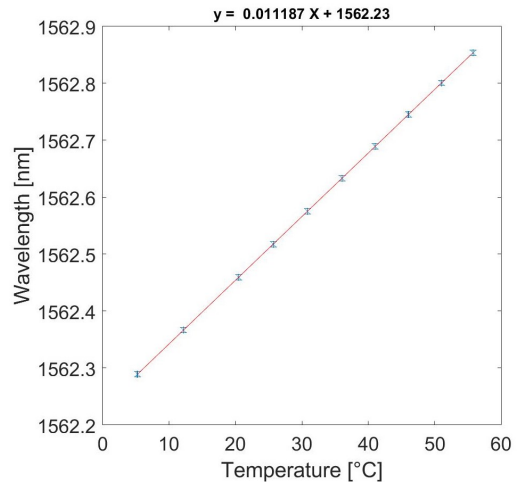


Figura C.68. ENDCAP 4-2 (8)

# Ringraziamenti

*Al termine di questo mio lavoro di tesi vorrei ringraziare tanto il prof. Breglio per avermi dato la possibilità di aver preso parte a questo progetto, che è stato per me possibilità di crescita professionale.*

*Desidero ringraziare infinitamente il mio correlatore, Francesco Fienga, per avermi aiutato tanto durante la stesura della tesi e avermi permesso di andare anche oltre, facendomi sentire pienamente parte del progetto. Ti ringrazio per il materiale e per i consigli forniti, per la tua simpatia e la tua professionalità.*

*Vorrei ringraziare inoltre Giovanni, che mi è stato vicino durante tutto il percorso, mi ha supportato in ogni momento e fornito preziosi consigli.*

*Grazie a tutti quelli che sono felici per me in questa mia piccola vittoria.*



# Bibliografia

- [1] A. Cutolo et al., *Optoelettronica e fotonica*, Aracne editrice, 2014.
- [2] K.T.V. Grattan, Dr. T. Sun, *Fiber optic sensor technology: an overview*, Elsevier, 2000.
- [3] Y. Wang, B. Han, D.W. Kim, A. Bar-Cohen and P. Joseph. *Integrated Measurement Technique for Curing Process-Dependent Mechanical Properties of Polymeric Materials Using Fiber Bragg Grating*, Society for Experimental Mechanics, No. 279, 2007.
- [4] MicronOptics, *Optical Fiber Sensors Guide Fundamentals & Applications*, 2015.
- [5] N. Singh et al., *Fiber bragg grating writing using phase mask technology*, Journal of Scientific and Industrial Research, vol. 64, pp. 108–115, 2005.
- [6] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*, Academic Press, 1999.
- [7] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson and J. Albert, *Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask*, Applied Physics Letters, Vol.62, No.10, pp. 1035-1037, 1993.
- [8] P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi, W. A. Reed, *High pressure H<sub>2</sub> loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal photosensitivity in GeO<sub>2</sub> doped optical fibers*, Electronic Letters, Vol. 29, 1993.
- [9] L. Dong, W. F. Liu and L. Reekie, *Negative-index gratings formed by a 193-nm excimer laser*, Optics Letters, Vol. 21 No. 24, pp. 2032-2034, 1996.
- [10] Andrei Gusarov, Stefan K. Hoeffgen, *Radiation Effects on Fiber Gratings*, IEEE transaction on nuclear science, Vol. 60, No. 3, 2013
- [11] C. J. Rhodes, *Large Hadron Collider (LHC)*, Science Progress (2013), 96(1), 95–109, doi: 10.3184/003685013X13623370524107.
- [12] Ganguli S.N., *The story of large electron positron collider*, Reson 7, 30–44 (2002).

- [13] ALICE Collaboration, *The ALICE experiment at the CERN LHC*, JINST 3, vol. S08002, Aug 2008.
- [14] ATLAS Collaboration, *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*, JINST 3, vol. S08003, Aug 2008.
- [15] CMS Collaboration, *The CMS experiment at the CERN LHC*, JINST 3, vol. S08004, Aug 2008.
- [16] LHCb Collaboration, *The LHCb Detector at the LHC*, JINST 3, vol. S08005, Aug 2008.
- [17] "<https://www.scienceinschool.org/>", consultato il 26/10/2020.
- [18] S. Myers, *The engineering needed for particle physics*, CERN, doi:10.1098/rsta.2011.0053.
- [19] F. Fienga, *Innovative application of fiber optic sensors in high energy physics experiments*, tesi Ph.D, Università degli Studi di Napoli, Maggio 2017.
- [20] Sara Bennet Spedding, *Elaborazione dei dati da sensori FBG per il monitoraggio di acceleratori di particelle al CERN*, Tesi di laurea, Università degli Studi di Napoli, 2019.
- [21] F. Fienga et al., *A fiber optic sensors monitoring system for the central beam pipe of the CMS experiment*, Elsevier, 2019.
- [22] "<https://lunainc.com/>", consultato il 07/12/2020.