

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

Monitoraggio e controllo del sistema per i cicli termici ai moduli del futuro rivelatore ITk per l'esperimento ATLAS a HL-LHC

Relatore:
Prof. Antonio Zoccoli

Presentata da:
Niccolò Tonin

Correlatore:
Dott. Carla Sbarra

Anno Accademico 2021/2022

Indice

Introduzione	3
1 Il modello standard delle particelle e l'acceleratore LHC	4
1.1 Il modello Standard	4
1.2 LHC e HL-LHC	5
1.3 Il rivelatore ATLAS	7
2 Il tracciatore di ATLAS per HL-LHC	10
2.1 I moduli a pixel di ITk	10
2.2 Procedure per la costruzione dei moduli a pixel del tracciatore ITk	12
2.3 Controlli di qualità per i moduli a pixel di ITk	13
3 Setup per i cicli termici effettuati nel laboratorio di Bologna	15
3.1 Camera climatica	16
3.2 Sensori di umidità, di temperatura e di pressione	18
3.3 Dryer	18
3.4 Flussimetro	19
3.5 Pompa a vuoto	19
3.6 Sistema UPS	19
3.7 Microcontrollore	20
3.8 Software	20
3.8.1 Protocollo MQTT	20
3.8.2 InfluxDB	20
3.8.3 Grafana	21
4 Interfaccia grafica per la gestione della camera climatica e il monitoraggio dei moduli sotto test	22
4.1 Opzioni dell'interfaccia	22
4.1.1 Tipologie di sensori	23
4.1.2 Margine di sicurezza della temperatura	24
4.1.3 Tipologia di funzionamento	24

4.1.4	Tipologia di programma	24
4.2	Avvio dei cicli termici	24
5	Risultati e conclusione	26
	Bibliografia	28

Introduzione

In seguito alla prossima fase di *upgrade* dell'acceleratore LHC del laboratorio CERN di Ginevra comincerà un programma noto come HL-LHC, in cui sarà incrementato il valore massimo di luminosità istantanea che l'acceleratore sarà in grado di produrre. Questo incremento dovrà essere accompagnato da un potenziamento delle varie componenti dei rivelatori presenti in LHC tra cui il tracciatore interno di ATLAS con lo scopo di renderlo più resistente ai danni provocati dalle dosi di radiazione e aumentare la sua granularità. Per verificare che i futuri moduli a pixel del tracciatore interno adempiano a tali richieste e che, in ogni modo, siano in grado di fronteggiare le condizioni operative del tracciatore, sono stati stabiliti diversi controlli di qualità a cui i moduli dovranno essere sottoposti. Un importante controllo di qualità di cui si occupa la sezione dell'INFN di Bologna è di sottoporre i moduli a dei cicli termici dentro una camera climatica. Presso il laboratorio di Bologna è presente un *setup* per lo svolgimento dei cicli termici e il monitoraggio delle condizioni ambientali entro la camera climatica (temperatura e umidità) e della temperatura sia dei moduli che dei loro *carrier*. Difatti, in quanto i moduli sono molto delicati, occorre che i ricercatori, qualora osservino situazioni critiche, siano in grado di arrestare i cicli termici per prevenire il danneggiamento dei moduli. L'avvio e l'arresto dei cicli termici e la registrazione su un database dei dati misurati durante il monitoraggio vengono svolti da un programma python. L'ampliamento di questo programma è stato l'oggetto del mio lavoro. In particolare ho dotato il programma di un'interfaccia grafica e ho permesso che potesse svolgere diverse operazioni contemporaneamente attraverso il *multithreading*.

Capitolo 1

Il modello standard delle particelle e l'acceleratore LHC

1.1 Il modello Standard

Il modello standard è attualmente il modello più completo per la descrizione della fisica delle particelle. Esso descrive i costituenti fondamentali della materia e le forze attraverso cui interagiscono tra loro, ad eccezione della forza di gravità.



Figura 1.1: Particelle fondamentali del modello standard

Nel modello standard le particelle rientrano in due categorie: fermioni e bosoni. I fermioni hanno spin semintero, mentre i bosoni hanno spin intero.

I fermioni costituiscono la materia e si suddividono in quark e leptoni, entrambi raggruppati in tre generazioni come mostrato in figura 1.1. Fra le generazioni i fermioni differiscono rispetto al sapore e alla massa, mentre gli altri numeri quantici sono identici. Solo la prima generazione è stabile e costituisce la materia ordinaria ossia il protone (uud), il neutrone (ddu), l'elettrone e il neutrino elettronico.

I bosoni sono i mediatori delle forze. Essi sono dati dal fotone, i bosoni deboli Z , W^+ e W^- , gli otto tipi di gluoni e infine il bosone di Higgs. Il fotone media la forza elettromagnetica, i bosoni Z , W^+ e W^- mediano la forza debole e i gluoni mediano la forza forte. La forza elettromagnetica, la forza debole e la forza forte hanno rispettivamente simmetrie di gauge $U(1)$, $SU(2)$ e $SU(3)$. La forza debole è responsabile del decadimento radiattivo ed è la causa della instabilità della seconda e terza generazione dei fermioni. La forza forte è quella che fornisce stabilità ai nuclei atomici.

Le particelle sono soggette alle forze fondamentali in base alle cariche che possiedono. I neutrini possiedono esclusivamente la carica debole; l'elettrone, il muone e il tau hanno carica elettromagnetica e carica debole; i quark hanno tutti e tre i tipi di carica. Oltre ai fermioni mostrati in figura 1.1 esistono anche gli antifermioni che hanno carica opposta. La simmetria $SU(3)$ della forza forte implica che i quark sono confinati entro gli adroni. Sperimentalmente sono noti stati di coppia quark-antiquark detti mesoni oppure stati quark-quark-quark detti barioni¹.

Nel modello standard le particelle non possiedono una massa intrinseca, bensì essa viene a loro conferita mediante il bosone di Higgs.

Nonostante il modello standard sia stato in grado di fornire previsioni sperimentali molto accurate, esso è una teoria incompleta in quanto presenta alcune importanti lacune tra cui la sua inability di spiegare l'interazione gravitazionale, la natura della materia oscura, la predominanza della materia rispetto all'antimateria e la massa dei neutrini.

1.2 LHC e HL-LHC

Il *Large Hadron Collider* (LHC) è il più grande acceleratore di particelle al mondo ed è gestito dall'Organizzazione Europea per la Ricerca Nucleare (CERN) e si trova presso Ginevra. Esso impiega principalmente fasci di protoni formati da pacchetti detti *bunches* che vengono accelerati lungo due tubi a vuoto distinti. LHC ha otto punti in cui è possibile far incrociare i fasci di protoni. Di questi solo quattro vengono utilizzati per gli esperimenti ATLAS, CMS, LHC-b e ALICE. Essi studiano i prodotti delle collisioni con energia nel sistema di centro di massa fino a 13.6 TeV per singola collisione.

LHC ha l'obiettivo di delucidare la fisica non spiegata dal modello standard. A tal fine vengono seguiti due approcci. Il primo è quello di ricercare fenomeni non previsti

¹Occorre precisare che teoricamente nulla vieta stati di tetraquark e di pentaquark, difatti recenti esperimenti suggeriscono la loro esistenza

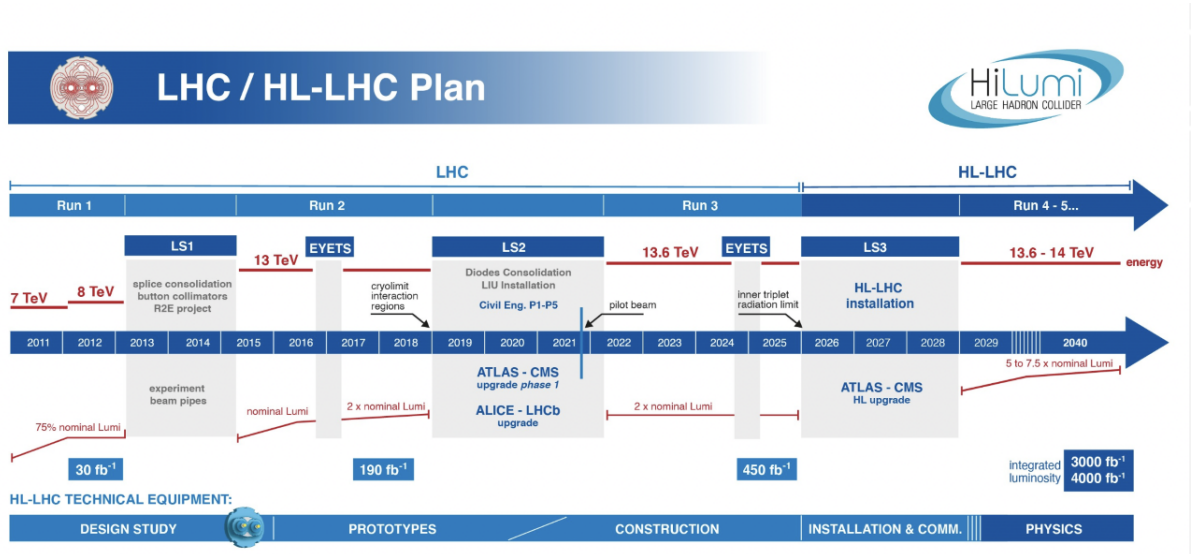


Figura 1.2: Cronologia per l'implementazione di HL-LHC. Difatti l'inizio effettivo del run 3 non è quello raffigurato in quanto è stato posticipato al 5 luglio 2022 a causa dell'emergenza COVID-19

dal modello standard, mentre il secondo è di misurare con precisione fenomeni già noti per sondare l'esistenza di discrepanze.

LHC è caratterizzato da periodi operativi detti *Runs* e periodi di manutenzione e rinnovamento detti *Long shutdowns*. Attualmente è in corso il *Run 3*.

Per massimizzare la quantità di dati disponibili da essere analizzati, si vuole che sia aumentato il numero di interazioni protone protone. Questo dato può essere quantificato attraverso la luminosità integrata dell'acceleratore LHC, la quale corrisponde all'integrazione rispetto al tempo della luminosità istantanea che è definita come [1]

$$\mathcal{L} = S \frac{N_1 N_2 f N_b}{4\pi \sigma_x \sigma_y} \quad (1.1)$$

dove N_1 e N_2 sono il numero di particelle per *bunch*, f è la frequenza di rivoluzione, N_b è il numero di *bunches*, σ_x e σ_y sono le dimensioni trasversali del fascio e S è un fattore che dipende dall'angolo di *crossing*.

Nel futuro è previsto un upgrade di LHC denominato *High Luminosity Large Hadron Collider* (HL-LHC) che mira a incrementare la luminosità istantanea di LHC e di conseguenza anche la luminosità integrata.

Nella figura 1.2 viene raffigurata la cronologia per lo sviluppo di HL-LHC. Dall'avvio di LHC nel 2011 al termine del *run 2* la luminosità integrata registrata da parte di ATLAS è stata di circa 170 fb⁻¹. Al termine del *run 3* ci si aspetta che la luminosità

integrata sarà di 450 fb^{-1} e che dopo il termine dell'installazione di HL-LHC si potrà raggiungere nel 2040 una luminosità integrata compresa fra i 3000 fb^{-1} e i 4000 fb^{-1} .

Durante il *run 3* l'incremento della luminosità integrata sarà dovuto all'aumento di quella istantanea attraverso una tecnica chiamata *luminosity levelling* [2]. La differenza tra l'andamento tipico della luminosità istantanea durante un periodo di presa dati senza e con il *luminosity levelling* è illustrato in figura 1.3.

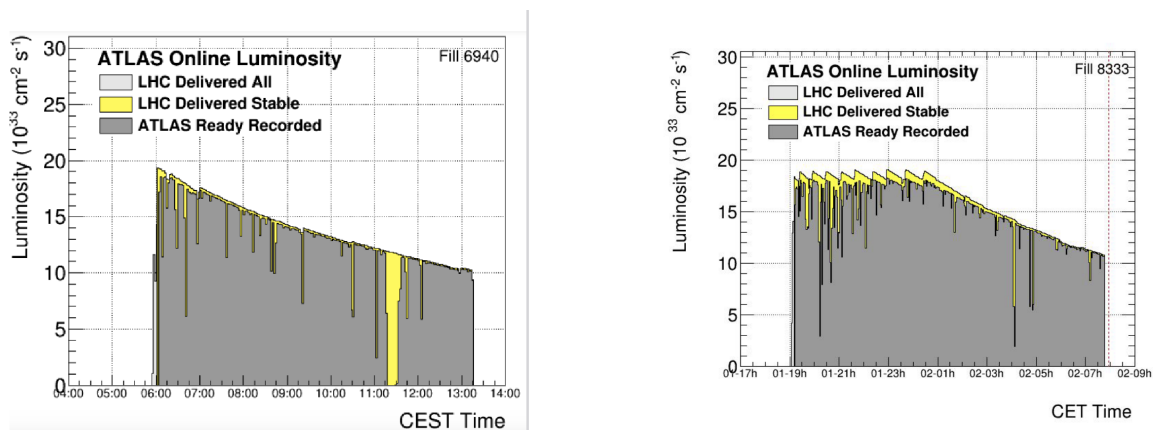


Figura 1.3: Tipico andamento della luminosità istantanea in funzione del tempo con (destra) o senza (sinistra) il *luminosity levelling*.

Senza il *luminosity levelling* il numero di interazioni per *bunch crossing* decade esponenzialmente nel tempo. È possibile ottenere una luminosità istantanea maggiore usando i magneti che guidano i protoni per stringere i fasci e variare l'angolo di intersezione durante i *bunch crossings*. Regolando appositamente i magneti si può mantenere il numero di interazioni di *bunch crossings* pressoché costante per una determinata durata di tempo. Al momento con il *luminosity levelling* non viene oltrepassata la soglia di circa 60 interazioni per *bunch crossings*. Oltrepassarla comprometterebbe la qualità dei dati ottenuti, poiché i rivelatori non hanno ancora una granularità abbastanza fine per gestire un numero maggiore di interazioni sovrapposte.

1.3 Il rivelatore ATLAS

In figura 1.4 è mostrato lo schema ATLAS: uno dei quattro rivelatori che opera attorno a LHC. Esso ha contribuito a dimostrare l'esistenza del bosone di Higgs.

I suoi componenti principali sono il tracciatore interno, il calorimetro elettromagnetico, il calorimetro adronico e lo spettrometro per muoni.

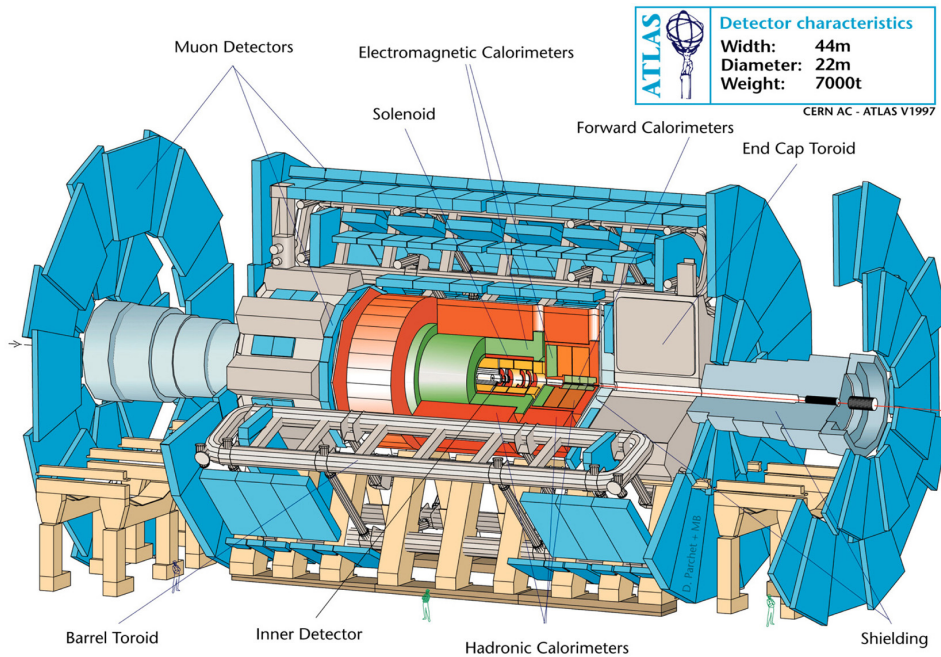


Figura 1.4: Il rivelatore ATLAS e le sue componenti

Il calorimetro elettromagnetico assorbe e misura l'energia dei fotoni e degli elettroni. Analogamente il calorimetro adronico assorbe e misura l'energia degli adroni. Lo spettrometro per i muoni serve a misurare l'impulso, la traiettoria e la carica dei muoni.

Lo scopo del tracciatore interno è di consentire la ricostruzione delle traiettorie di particelle con carica elettromagnetica. Esso è immerso in un campo magnetico assiale di 2T che consente di tracciare particelle con $|\eta| < 2.5$ dove η è la pseudorapidità ed è definita come

$$\eta = -\log \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \quad (1.2)$$

dove θ indica l'angolo fra l'asse del fascio di collisione e l'impulso della particella prodotta.

Il tracciatore interno è formato da tre gruppi di rivelatori. Quello più interno è formato da quattro strati di rivelatori di silicio a pixel, di cui quello più interno è chiamato Insertable-B-Layer (IBL). Successivamente c'è il Semi Conductor Tracker (SCT) che è costituito da otto strati di rivelatori di silicio a strip. Infine nella periferia del tracciatore interno è presente il Transition Radiation Tracker (TRT) che è formato da 300000 tubicini di tungsteno riempiti di una miscela di gas ionizzabile che serve a rivelare le particelle con pseudorapidità fino a $|\eta| = 2$ e aiuta a identificare gli elettroni.

Nella regione a forma di barile i rivelatori a silicio sono disposti concentricamente all'asse del fascio di collisione. Negli endcap invece sono disposti su dischi perpendicolari all'asse.

Nei tre strati esterni del rivelatore a pixel, questi hanno una dimensione minima di $50 \times 400 \mu\text{m}^2$ e un'accuratezza di $10 \mu\text{m}$. Nell'IBL invece hanno una dimensione di $50 \times 250 \mu\text{m}^2$.

Inizialmente ATLAS era stato progettato per misurare collisioni in condizione di luminosità istantanea fino a $\mathcal{L} = 10^{34} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ e fino a 25 interazioni per bunch crossing. Di fatto LHC ha superato le aspettative e durante il *run 2* ha raggiunto un valore medio di 33.7 interazioni per bunch crossing; e fra il 2017 e il 2018 sono state registrate anche 60 interazioni per bunch crossing.

In vista di HL-LHC sono pianificate modifiche a quasi tutti i sottorivelatori di ATLAS e un rinnovo del sistema di lettura. In particolare il tracciatore interno verrà completamente sostituito e verrà composto esclusivamente da moduli di rivelatori a silicio, sia a pixel che a strip.

Capitolo 2

Il tracciatore di ATLAS per HL-LHC

In vista del completamento di HL-LHC, il futuro tracciatore di ATLAS è stato progettato per soddisfare l'esigenza di aumentare la granularità e la resistenza alla radiazione. In particolare il tracciatore dovrà essere in grado di ricostruire eventi con un *pileup* fino a 200 e di resistere a dosi di radiazioni corrispondenti a flussi di 1.6×10^{16} neq cm^{-2} . Il nuovo tracciatore sarà formato esclusivamente da rivelatori al silicio. Essi saranno sia a pixel che a strip.

Nella figura 2.1 è raffigurata la disposizione spaziale con cui verranno installati i rivelatori. Data la minore risoluzione dei rivelatori a strip rispetto a quelli a pixel essi occupano una posizione periferica rispetto ai rivelatori a pixel.

I sensori di ITk saranno più resistenti ai danni dovuti alla radiazione¹ e avranno una granularità maggiore per permettere di ricostruire correttamente le traiettorie di tutti i prodotti delle collisioni.

I pixel della sezione corrispondente avranno una dimensione minima di $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ e una dimensione massima di $50 \times 250 \mu\text{m}^2$. L'area ricoperta dai rivelatori a strip sarà di 160m^2 mentre l'area ricoperta dai rivelatori a pixel sarà di 16m^2 .

2.1 I moduli a pixel di ITk

I moduli a pixel di ITk impiegano due tipologie di sensori: i sensori planari e i sensori 3D.

In figura 2.2a è mostrato lo schema di un sensore planare. Esso è una giunzione pn priva di cariche libere ed è formato da un substrato di silicio su cui vengono impiantati gli

¹I danni dovuti alla radiazione risultano comunque non trascurabili. Conseguentemente i due strati più interni del rivelatore a pixel sono stati progettati con un supporto estraibile in modo tale che possano essere sostituiti dopo due anni di funzionamento a HL-LHC

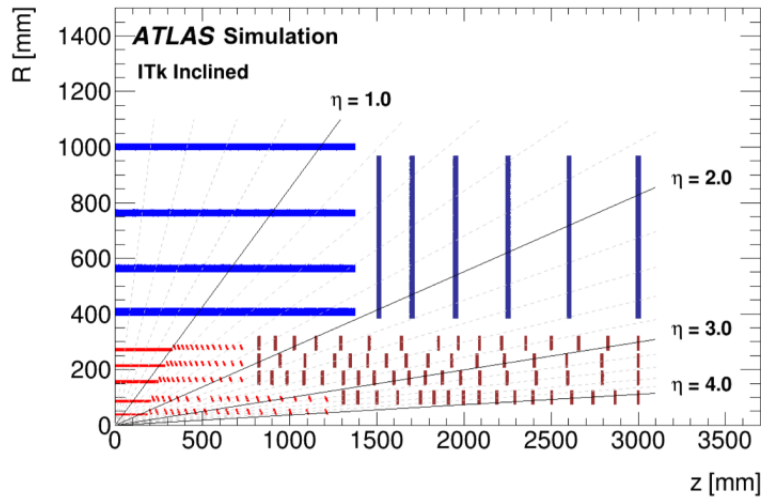


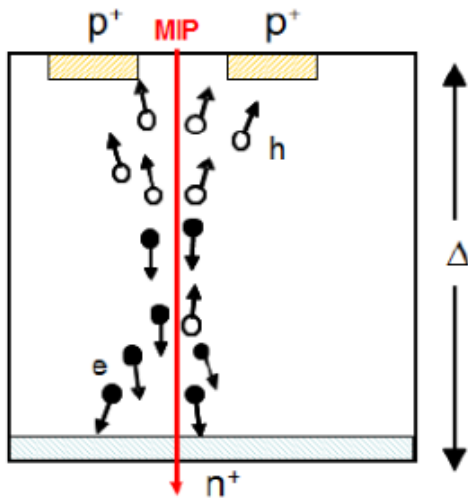
Figura 2.1: Disposizione dei rivelatori a pixel (rossi) e a strip (blu) di ITK rispetto alle coordinate cilindriche z e R , dove z indica la distanza lungo la direzione del fascio mentre R indica la distanza dal medesimo asse

elettrodi $n+$ e $p+$ a cui viene applicata una tensione di polarizzazione inversa. Quando una particella carica colpisce il sensore essa libera portatori di carica, che, raccolti agli elettrodi, producono un segnale elettrico. La deriva delle cariche libere avviene lungo lo spessore del sensore.

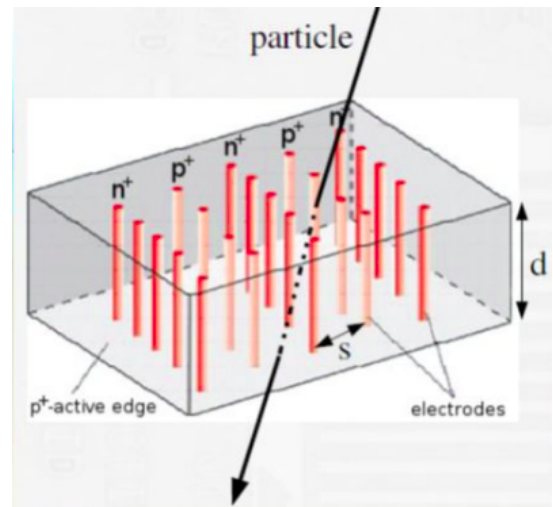
Nella figura 2.2b è mostrata la geometria di un rivelatore 3D. Gli elettrodi $p+$ e $n+$ sono scavati in un substrato di silicio p . A differenza dei sensori planari, la distanza fra gli elettrodi, e dunque la distanza di deriva, è disaccoppiata dallo spessore del sensore. Le industrie che li manifatturano sono quindi in grado di ridurre la distanza di deriva collocando gli elettrodi più vicini. Questo comporta che le cariche vengono raccolte più velocemente rispetto ai sensori planari. È minore la probabilità che esse vengano catturate da impurità, il che implica una maggiore resistenza ai danni dovuti alle radiazioni. Per tutte queste ragioni i sensori 3D saranno collocati nello strato più vicino al fascio di protoni dove le dosi di radiazioni saranno più elevate.

Ogni modulo ITk è formato da un sensore accoppiato a uno o più chip di readout. I chip di readout si occupano della lettura dai segnali elettrici generati dai sensori. I segnali vengono amplificati, formati e comparati con una soglia tipica di 1000 elettroni. Infine il segnale viene digitizzato e viene misurata la *time over threshold*. [3]. Per ogni pixel, i chip di readout sono in grado di estrarre 4 bit di informazione che indicano la durata del superamento della soglia.

Il chip di readout è costruito secondo la tecnologia CMOS a 65 nm e ha dimensioni $2 \times 2 \text{ cm}^2$. Ogni chip è in grado di leggere i segnali provenienti da 1.5×10^5 pixel. [4]



(a) Schema della geometria e del flusso di carica in un sensore planare quando viene colpito da una MIP (Minimum Ionization Particle)



(b) Schema di un sensore 3D

Figura 2.2

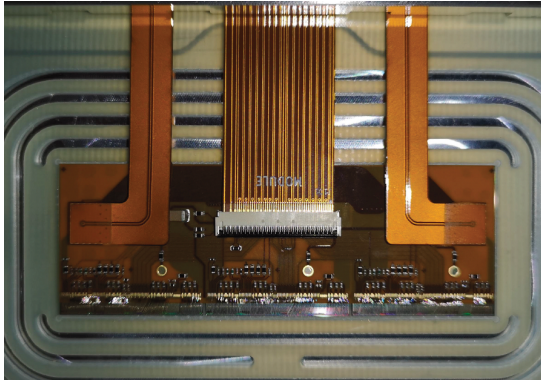
I moduli ITk si distinguono in tripletti e quadrupletti, mostrati rispettivamente in figura 2.3a e in figura 2.3b all'interno dei rispettivi carriers. I tripletti sono formati da tre sensori di dimensione $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ciascuno accoppiato a un chip di readout, mentre i quadrupletti sono formati da un unico sensore di dimensione $4 \times 4 \text{ cm}^2$ accoppiato a quattro chip di readout.

2.2 Procedure per la costruzione dei moduli a pixel del tracciatore ITk

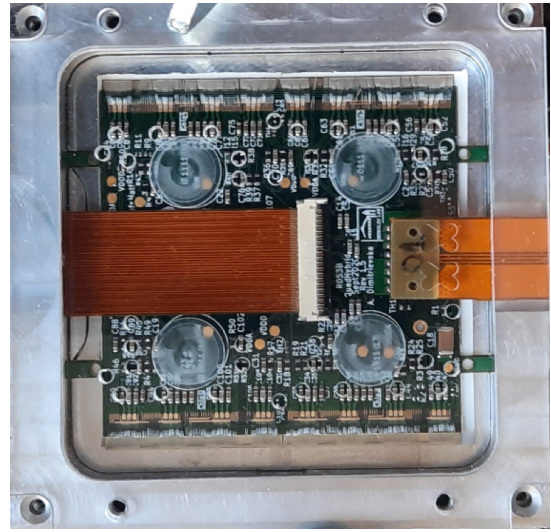
La costruzione dei moduli a pixel di ITk viene effettuata in primo luogo da parte di ditte, le quali fabbricano i sensori e i chip di readout e li connettono attraverso il *bump bonding* creando così i *bare modules*. Successivamente essi vengono spediti agli istituti di ricerca per venire assemblati.

L'assemblaggio dei moduli consiste nell'incollaggio dei bare modules ai circuiti stampati e successivamente al collegamento dei chip di readout e dei sensori ai circuiti stampati con dei sottili fili di alluminio. Questo processo viene chiamato *wire bonding*.

L'Italia partecipa alla costruzione di ITk attraverso la costruzione della sezione a pixel di uno degli *end caps*. Le sezioni dell'INFN di Milano e di Genova assemblano i moduli. A Bologna, Udine e Trento sono effettuati controlli di qualità. In particolare



(a) Foto di un tripletto all'interno di un carrier



(b) Foto di un quadrupletto all'interno di un carrier

Figura 2.3

Bologna è incaricata di sottoporre a cicli termici tutti i moduli assemblati in Italia. Lecce e Genova caricano i moduli sui supporti ed infine la sezione di Frascati integra tutte le componenti all'endcap che verrà successivamente trasportato al CERN.

Al fine di partecipare alla costruzione del tracciatore ITk gli enti interessati devono essere qualificati per i rispettivi impegni. Le ditte a cui vengono commissionate la produzione dei wafer di silicio e degli ASIC per il readout dei moduli devono mostrare di essere in grado di produrli rispettando le specifiche richieste. Il personale degli enti di ricerca deve potere svolgere le proprie attività in modo sicuro ed efficiente. Anche il laboratorio di Bologna deve ottenere la qualifica per potere maneggiare i nuovi moduli.

Per potere rafforzare la qualifica di Bologna ho ampliato un programma python pre-esistente inserito nel contesto dei controlli di qualità svolti con cicli termici effettuati sui moduli. Il mio lavoro è stato di renderlo in grado di utilizzare il *multithreading* e di realizzare un'interfaccia grafica che potesse agevolare la gestione di questo processo per renderlo più sicuro ed efficiente.

2.3 Controlli di qualità per i moduli a pixel di ITk

Secondo le procedure occorre che a ogni fase della produzione siano eseguiti controlli di qualità. Esistono vari modi per verificare la qualità dei sensori, dei chip di readout e delle connessioni. Per esempio per determinare la qualità dei sensori viene misurata la caratteristica I-V a diverse temperature, ossia si misura la corrente di *leakage* in funzione

della tensione di *bias*. Il valore della corrente nella zona in cui la caratteristica I-V è piatta e il valore della tensione di *breakdown* sono parametri che indicano la qualità dei sensori. Invece, per controllare la qualità delle connessioni, si sparano fasci di raggi X al modulo e si verifica che vengano generati segnali elettrici su tutti i pixel.

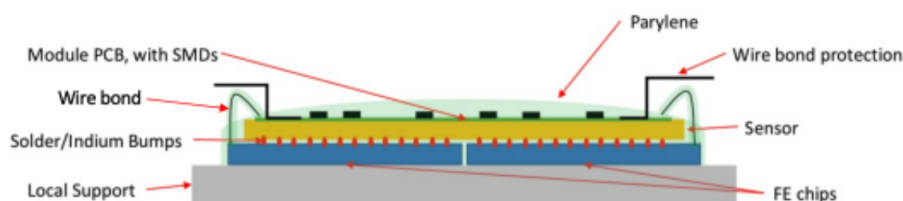


Figura 2.4: Schema del modulo assemblato dagli enti di ricerca

Nella figura 2.4 vengono raffigurate tutte le componenti principali del modulo dopo l'assemblaggio eseguito dagli enti di ricerca.

In seguito, vengono effettuati controlli di qualità svolti sia in condizioni operative con temperature da -25°C a -15°C sia a temperatura ambiente [5]. Per queste operazioni, i moduli vengono riposti all'interno di carrier, i quali servono a spostare e manipolare i moduli facilmente senza danneggiarli fino a quando saranno caricati su supporti finali. Successivamente vengono effettuati un'ulteriore serie di test elettrici eseguiti prima e dopo la sottomissione del modulo a una serie di cicli termici. Quest'ultimi rappresentano un controllo di qualità di particolare importanza.

I cicli termici hanno lo scopo di verificare la tenuta dei bump bonds del modulo durante la presa dati. Quando i moduli verranno installati su ATLAS essi verranno incollati a un sistema di raffreddamento che ha lo scopo di assorbire il calore generato dai chip di readout durante le fasi operative. Nell'eventualità che ci sia un taglio di corrente, l'alimentazione verrebbe ovviamente sospesa. Anche il sistema di raffreddamento verrebbe sospeso ma, a causa della sua inerzia termica molto più grande rispetto a quella dei chip di readout, i moduli verrebbero comunque raffreddati bruscamente al di sotto delle normali condizioni operative. I moduli sarebbero dunque soggetti a uno stress meccanico dovuto al fatto che i chip sono incollati al supporto, mentre i sensori potrebbero deformarsi in quanto sono costituiti da materiali con coefficiente di dilatazione diverso. Tale situazione potrebbe danneggiare i *bump bonds*. In laboratorio si vuole dunque verificare la loro tenuta simulando quanto appena descritto. A tal scopo i moduli sono sottoposti a dei cicli termici e in contemporanea si usa una pompa a vuoto per simulare l'effetto della colla. In particolare per i moduli ITk sono previsti 10 cicli tra -45°C e 40°C e 1 ciclo tra -55°C e 60°C .

Capitolo 3

Setup per i cicli termici effettuati nel laboratorio di Bologna

In questo capitolo descrivo tutte le componenti del sistema per l'esecuzione dei cicli termici presso il laboratorio di Bologna e illustro il loro funzionamento complessivo.

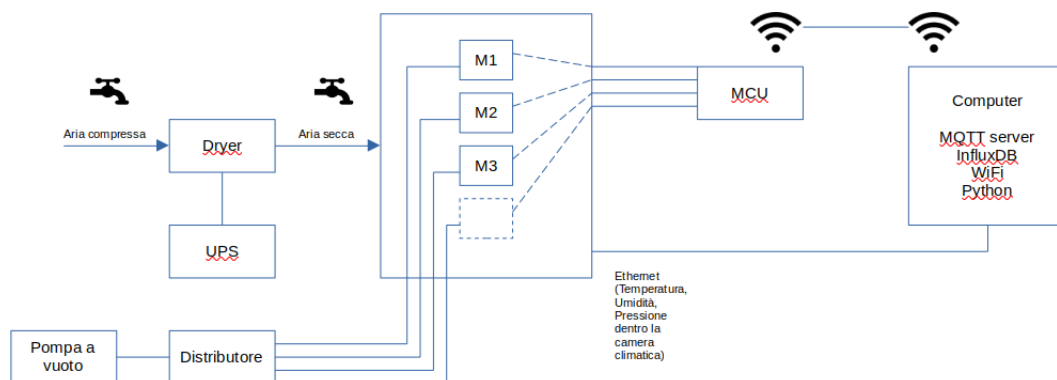


Figura 3.1: Schema dell'apparato per l'esecuzione dei cicli termici

L'ambito del mio lavoro è incentrato sul sistema per l'esecuzione dei cicli termici schematizzato in figura 3.1. I cicli termici sono eseguiti all'interno di una camera climatica.

Essa viene rifornita con dell'aria secca da un dryer il cui funzionamento viene garantito anche in mancanza di corrente da un sistema UPS (Uninterruptible Power Source) per almeno 8 ore. Il passaggio dell'aria secca dal dryer alla camera climatica è regolato da un flussimetro. Una pompa per vuoto, collegata a un distributore, aspira l'aria dalla base dei carrier garantendo l'adesione dei moduli. La camera climatica è connessa a Ethernet. Un PC collegato alla rete può ricevere i dati di temperatura e umidità dell'aria dentro la camera climatica, misurati dalla camera stessa. In base alle condizioni ambientali registrate, un programma software avvia (o ferma) i programmi per i cicli termici che sono salvati nella memoria della camera climatica. Oltre ai sensori della camera climatica sono presenti degli ulteriori sensori di temperatura e di umidità al suo interno. Questa apparente ridondanza è giustificabile dal fatto che durante i cicli termici le condizioni ambientali della camera climatica non sono uniformi e dunque i soli sensori forniti dalla camera climatica non sarebbero sufficienti per monitorare correttamente le condizioni ambientali vicino ai moduli. È presente anche un sensore di pressione posto fuori dalla camera climatica, che ha lo scopo di monitorare la pressione entro il circuito del vuoto.

Ogni modulo include un termistore NTC connesso a un adattatore che permette di leggere la resistenza dei termistori. Durante i cicli termici, la lettura degli NTC e degli altri sensori di umidità e di temperatura viene effettuata attraverso dei cavi passanti che raggiungono un microcontrollore posto al di fuori della camera climatica. Esso comunica tramite WIFI usando il protocollo MQTT con il PC del laboratorio. Un programma software immagazina tutti i dati che riceve e il tempo in cui li riceve in un database *InfluxDB*.

Nelle sezioni sottostanti descrivo in dettaglio il funzionamento di ogni componente del sistema.

3.1 Camera climatica

Il laboratorio è dotato di una camera climatica di modello *Binder MKFT 115* raffigurata in figura 3.2. Essa permette di svolgere cicli termici a più moduli contemporaneamente. Al suo interno è munita di un sensore di temperatura e un sensore di umidità che possono venire letti tramite Ethernet. [6]

La camera climatica è in grado di raffreddare l'ambiente al suo interno fino a una temperatura di $-70^{\circ}C$ e di riscaldarlo fino a $+180^{\circ}C$.

La camera climatica può essere programmata con diversi programmi per l'esecuzione di diversi cicli termici. Per i moduli ITk vengono utilizzati programmi diversi per i triplette e i quadruplette. I due programmi si distinguono esclusivamente per la durata di ciascun ciclo termico. Tale differenza è implementata in quanto date le dimensioni differenti dei carrier dei triplette e dei carrier dei quadruplette essi hanno inerzie termiche differenti e conseguentemente i moduli, i quali a causa del loro contatto con i carrier si riscaldano per conduzione e non per convezione come i carrier, raggiungono le tem-



Figura 3.2: Camera climatica Binder MKFT 115

perature richieste in tempi diversi. La temperatura all'interno della camera climatica influisce sulla qualità del contatto fra il modulo e il carrier a causa della deformazione di una guarnizione posta tra modulo e carrier che, alle basse temperature, diventa rigida e può determinare una perdita delle condizioni di vuoto.

Ogni modulo deve essere sottoposto ad almeno:

- 10 cicli termici con $T_{min} = -45^{\circ}\text{C}$ e $T_{max} = +40^{\circ}\text{C}$
- 1 ciclo termico con $T_{min} = -55^{\circ}\text{C}$ e $T_{max} = +60^{\circ}\text{C}$

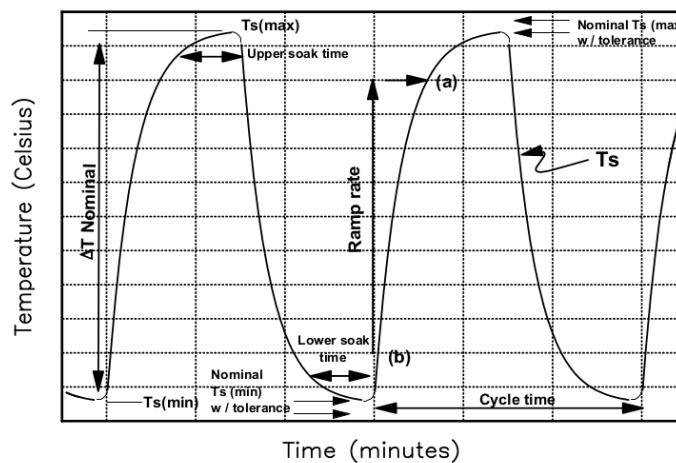


Figura 3.3: Profilo della temperatura dei moduli durante i cicli termici

In figura 3.3 viene rappresentato un esempio di profilo di temperatura seguito dai moduli durante i cicli termici. I cicli termici devono garantire un *soak time* di 15 minuti durante il quale la temperatura dei moduli si aggira attorno alla temperatura massima oppure minima dei cicli, con un margine di $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

3.2 Sensori di umidità, di temperatura e di pressione

I sensori utilizzati dentro la camera climatica sono sensori di umidità Honeywell [7] e resistori NTC di modello GA10K3A1IA [8] per misurare le temperature dei carrier. Gli Honeywell sono in grado di misurare l'umidità relativa con un'accuratezza di $\pm 3.5\%$. Le NTC possono misurare la temperatura nell'intervallo compreso fra -40°C e 125°C con un'accuratezza di $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.

Un sensore di pressione, di modello MPX5100DP, è collocato fuori dalla camera climatica e ha un'accuratezza del 2.5% [9].

Tutti i sensori menzionati sono analogici. Essi producono segnali grezzi di tensione che vengono digitizzati attraverso dei convertitori analogico-digitale a 4 canali di modello ADS115 posti al di fuori della camera climatica vicino al microcontrollore.

3.3 Dryer



Figura 3.4: Dryer KAESER DC 2.0

Il modello del dryer è KAESER DC 2.0 ed è raffigurato in figura 3.4. Esso viene alimentato con dell'aria compressa che nel laboratorio di Bologna viene fornita da un'officina meccanica. Il dryer cambia l'umidità relativa dell'aria compressa, la cui temperatura è di circa 20°C , dal valore iniziale di circa 5% al valore corrispondente al punto

di rugiada di $-70^{\circ}C$. Il dryer ha un prefiltro che rimuove le impurità dall'aria e un filtro che protegge l'aria a valle dalla polvere. [10]

Qualora il dryer fosse spento, la qualità dell'aria immessa corrisponderebbe a quella dell'aria compressa di ingresso.

3.4 Flussimetro

L'aria secca immessa all'interno della camera climatica durante l'esecuzione dei cicli termici viene regolata da un flussimetro. Il flusso è controllato da rubinetti che si possono aprire o chiudere manualmente.

3.5 Pompa a vuoto

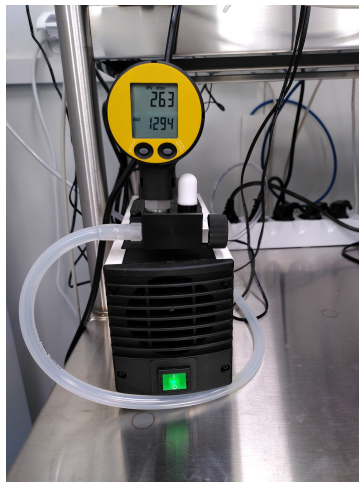


Figura 3.5: Pompa a vuoto Millivac-Maxi collocata in laboratorio

Il modello della pompa a vuoto è Millivac-Maxi ed è raffigurata in figura 3.5. La pompa è collegata a un distributore da cui si diramano tubi che terminano accanto ai moduli che vengono testati. Delle valvole permettono di aprire o chiudere il flusso d'aria di ciascun tubo. [11]

3.6 Sistema UPS

Il sistema UPS ha lo scopo di garantire che il dryer funzioni anche in mancanza di corrente. In caso di un tale evento il dryer può continuare a operare per 8 ore. Tale intervallo di

tempo è sufficiente a far sì che la temperatura all'interno della camera climatica raggiunga 20°C e che si eviti il rischio di formazione di condensa sul modulo.

3.7 Microcontrollore

Come microcontrollore (MCU) viene utilizzato un arduino MKR WIFI 1010 o, in alternativa, un microcontrollore ESP32 assieme a un development kit. Entrambe le soluzioni sono di basso costo e di facile reperimento. Il MCU legge dai convertitori ADS1115 i segnali digitizzati di tutti i sensori. Il microcontrollore è munito di un modulo WIFI attraverso cui invia le misure dei sensori al PC. [12]

Il microcontrollore legge le misure dei sensori e le invia al PC.

3.8 Software

Sul PC del laboratorio sono installati i dispositivi *Mosquitto*, *InfluxDB* e *Grafana*. *Mosquitto* serve per ricevere i dati dal microcontrollore in modo tale che possano venire immagazzinati nel database *InfluxDB*. *Grafana* serve per visualizzarli.

Un programma python è dedicato ad ascoltare i canali di *Mosquitto*; controllare la camera climatica e scrivere i dati sul database. Una descrizione più dettagliata del programma, il cui sviuppo è stato oggetto del mio lavoro presso il laboratorio, può essere trovata nel capitolo 4

3.8.1 Protocollo MQTT

Mosquitto è un programma di brokeraggio che utilizza il protocollo MQTT per facilitare la distribuzione e la ricezione di messaggi fra più dispositivi. [13]

Un dispositivo detto broker definisce argomenti a cui possono iscriversi altri dispositivi detti utenti. Tali utenti possono poi pubblicare e/o ricevere messaggi rispetto a un specifico argomento.

Nel caso in questione il computer funge da broker, mentre il microcontrollore è un utente.

3.8.2 InfluxDB

InfluxDB è un database progettato per immagazzinare serie di dati temporali. [14]

Una misura immagazzinata in *InfluxDB* è chiamata *Point* e contiene:

- La data della misura in questione
- I campi per ciascuna misura: nel caso presente la temperatura del modulo, dei carrier, la temperatura ambiente e l'umidità di quest'ultimo

- Etichette che indicano alcune informazioni secondarie: ossia in questo caso il nome del modulo e del sensore che ha inviato il dato

3.8.3 Grafana

Grafana è un programma che consente di monitorare in tempo reale sorgenti multiple di dati provenienti da database in base ai fields selezionati [15]. I dati possono essere visualizzati da un'interfaccia web da un qualunque PC che è collegato alla rete.

Nel laboratorio, *Grafana* viene utilizzato per visualizzare i dati registrati su *InfluxDB*.

Capitolo 4

Interfaccia grafica per la gestione della camera climatica e il monitoraggio dei moduli sotto test

In questo capitolo descrivo il programma python con interfaccia grafica che ho creato per la gestione e il monitoraggio dei cicli termici della camera climatica. Sono descritte la funzione di ogni elemento dell'interfaccia e tutte le operazioni eseguite dal programma durante il monitoraggio dei cicli termici.

4.1 Opzioni dell'interfaccia

Il laboratorio di Bologna dovrà effettuare i cicli termici a circa un migliaio di moduli in totale. Conseguentemente l'interfaccia grafica del programma python è stata progettata in modo tale da sottoporre in modo intuitivo e senza errori più moduli a cicli termici.

Tale interfaccia è stata creata utilizzando la libreria grafica TKinter in python. Essa supporta il *multithreading* che permette a processi diversi di operare contemporaneamente in modo da poter modificare le condizioni di lavoro anche durante lo svolgimento dei cicli.

L'interfaccia consente di specificare quattro opzioni:

- I tipi di sensori i cui segnali digitizzati vengono letti, e le stringhe che li identificano univocamente
- Il tipo di programma del ciclo termico da avviare, di tipo "tripletto" o "quadru-pletto"
- La tipologia del lavoro del programma, ossia solo monitoraggio della camera climatica, oppure sia monitoraggio che controllo

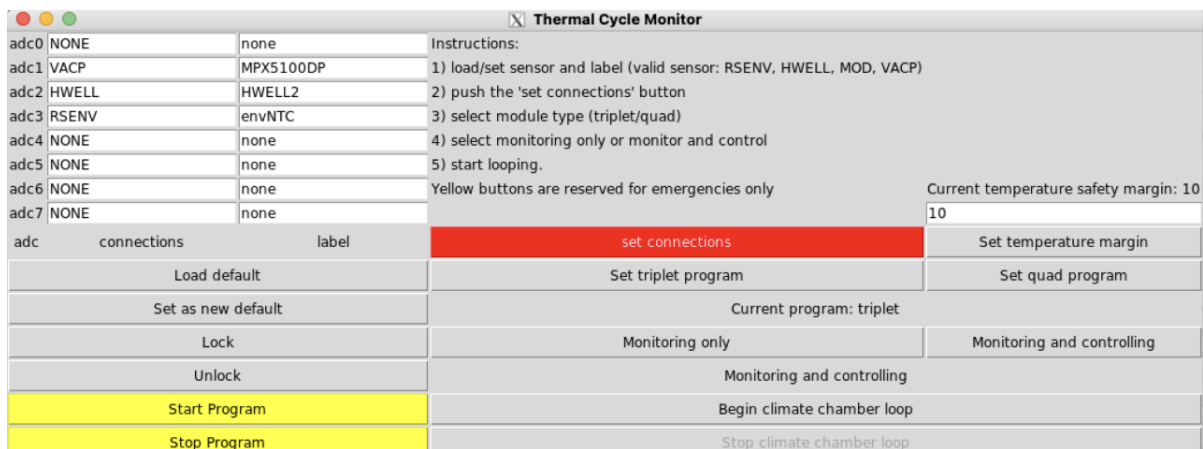


Figura 4.1: Interfaccia grafica del programma python

- Il margine di sicurezza fra temperatura dei carrier dei moduli sotto test e il punto di rugiada dell'aria

Sono presenti inoltre due bottoni *lock* e *unlock* rispettivamente per disattivare e attivare la possibilità di modificare le opzioni. In tal modo si evita che esse possano essere accidentalmente cambiate durante il monitoraggio della camera climatica.

4.1.1 Tipologie di sensori

I segnali ricevuti dal microcontrollore sono dati grezzi di tensione. Per far sì che il programma python sappia quale algoritmo utilizzare per convertire i valori di tensione ricevuti in dati di temperatura, pressione e umidità è necessario che la tipologia dei dati e la loro provenienza sia nota. È richiesto inoltre che vengano formattate opportunamente le stringhe da inviare a *Mosquitto* con le tipologie dei sensori per sapere come convertire i dati grezzi e con i nomi dei moduli e dei sensori per l'identificazione nel *database*.

Dopo aver inserito le tipologie di sensore e le loro etichette nei campi di testo, tali dati possono essere fissati per venire usati dal programma premendo il bottone *set connections*.

È possibile inoltre caricare e/o creare una configurazione predefinita delle tipologie di sensore ed etichette. Tale configurazione viene salvata in un file che il programma python legge e inserisce nei campi di testo all'inizio di ogni sessione.

4.1.2 Margine di sicurezza della temperatura

Il margine di sicurezza della temperatura è un parametro che ha lo scopo di prevenire la formazione di condensa sul modulo. Qualora la differenza fra la temperatura del carrier

e la temperatura di rugiada dell'aria sia minore del margine definito, il programma interrompe immediatamente i cicli termici.

Per definire il margine di sicurezza della temperatura bisogna inserire il valore numerico nel campo di testo corrispondente e premere *Set temperature margin*.

Il programma, inoltre, in caso di situazioni anomale invia notifiche ai ricercatori responsabili del test attraverso un BOT telegram che manda un messaggio a un canale a cui sono tutti sottoscritti.

4.1.3 Tipologia di funzionamento

La tipologia di funzionamento definisce se la camera climatica viene solo monitorata oppure monitorata e controllata. Il primo caso serve quando il programma di ciclo termico della camera climatica è già stato avviato e il programma python viene chiuso o si interrompe a causa di un qualche errore, in modo da riprendere il monitoraggio senza influenzare i cicli termici in corso. Il secondo caso serve invece quando il programma di ciclo termico non è stato ancora avviato e si voglia farlo partire.

Si può scegliere il comportamento desiderato premendo *Monitoring only* oppure *monitoring and controlling*.

4.1.4 Tipologia di programma

Ci sono due tipologie di programmi di ciclo termico che possono essere avviati dalla camera climatica qualora si abbia selezionato l'opzione di monitoraggio e controllo. Uno è riservato ai moduli di tripletto l'altro a quelli di quadrupletto. Essi si distinguono esclusivamente per la durata di ciascun ciclo termico che eseguono.

La tipologia di programma viene selezionata premendo il bottone *Set triplet program* oppure *Set quad program*.

4.2 Avvio dei cicli termici

Una volta fissati i parametri desiderati si può avviare il monitoraggio della camera climatica premendo il bottone *Begin climate chamber loop*. Tale bottone chiama una funzione che si richiama ricorsivamente dopo un intervallo di tempo di cinque secondi. Essa può essere fermata dall'utente premendo il bottone *stop climate chamber loop*.

Le variabili che rappresentano le opzioni sono contenute in una classe a cui si riferisce la funzione ogni volta che viene chiamata. Le opzioni possono dunque essere modificate mentre la camera climatica sta eseguendo un ciclo termico: in particolare se l'utente ha inserito erroneamente il nome di un sensore o di un'etichetta egli può modificare il campo di testo corrispondente e premere "set connections" senza dovere iniziare il ciclo termico da capo.

Lo scopo della funzione è in primo luogo quello di leggere i dati dei sensori tramite *Mosquitto* e di registrarli nel database del laboratorio. Essa può anche avviare il ciclo termico nel caso in cui sia stata selezionata l'opzione di monitoraggio e di controllo. In tal caso viene controllato che l'umidità relativa nella camera climatica sia inferiore al 2% prima che venga avviato il programma. Una volta avviato il programma, la sua esecuzione è indipendente dal programma python e dalla finestra di interfaccia grafica la quale può essere chiusa. La funzione ricorsiva controlla inoltre che la temperatura del modulo o del suo *carrier* non sia vicina al punto di rugiada entro il margine di temperatura definito e, in caso contrario, interrompe il programma di ciclo termico.

In caso di emergenza i due bottoni *Start climate chamber* e *Stop climate chamber* permettono rispettivamente di fermare e ravviare direttamente il programma di ciclo termico della camera climatica.

Capitolo 5

Risultati e conclusione

Al momento della stesura di questa tesi il laboratorio di Bologna ha già effettuato cicli termici su una ventina di moduli noti come RD53a, che sono i prototipi dei moduli che saranno impiegati su ITk. In figura 5.1 sono raffigurati dati reali durante un ciclo termico effettuato a un tripletto e a un quadrupletto. Sono raffigurate la temperatura e l'umidità relativa (%RH) dell'aria dentro la camera climatica, il suo punto di rugiada, e anche le temperature dei moduli sotto test e di uno dei carrier. Dalla figura in basso si può notare come la temperatura del carrier e la temperatura della camera climatica siano piuttosto diverse tra loro, mentre sono simili tutte le temperature dei moduli e del carrier (figura in alto). Questa osservazione è coerente con la presenza di un buon contatto termico tra carrier e modulo. Il carrier cambia temperatura per convezione e dunque segue con un certo ritardo i cambiamenti di temperatura dell'aria. Il modulo, in contatto termico col carrier, ne segue la temperatura per conduzione. Dalla figura si può inoltre osservare che il punto di rugiada dell'aria è sempre inferiore alla temperatura sia dei moduli che del loro carrier, come richiesto dalle specifiche per la qualifica del sito di Bologna.

Prima e dopo lo svolgimento dei cicli termici sono stati svolti test elettrici mirati all'individuazione di eventuali pixel disconnessi, e non sono state osservate differenze sostanziali. Questo indica che i *bump bonds* dovrebbero essere in grado di resistere allo stress meccanico dovuto agli sbalzi termici che i moduli potrebbero subire dopo che saranno installati su ATLAS.

La creazione di un'interfaccia grafica per lo svolgimento di cicli termici, e il passaggio da una logica sequenziale al multithreading nel programma principale, rappresentano il mio contributo principale alla qualifica del laboratorio di Bologna nei riguardi della comunità internazionale. Grazie all'interfaccia sarà più facile eseguire i cicli termici sui circa 1000 moduli che saranno inviati a Bologna, e non sarà più necessario editare manualmente dei files per definire quale modulo è associato a ogni canale di lettura. Questo punto è di particolare importanza in vista della fase di produzione, quando bisognerà ripetere la stessa operazione molte volte e la possibilità di errori umani dovrà essere minimizzata. L'introduzione di allerte automatiche via telegram e il consolidamento dei

controlli da effettuarsi durante il monitoraggio dei cicli concorrono alla solidità del sistema di test. Il laboratorio di Bologna è pronto per la fase di pre-produzione dei moduli ITk.



Figura 5.1: Cicli termici effettuati su dei moduli ITk visualizzati in grafana. Nella figura sono graficati rispetto al tempo gli andamenti delle temperature dei moduli (triplet, quad), di uno dei carrier, della temperatura e umidità relativa dell'aria dentro la camera climatica (CC) e del relativo punto di rugiada calcolato usando la misura di umidità della camera climatica (CC DP) e del sensore Honeywell descritto in precedenza (HWELL DP).

Bibliografia

- [1] W. Herr and B. D. Muratori. Concept of luminosity. CAS (CERN Acceleration School) 2006-002, DOI 10.5170/CERN-2006-002.361.
- [2] J. P. Koutchouk. Luminosity optimization and leveling. LHC Performance Workshop - Chamonix 2010 <https://indico.cern.ch/event/67839/>.
- [3] RD53 Collaboration. The rd53a integrated circuit. CERN-RD53-PUB-17-001.
- [4] J. Christiansen. Rd53b users guide: Introduction to rd53b pixel chip architecture, features and recommendations for use in pixel detector systems. CERN-RD53-PUB-21-001.
- [5] M. Lingxin. *RD53A Module Testing Document*. ATL-COM-ITK-2019-045.
- [6] <https://www.binder-world.com/int-en/product/mkft-115>.
- [7] <https://sps.honeywell.com/us/en/products/advanced-sensing-technologies/healthcare-sensing/humidity-with-temperature-sensors/hih-4000-series>.
- [8] <https://uk.farnell.com/sensor-solutions-te-connectivity/ga10k3a1ia/thermistor-ntc-10k-wire-leaded/dp/2771908>.
- [9] <https://eu.mouser.com/ProductDetail/NXP-Semiconductors/MPX5100DP?qs=N2XN0KY4UWWSKqgWL05Hfg%3D%3D>.
- [10] <https://www.kaeser.com/int-en/download.ashx?id=tcm:17-107060>.
- [11] https://www.merckmillipore.com/IT/it/product/Millivac-Vacuum-Pumps,MM_NF-C797#relations.
- [12] <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>.
- [13] <https://mosquitto.org>.
- [14] <https://www.influxdata.com>.

[15] <https://grafana.com>.

[16] <https://home.cern/science/experiments/atlas>, 2022.

[17] Atlas fact sheets. <https://atlas.cern/Resources/Fact-sheets>, 2021.