



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"
CORSO DI LAUREA IN FISICA

**Caratterizzazione di un sensore per la misura della
densità di un sistema multifasico basato su
rivelatore gamma a scintillazione per applicazioni
nel campo dell'industria petrolifera**

Laureando:
Nicolò TUCCORI

Relatore:
Ch.mo Prof. Marcello
LUNARDON

Correlatore:
Dott. Diego TESCARO

Anno accademico 2015/2016

Indice

1	Introduzione	4
2	Densimetro Quick-Gamma Pietro Fiorentini	6
2.1	Principio di funzionamento	7
2.1.1	Legge di assorbimento	7
2.2	Componenti	8
2.2.1	Sorgente	9
2.2.2	Detector	13
2.2.3	Elettronica e stabilizzazione del gain	17
3	Misure e analisi dati	19
3.1	Obiettivi	19
3.2	Setup sperimentale	20
3.3	Procedura di misura	21
4	Risultati sperimentali	23
4.1	Configurazione 1	25
4.1.1	Configurazione 1a e 1b	26
4.1.2	Correzione densità	30
4.2	Configurazione 2	34
5	Conclusioni	37
	Bibliografia	39

Capitolo 1

Introduzione

La conoscenza accurata della composizione del flusso in uscita dai pozzi di petrolio è un argomento di grande interesse per l'industria petrolifera. Il fluido estratto si presenta come una miscela multifasica composta, principalmente, da petrolio, acqua e gas.

Il procedimento standard per stimarne la composizione prevede l'uso di tecnologie in grado di separare fisicamente le diverse componenti del fluido estratto, prima di misurarle in modo indipendente. I cosiddetti "separatori" sono però costosi, fisicamente ingombranti, e richiedono una regolare manutenzione. Inoltre, non garantiscono un controllo costante del fluido che attraversa la condotta.

A ciò si può aggiungere un'osservazione basata sull'esigenze del mercato del petrolio. La generale diminuzione delle risorse petrolifere obbliga le compagnie del settore ad operare in condizioni ambientali estreme.

Alla luce di queste considerazioni, a partire dagli anni '80, si cominciarono a sviluppare i cosiddetti MFM ("Multiphase-flow-meters").

Questi metodi non intrusivi di monitoraggio del fluido estratto non richiedono la separazione della miscela estratta, offrono una misurazione ininterrotta e possono essere installati lungo la condotta di ogni pozzo di estrazione. Inoltre si prestano ad essere utilizzati in ambienti austeri, come le profondità oceaniche [1][4].

Per analizzare il flusso di miscele trifasiche esistono principalmente due principi di funzionamento degli MFM in base alle caratteristiche del fluido prese in analisi. Un primo sistema prevede la misura della velocità e della frazione di condotta ("holdup") occupata da ogni singola fase. Questo metodo richiede però la stima di cinque quantità: le tre velocità di ogni fase e due holdup.

Un secondo approccio è quello di misurare parametri dell'intero flusso che sono funzione di caratteristiche delle singole componenti. Quantità che possono essere misurate sono, per esempio, la differenza di pressione attraverso un venturimetro, la densità del flusso osservando l'attenuazione di un fascio di raggi gamma e l'impedenza elettrica della miscela. La relazione tra i parametri misurati e le componenti del fluido dipende fortemente dalla corretta taratura dello strumento

[5].

Per aver la maggior precisione possibile nel calibrare un MFM, è necessaria la conoscenza del comportamento dei vari strumenti in differenti condizioni ambientali. Inoltre, i parametri selezionati per analizzare il fluido possono variare velocemente nel processo di estrazione. Di conseguenza sono richiesti strumenti veloci e stabili rispetto alle condizioni ambientali.

Lo scopo di questa tesi è quella di analizzare il comportamento al variare della temperatura del densimetro Quick-Gamma progettato dall'azienda Pietro Fiorentini (PF). Il Q-Gamma fornisce una stima della densità del fluido che scorre nella condotta attraverso la misura dell'assorbimento di raggi gamma da parte del fluido. Questa è realizzata mediante una sorgente radioattiva e un detector scintillatore posti ai due lati della condotta. Il Q-Gamma viene installato all'interno di articoli come "Flowatch HS", "Subsea Multiphase Flow Meter" e "Totem HS" (Figura 1.1), "multiphase-flow meters" realizzati da PF per operare in diverse condizioni ambientali (terraferma o profondità oceaniche) o con flussi di diversa composizione che scorrono all'interno della condotta.

La caratteristica principale di questo densimetro è il breve intervallo di tempo nel quale il fluido che scorre nella condotta viene analizzato (da qui il nome Quick). I raggi gamma vengono infatti rivelati dal detector in campioni di 8ms. Un campionamento veloce della densità permette di essere sensibili a situazioni transitorie veloci, come una bolla di gas o un cumulo di fluido improvviso ("slug").

Il test descritto nel seguente documento è stato progettato appositamente per caratterizzare la risposta del densimetro per temperature che vanno da -30°C a 70°C .



Figura 1.1: Densimetro Q-Gamma installato nel "Totem HS"

Capitolo 2

Densimetro Quick-Gamma Pietro Fiorentini

Il densimetro Q-Gamma PF è composto da:

1. Una sorgente naturale radioattiva di ^{137}Cs , con un'attività di 50mCi;
2. Un sistema di rivelazione sensibile a raggi gamma di 662 keV, costituito da un cristallo scintillatore combinato ad un fotomoltiplicatore (PMT);
3. Elettronica dedicata, in grado di elaborare il segnale del PMT e fornire il numero di segnali con ampiezza superiore a determinate soglie;

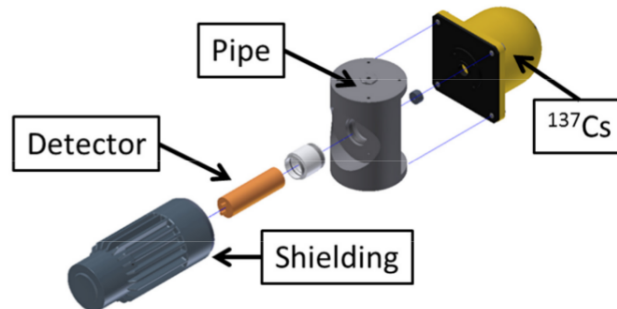


Figura 2.1: Schema componenti Q-Gamma

Le varie componenti dello strumento sono state progettate in modo da analizzare il fluido che scorre attraverso una condotta di acciaio di diametro variabile, come si vede nella figura.

Inoltre, vista la presenza di sorgenti radioattive, sono stati studiati e implementati nel densimetro vari schermi di piombo in modo da non avere problemi radioprotezionistici per gli operatori in condizione di sorgente vicina [6].

2.1 Principio di funzionamento

Il principio fisico alla base del funzionamento del densimetro Q-Gamma sfrutta la variazione dell'assorbimento dei gamma al variare della densità e della natura del materiale che scorre nella condotta.

Un fotone, interagendo con la materia, viene completamente assorbito (tramite "effetto fotoelettrico" o "produzione di coppia") oppure assorbito e successivamente riemesso, in una direzione differente a quella iniziale e con un'energia minore ("scattering Compton") [8].

Nel caso in analisi, i fotoni emessi hanno energia di 662 keV. Il materiale attraversato (acqua, gas, idrocarburi) è composto prevalentemente da molecole di idrogeno, ossigeno e carbonio, ognuna caratterizzata da un basso numero atomico, rispettivamente $Z=1$, $Z=8$ e $Z=6$. Come si vede da Figura 2.2, in questa condizione, il processo predominante è lo scattering Compton e una piccola frazione dei gamma interagisce tramite effetto fotoelettrico. La produzione di coppia, cioè la produzione di un elettrone e un positrone a partire da un fotone che interagisce con il campo coulombiano di un nucleo, non avviene nelle condizioni di lavoro analizzate in quanto l'energia dei raggi gamma è inferiore all'energia di soglia del processo (1.022 MeV).

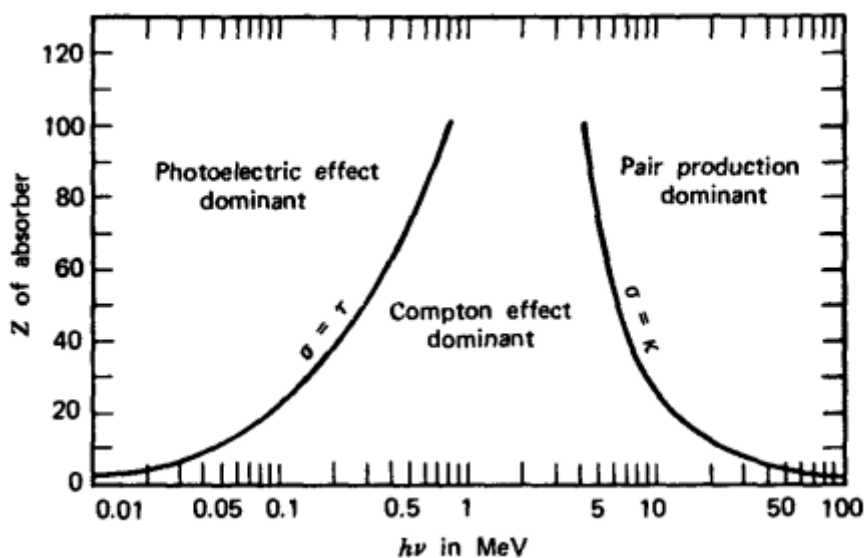


Figura 2.2: Processi di interazione in funzione del numero atomico Z del materiale assorbitore e dell'energia del fotone incidente $E_\gamma = h\nu$.

2.1.1 Legge di assorbimento

Considerando un fascio di raggi gamma, nell'ipotesi che sia collimato, l'attraversamento di un mezzo sortisce l'effetto di diminuire esponenzialmente l'intensità del fascio con l'aumentare dello

spessore percorso nell'assorbitore. I processi che causano questa riduzione sono quelli descritti precedentemente; la somma delle sezioni d'urto che li caratterizzano rappresenta la probabilità per unità di lunghezza che un fotone venga rimosso dal fascio,

$$\epsilon = \tau(\text{fotoelettrico}) + \sigma(\text{Compton}) + \kappa(\text{produzione di coppia})$$

e si chiama coefficiente di attenuazione lineare.

In particolare, se consideriamo un fascio di raggi gamma di intensità iniziale I_0 , l'intensità I del fascio dopo una lunghezza x percorsa all'interno dell'assorbitore si ricava dalla formula

$$I = I_0 e^{-\epsilon x} \quad (2.1)$$

L'uso del coefficiente di attenuazione lineare è limitato in quanto dipende dalla densità del materiale assorbitore. A questo proposito viene definito il coefficiente di attenuazione massivo:

$$\mu = \frac{\epsilon}{\rho}$$

dove ρ è la densità del materiale.

Per una data energia dei gamma incidenti, μ non varia con lo stato fisico dell'assorbitore. In termini di questo coefficiente, indipendente dalla densità del mezzo, la legge di attenuazione per fotoni assume la forma

$$I = I_0 e^{-\mu \rho x} \quad (2.2)$$

Nel caso specifico del densimetro Q-Gamma, la relazione utilizzata per la stima della densità sfrutta il numero di conteggi fornito dal rivelatore in un dato intervallo di tempo, misurato con e senza fluido nella condotta,

$$N_\rho = N_0 e^{-\mu \rho x} \quad (2.3)$$

In cui N_ρ sono i conteggi con fluido, N_0 senza. N_0 è noto effettuando una misura di calibrazione, μ è dato dalla letteratura e x è noto dalla geometria del Q-Gamma e misura circa 50mm; una stima della densità può essere quindi fornita dalla formula inversa [6]:

$$\rho = \frac{1}{\mu x} \ln \frac{N_0}{N_\rho} \quad (2.4)$$

2.2 Componenti

I componenti del Q-Gamma PF sono stati scelti in funzione del dichiarato obiettivo di effettuare una stima precisa della densità del fluido che passa dalla condotta ogni 8ms. A questo scopo varie sorgenti e detector sono stati analizzati, ponendo l'attenzione su precise caratteristiche, funzionali alle condizioni di lavoro previste.

2.2.1 Sorgente

Processo fisico: decadimenti β e γ

Si dice radiazione gamma la radiazione elettromagnetica emessa da nuclei eccitati nella transizione verso stati energetici nucleari di livello inferiore. La maggior parte dei nuclei con nucleoni che occupano stati eccitati ha origine dopo il decadimento di un altro radionuclide. Nel caso specifico del ^{137}Cs lo schema del decadimento è quello mostrato in Figura 2.3.

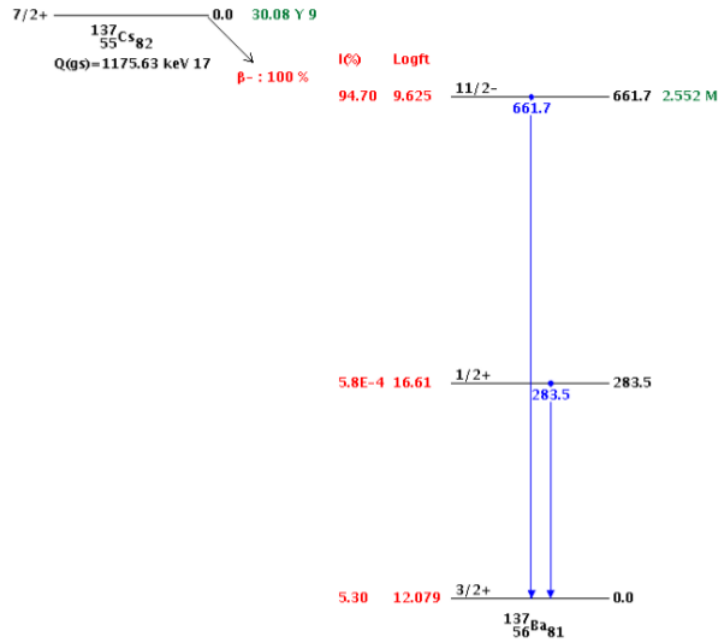


Figura 2.3: Schema del decadimento di ^{137}Cs e di ^{137}Ba

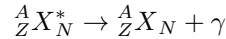
Un nucleo di ^{137}Cs decade β^- producendo un nucleo figlio di ^{137}Ba . Il processo di decadimento β^- prevede la conversione di un neutrone in un protone, con emissione di un e^- e un antineutrino.



Gli stati energetici del nucleo figlio su cui può avvenire il decadimento sono definiti da precise regole di selezione e caratterizzati da una data probabilità di decadimento. Il ^{137}Cs , per ogni evento, decade per il:

- 94,7% delle volte nel livello energetico $\frac{11}{2}^-$ del ^{137}Ba ;
- $5 \cdot 10^{-4}\%$ ad un livello energetico inferiore, $\frac{1}{2}^+$;
- 5.3% nello stato fondamentale del Bario;

La diseccitazione dagli stati eccitati a quello stabile avviene mediante emissione di radiazione elettromagnetica, fotoni che, a queste energie, sono noti con il nome di raggi gamma. Il decadimento in questione è a due corpi,



e l'energia dei gamma emessi è quindi ben definita per ogni transizione. Vengono per questo denominati “gamma caratteristici”.

I γ caratteristici del ${}^{137}\text{Ba}$ hanno energia:

- 661.659 keV per transizioni dal secondo livello eccitato allo stato fondamentale;
- 283.5 keV per decadimenti dal primo stato eccitato;

L'intensità dei primi è però nettamente maggiore rispetto ai secondi. Su 100 eventi di decadimento, 85 emettono gamma da 662 keV, $5.8 \cdot 10^{-4}$ gamma da 284 keV. Nello spettro energetico dei gamma emessi da una sorgente di ${}^{137}\text{Cs}$ il secondo contributo risulta quindi trascurabile.

Lo spettro di tale sorgente si presenta così (Figura 2.4).

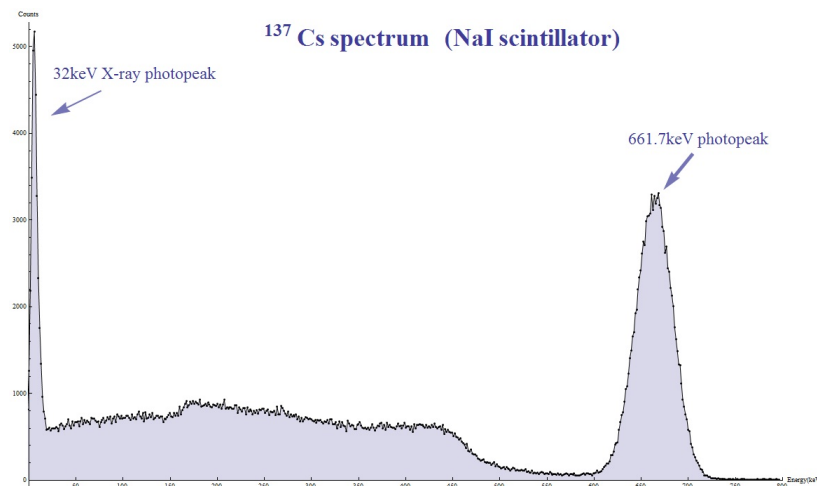


Figura 2.4: Spettro energetico dei gamma emessi da una sorgente di ${}^{137}\text{Cs}$, rivelati con uno scintillatore NaI(Tl)

A 662 keV si può notare il fotopico generato dai gamma emessi dalla sorgente. A energie inferiori è presente la “spalla Compton”, dovuta ai gamma che hanno interagito mediante processo di tipo Compton e vengono rilevati ugualmente dal detector ma con energia inferiore agli altri. Il picco presente a 32 keV è causato dai raggi X caratteristici emessi dal ${}^{137}\text{Ba}$ nel riassetto degli orbitali atomici. Lo spettro energetico è caratteristico di ogni elemento radioattivo e non dipende da alcun parametro. Nel suo funzionamento il Q-Gamma sfrutta questa caratteristica, e in particolare il fotopico a 662 keV, per raggiungere la stabilizzazione del gain, come verrà approfondito in seguito [7][9].

Scelta sorgente

La scelta del radioisotopo da utilizzare come sorgente è stata fatta ponderando diverse caratteristiche, in modo da utilizzare la più adatta per lo scopo del densimetro Q-Gamma. In particolare sono stati analizzati i seguenti fattori:

- **Attività della sorgente**

L'obiettivo di uno strumento come il Q-Gamma è di effettuare una stima della densità con la frequenza di 125 Hz e la minore incertezza possibile. Perché questo avvenga, l'attività della sorgente deve essere sufficientemente alta, in modo che il numero di fotoni rivelati dal detector garantisca un'adeguata precisione della misura nell'intervallo di tempo selezionato. Allo stesso tempo, avendo a che fare con elementi radioattivi, un'eccessiva attività della sorgente comporterebbe particolari attenzioni per la sicurezza delle persone che utilizzano lo strumento.

La sorgente utilizzata nel densimetro Pietro Fiorentini presenta un'attività pari a 50mCi. I gamma emessi isotropicamente sono circa $1.6 \cdot 10^9$ al secondo. Il collimatore che dirige il fascio verso il detector, la distanza che separa sorgente e detector, la presenza di acciaio nella direzione del fascio e l'efficienza di rivelazione del detector fanno sì che, per un tempo di misura di 8ms, il numero di conteggi per campione, contando tutti i fotoni incidenti con energia superiore a 250 keV, sia circa di 2000. La statistica di Poisson assicura che l'incertezza relativa su questo numero di conteggi sia del 2%.

- **Emivita della sorgente.**

Il tempo di dimezzamento determina qual è il tempo necessario affinché la sorgente a cui si riferisce dimezzi la propria attività e, nel nostro caso, il numero di conteggi. La sorgente deve quindi avere un'emivita alta, dell'ordine della decina di anni. Se fosse troppo bassa, sarebbe necessaria una manutenzione costante dello strumento per sostituirla, in modo da garantire sempre un numero alto di conteggi. Nel caso specifico del ^{137}Cs , $t_{1/2} = 30.17$ anni. Questo significa che se per esempio si hanno inizialmente 2000 conteggi per campione, essi diminuiranno di circa 66 conteggi all'anno, circa il 3%.

- **Coefficiente di trasmissione attraverso un fluido**

Per avere una stima il più possibile precisa sulla densità, è di fondamentale importanza il coefficiente di trasmissione dei raggi gamma,

$$T = \frac{N_\rho}{N_0}$$

Dall'eqn. 2.4 si può ricavare l'incertezza relativa sulla stima della densità in funzione dell'incertezza relativa sul numero di conteggi.

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{1}{\rho\mu x} \frac{dN_\rho}{N_\rho} \quad (2.5)$$

Dall'eqn. 2.3, invece, si può notare che

$$\ln T = -\rho\mu x$$

L'eqn. 2.5 relativa all'incertezza della densità diventa allora

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{1}{\ln T} \frac{dN_\rho}{N_\rho} \quad (2.6)$$

Essendo $T \in [0; 1]$, più basso è T , minore sarà l'incertezza relativa della densità rispetto a quella sul numero di conteggi. Questo si traduce in un'elevata differenza tra la misura di gamma rivelati con e senza fluido. Questa caratteristica deve però trovare il giusto compromesso con la necessità di avere un sufficiente numero di conteggi per avere una buona precisione sulla misura effettuata. Considerando questi due fattori, il valore ideale di T risulta essere circa il 60%. Una sorgente che emette raggi gamma di energia minore di 100 keV ha un coefficiente di trasmissione attraverso 50mm di acqua di circa 60%. Elementi radioattivi di questo tipo sono ad esempio ^{241}Am , ^{153}Gd e ^{133}Ba . La sorgente scelta di ^{137}Cs , emettendo fotoni di 662 keV, presenta un coefficiente di trasmissione di circa 35% [6].

- Penetrazione attraverso il metallo

Le pareti della condotta nella quale scorre il fluido sono di acciaio, lega composta principalmente da ferro ($Z=26$) e carbonio. Visto il numero atomico relativamente elevato, non si vuole che questo fattore costruttivo dello strumento influenzi troppo la misura dei conteggi, assorbendo una grande quantità di gamma provenienti dalla sorgente per effetto fotoelettrico. Viene per questo considerata la proprietà di penetrazione nell'acciaio dei gamma delle varie sorgenti. In particolare è stata analizzata la lunghezza che un fascio di determinati gamma deve percorrere affinché il fascio risulti attenuato del 99%. Naturalmente viene preferita una sorgente i cui gamma abbiano la proprietà di percorrere un lungo tratto attraverso questo materiale. A questo proposito risultano idonei soltanto i fotoni emessi da ^{133}Ba , ^{75}Se e ^{137}Cs . Un fascio di gamma proveniente dalle prime due, prima che il fascio sia attenuato fino all'1% rispetto alla sua intensità iniziale, può percorrere nell'acciaio circa 40mm. Un fascio di gamma emesso dal ^{137}Cs invece riesce a percorrere fino a 80mm. Questo fattore è uno dei principali motivi della scelta del ^{137}Cs rispetto agli altri elementi [6].

In conclusione il ^{137}Cs , pur avendo un coefficiente di trasmissione relativamente basso (35%), è l'unica sorgente con un tempo di dimezzamento caratteristico sufficientemente elevato e i cui gamma presentano la penetrazione necessaria attraverso le pareti della condotta per fare misure indipendenti dalla presenza di spessori d'acciaio. Anche il ^{133}Ba sembrerebbe in accordo con le richieste per essere utilizzato nel Q-Gamma. Il problema con questo elemento è che è di difficile reperibilità [6].

2.2.2 Detector

Tipologia di detector

La tipologia di rivelatore da installare nel Q-Gamma è stata selezionata assecondando diverse richieste:

- Rate conteggi

Ricordando che l'emissione di fotoni della sorgente segue la distribuzione di probabilità di Poisson, si può notare che la probabilità che la sorgente emetta due fotoni distanziati da un intervallo di tempo t o inferiore, se il rate di emissione medio è $1/T$, è

$$P(< t) = 1 - e^{-t/T} \approx \frac{t}{T} \quad \text{per } t \ll T \quad (2.7)$$

Questo si riflette direttamente su una specifica caratteristica richiesta per il rivelatore. Assumendo $T = 4\mu s$, che equivale ad un rate di $2.5 \cdot 10^5$ fotoni al secondo, il 10% dei fotoni incidenti nel rivelatore sono separati da 400ns o meno. Il rate di fotoni incidenti nel detector, considerando la sorgente utilizzata e la geometria del Q-Gamma, è dell'ordine di grandezza di quello ipotizzato. Ciò significa che il rivelatore deve essere in grado di separare segnali intervallati da 400ns o meno, deve cioè avere la possibilità di raggiungere un rate di conteggi maggiore di 1 MHz, in modo da massimizzare il numero di gamma rivelati per campione. Per questo motivo vengono scartati dalla possibile scelta rivelatori a gas in regime proporzionale e di Geiger-Muller in quanto troppo lenti nell'elaborare il segnale e nel distinguere due impulsi contigui.

- Adeguato intervallo di temperatura operativa

Il fatto che il Q-Gamma debba essere utilizzato in svariate condizioni di temperatura nel range tra $-30^\circ C$ e $70^\circ C$ è un fattore che riduce ancora di più la possibilità di scelta del detector. Ad esempio, rivelatori a semiconduttore in configurazione PIN, sono limitati dalla corrente di leakage dovuta al bias inverso della loro configurazione. Questa corrente è direttamente proporzionale alla temperatura e sopra i $25^\circ C$ disturba il già piccolo segnale dei gamma che attraversano il volume svuotato, rendendo inefficiente la rivelazione [6].

- Efficienza di rivelazione di fotoni di energia 662 keV

Ogni detector è caratterizzato da efficienze diverse per fotoni di energie diverse. L'efficienza di rivelazione è definita come il numero di fotoni rivelati rispetto al numero di quelli incidenti. Nel caso del Q-Gamma è naturale richiedere che l'efficienza per fotoni di energia 662 keV sia buona, sempre in modo da avere il maggior numero di conteggi possibile. Per questo motivo i rivelatori a gas in regime di ionizzazione e quelli a stato solido non sono adeguati agli scopi prefissi, avendo un'efficienza di rivelazione di fotoni di 662 keV molto più bassa a parità di costi [6].

Dopo queste considerazioni, la tipologia di rivelatore che più si addice all'obiettivo del Q-Gamma sono i cristalli scintillatori. Essi possono raggiungere un ampio volume sensibile e sono in grado

di operare a basse ed alte temperature. Inoltre presentano un'ottima efficienza per fotoni nel range di energia compreso tra 600 keV e 700 keV e sono in grado di rivelare fotoni che incidono nel cristallo con un rate di 2 MHz.

Nella famiglia dei cristalli scintillatori ci sono diverse categorie in base al materiale costituente e al principio di funzionamento, che hanno diverse proprietà:

- Inorganici: mediocre risposta temporale ma buona risoluzione energetica e buona efficienza per l'assorbimento di fotoni gamma;
- Organici: veloci ma scarsa efficienza di scintillazione e caratterizzati da un numero atomico basso ($Z=6$) quindi non efficienti per assorbimento di radiazione gamma;

I più adatti al caso del densimetro Q-Gamma sono, come si può facilmente dedurre dalle caratteristiche elencate, gli scintillatori inorganici.

Questo genere di cristalli emettono un segnale luminoso proporzionale all'energia del fotone che li attraversa. L'impulso di scintillazione può essere composto da diverse componenti luminose a seconda delle proprietà intrinseche del cristallo. Ognuna di esse è descritta da una costante di decadimento che indica il tempo necessario affinché l'intensità luminosa della relativa componente si sia ridotta di un fattore $1/e$.

In generale, nel caso degli scintillatori inorganici, si possono distinguere segnali luminosi veloci, caratteristici del fenomeno della "fluorescenza", effetto alla base del funzionamento di questi cristalli, e impulsi più lenti, dati dal fenomeno della "fosforescenza" che non sempre è presente.

Come anticipato, nel semplice caso in cui il cristallo scintillatore sia caratterizzato da un'unica costante di decadimento τ , l'intensità della luce emessa per un impulso di scintillazione decade esponenzialmente nel tempo secondo la relazione

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (2.8)$$

Per esempio, per un cristallo di NaI(Tl), il tempo di decadimento tipico è di 250ns. Ciò significa che l'intervallo di tempo necessario affinché la luce prodotta da un impulso si attenui fino al 10% rispetto alla sua intensità iniziale è 575ns [8].

Per convertire il debole segnale luminoso dello scintillatore in un corrispondente segnale elettrico, vengono usati solitamente un fotomoltiplicatore oppure un fotodiodo. Nel Q-Gamma viene installato un fotomoltiplicatore prodotto da Hamamatsu Photonics, che offre una versione di PMT adatta a funzionare in un esteso intervallo di temperature.

L'unico svantaggio nell'usare questo genere di detector è rappresentato dall'alta energia che un fotone rivelato deve avere per creare un fotoelettrone dal fotocatodo, ~ 300 eV/fotoelettrone. Questa stima tiene conto dell'energia necessaria per creare un coppia elettrone-lacuna nel cristallo, della quantum efficiency del PMT e di altri effetti secondari. Gli elettroni che formano il segnale nel caso di uno scintillatore NaI accoppiato ad un fotomoltiplicatore, a parità di energia del fotone incidente, sono l'1% rispetto a quelli che si formano in un rivelatore a semiconduttore.

Ciò comporta una netta differenza nella risoluzione energetica del segnale nei due casi [6].

Pile-up e compensazione Pole-zero

Per il densimetro Q-Gamma, visto l'alto rate di rivelazione di fotoni che si vuole raggiungere, il problema principale per la scelta del cristallo scintillatore risiede nel fenomeno denominato "pile-up".

Questo effetto non è altro che la sovrapposizione temporale di due impulsi di scintillazione.

Come analizzato precedentemente infatti, eqn. 2.7, se il rate di fotoni incidenti è circa 0.3 MHz, circa il 10% di essi è separato da meno di 330ns e l'1% da meno di 33ns. Ricordando che per un cristallo NaI, se due segnali sono separati da meno di 575ns il secondo si sovrappone al 10% del primo, per circa il 17% degli impulsi la loro durata temporale è maggiore dell'intervallo di tempo che li separa.

In queste circostanze si perde un conteggio e si ha un segnale avente ampiezza pari alla somma dei due sovrapposti (Figura 2.5). Inoltre, in caso di parziale sovrapposizione, l'ampiezza di un impulso può essere modificata in senso positivo, trovandosi l'impulso originale un "pedistallo" generato da un segnale precedente.

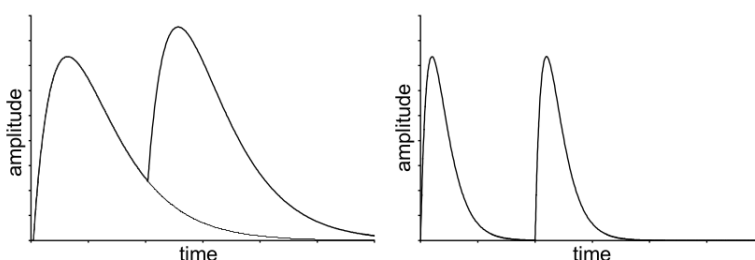


Figura 2.5: Pile-up delle ampiezze di due segnali dello scintillatore (sinistra). Dopo l'elaborazione, il primo segnale decade prima che arrivi il secondo.

Il tempo di decadimento di un cristallo scintillatore deve essere abbastanza breve da permettere un sufficiente numero di conteggi, cercando di perderne il meno possibile per l'effetto di Pile-up. Esiste, però, un sistema di circuiti, integrato nella scheda elettronica, che elabora il segnale proveniente dallo scintillatore. L'impulso di scintillazione passa attraverso dei filtri passa-alto e dei circuiti CR-RC in configurazione "Pole-zero" in modo da ottenere un segnale modellato e amplificato la cui lunghezza temporale è ridotta [13].

Con questa tecnica, denominata "Compensazione Pole-Zero", le performance di un cristallo NaI(Tl) vengono migliorate. Infatti, la costante di decadimento per lo scintillatore rimane inalterata (250ns), ma il tempo affinché l'ampiezza di un segnale si sia attenuata del 10% diventa

circa 100 ns (al posto dei 575ns impiegati dal segnale luminoso per subire lo stesso attenuamento). Questo vuol dire che la frazione di fotoni che va incontro all'effetto si Pile-Up con il 10% del segnale precedente si riduce al 3%.

Scelta del cristallo scintillatore

Per raggiungere gli obiettivi posti in fase di progettazione del Q-Gamma è richiesto uno scintillatore con le seguenti proprietà:

- Abbia una singola costante di decadimento che sia il più breve possibile, per evitare il pile-up del segnale e raggiungere un rate di conteggi dell'ordine del MHz;
- Sia indipendente dalla temperatura, in modo che la sua risposta non vari per diverse condizioni ambientali;
- Abbia una buona risoluzione del fotopicco a 662 keV (FWHM < 20%), per garantire la stabilizzazione del gain che viene discussa in seguito;
- Non presenti fosforescenza o afterglow, per ridurre il più possibile il rumore nel segnale;
- Abbia un alto numero atomico, per aumentare il numero di fotoni che interagiscono tramite effetto fotoelettrico ($\propto Z^5$) rispetto a quelli che interagiscono Compton ($\propto Z$);
- La lunghezza d'onda dei fotoni emessi sia compatibile con il fotocatodo del fotomoltiplicatore, in modo da massimizzare l'efficienza per l'ampiezza del segnale;
- Sia robusto, per minimizzare la necessità di manutenzione dello strumento;
- Abbia una radioattività intrinseca debole o nulla, in modo da non influenzare la misura dei conteggi a cui si è interessati;

Tra tutti i possibili scintillatori inorganici idonei al funzionamento del Q-Gamma ne sono stati selezionati due: l'NaI(Tl) poichè possiede un'alta efficienza di scintillazione, è facilmente reperibile e non presenta un significativo auto-assorbimento della luce prodotta. Ha però lo svantaggio di essere igroscopico.

L'altro cristallo che soddisfa le richieste della Pietro Fiorentini è il LYSO, vista la sua elevata densità e il fatto che è reperibile da diversi fornitori. Per quest'ultimo cristallo c'è il difetto che presenta una leggera radioattività intrinseca che però risulta trascurabile in confronto al rate di emissione di fotoni previsto per la sorgente. La differenza tra i due cristalli sorge per quanto riguarda la costante di decadimento dell'intensità della luce che genera il segnale: se per l'NaI(Tl) essa è 250ns, per il LYSO è circa 50ns. Inoltre, la densità del LYSO è maggiore rispetto a quello di un cristallo NaI(Tl), 3.67 g/cm^3 contro 5.37 g/cm^3 . Tutto questo sembra far convergere verso una preferenza dell'uso del LYSO sui densimetri Q-Gamma [10].

Dal punto di vista economico però, un cristallo LYSO costa 5 volte di più rispetto uno scintillatore con l'NaI(Tl). La Pietro Fiorentini ha progettato quindi dei test per confrontare le potenzialità

dei due diversi materiali scintillatori, in modo da poter scegliere quale destinare al mercato. Una delle caratteristiche che devono ancora essere approfondite dell'NaI(Tl) è la conseguenza che ha la sua dipendenza dalla temperatura nel funzionamento del densimetro Q-Gamma.

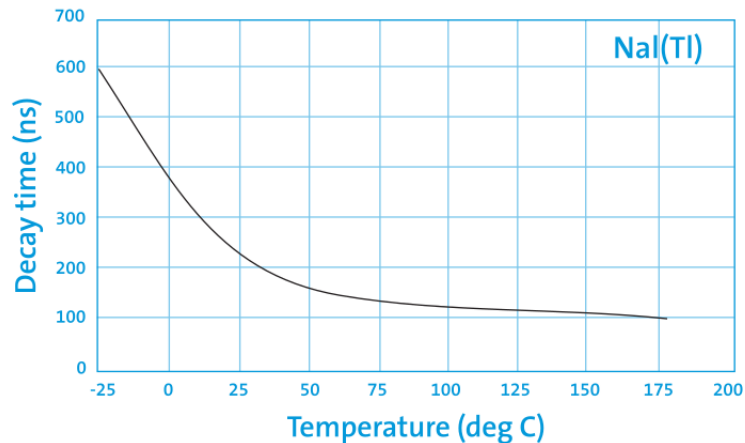


Figura 2.6: Costante di decadimento di un cristallo NaI(Tl) in funzione della temperatura secondo quanto dichiarato da un produttore.

Come si vede da Figura 2.6, la costante di decadimento dell'intensità del segnale prodotto da un cristallo NaI(Tl) è funzione della temperatura: al diminuire della temperatura esso aumenta in modo quasi esponenziale [11]. Questo può essere direttamente correlato ad un maggior Pile-Up dei segnali, e quindi ad una differente risposta dello strumento per diverse temperature. Questa è una delle ragioni che hanno spinto la Pietro Fiorentini a programmare il test descritto nel presente elaborato.

2.2.3 Elettronica e stabilizzazione del gain

Uno dei difetti dei rivelatori composti da un cristallo scintillatore abbinato ad PMT è la dipendenza del guadagno del segnale elettrico dalla temperatura. In diverse condizioni, due fotoni di uguale energia, possono originare un segnale di diversa ampiezza, a causa di questa influenza. Nel densimetro Q-Gamma il problema è risolto sfruttando le caratteristiche della forma dello spettro energetico del ^{137}Cs . In virtù del funzionamento del cristallo e del PMT, allo spettro energetico corrisponde una distribuzione delle ampiezze dei segnali elettrici la cui forma coincide con lo spettro dell'elemento radioattivo. La stabilizzazione è raggiunta sfruttando tre dei quattro comparatore posti nella scheda elettronica (Figura 2.7).

Questi strumenti confrontano l'ampiezza del segnale misurato con una tensione di soglia prefissata. Se è maggiore l'ampiezza del segnale il comparatore registra un conteggio. La tensione di soglia impostata per ogni comparatore è fissata a priori e non si può cambiare. I comparatori sono posizionati in modo tale da identificare le regioni dello spettro energetico, una

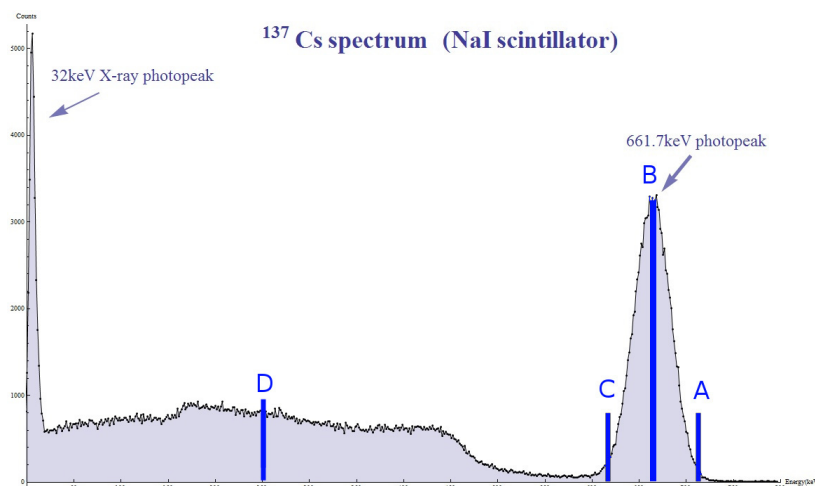


Figura 2.7: Spettro del ^{137}Cs e posizione relativa ad esso dei comparatori

volta stabilizzato il gain.

Il comparatore D è posto in modo da registrare i conteggi di tutti i raggi gamma appartenenti alla spalla Compton, al fotopicco e con energie superiori rilevati dal detector.

C, invece, conta i fotoni con un'energia tale da appartenere al fotopicco o superiore.

Il comparatore B è posto per individuare il picco a 662 keV; i suoi conteggi sono composti da tutti i fotoni con energia maggiore di 662 keV.

A, infine, conta i gamma con energia superiore a quella del fotopicco.

I comparatori A, B, C vengono sfruttati per identificare il fotopicco.

Il sistema raggiunge lo stato "Locked", cioè la stabilizzazione del gain, quando la differenza tra i conteggi forniti da C e B è uguale a quella tra i conteggi B e A. In questa condizione, infatti, la tensione di soglia impostata per B corrisponde all'ampiezza del segnale dei fotoni a 662 keV.

La variazione del guadagno sul segnale comporta una traslazione della distribuzione dei segnali elettrici, verso destra se il guadagno aumenta, verso sinistra se diminuisce.

La differenze tra i conteggi C e B e quella tra B e A cominciano a variare e non essere più coincidenti. L'alta tensione applicata dalla scheda al PMT varia di conseguenza, diminuendo se si è verificata una crescita del guadagno e viceversa, in modo che le differenze tornino ad essere uguali tra loro [6].

Il meccanismo di regolazione assicura quindi che il numero di conteggi non sia dipendente da eventuali variazioni del guadagno, fintanto che la distribuzione delle ampiezze rimane inalterata. Molteplici sono i possibili fattori che possono influenzare la forma di questa distribuzione e che non sono compensanti dalla regolazione. I loro effetti, se evidenziati nei dati presi per le diverse configurazioni, vengono discussi in seguito.

Capitolo 3

Misure e analisi dati

3.1 Obiettivi

L'esperienza consiste nello studio della variazione del numero di conteggi fornito dal densimetro Q-Gamma in funzione della temperatura, allo scopo di determinare la risposta caratteristica dello strumento nel range di temperatura tra -30° e 70°C .

A tal fine vengono studiati diversi setup sperimentali, sia per raggiungere la migliore precisione possibile, sia per essere in grado di separare l'influenza di questo parametro sul rivelatore e sull'elettronica.

Viene prima eseguita un'analisi approfondita con un cristallo scintillatore NaI ed elettronica dedicata installate nel densimetro.

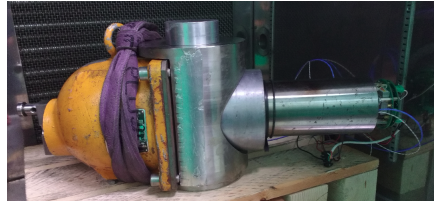
Un'ulteriore analisi viene effettuata inserendo acqua e diesel nella condotta di prova.

Infine, l'ultima configurazione di test prevede la scheda elettronica all'esterno della camera climatica e gli altri componenti del Q-Gamma all'interno.

3.2 Setup sperimentale

La strumentazione rivelatasi necessaria per la buona riuscita del test è la seguente:

- Densimetro Q-Gamma di prova, composto dalla sorgente di 50mCi di ^{137}Cs , una condotta di prova del diametro di 1.8", il detector e l'elettronica dedicata al particolare cristallo scintillatore installato. Inoltre, vengono sistemati i vari schermi di piombo in modo da assicurare l'agibilità dello strumento e la sicurezza dell'operatore;



- Camera climatica;
- Power supply che fornisce la tensione necessaria al funzionamento della scheda elettronica (24V);
- USB RS-485 converter che permette di acquisire i dati attraverso un apposito programma Labview. Il software registra i seguenti parametri, misurati in un intervallo temporale di 1 minuto:
 - Media di conteggi di A in un campione di 200ms tra tutti i campioni presi in 1 minuto;
 - Media di conteggi di B in un campione di 200ms tra tutti i campioni presi in 1 minuto;
 - Media di conteggi di C in un campione di 200ms tra tutti i campioni presi in 1 minuto;
 - Massimo numero di conteggi di D in 8ms;
 - Minimo numero di conteggi di D in 8ms;
 - Media di conteggi di D in un campione di 8ms tra tutti i campioni presi in 1 minuto;
 - Temperatura della scheda elettronica registrata attraverso un chip installato su di essa;
 - Temperatura del detector misurata attraverso una termocoppia collegata alla scheda elettronica. La termocoppia è posizionata tra il detector e lo scudo che lo circonda;
 - Alta tensione (HV) fornita al detector dalla scheda elettronica;
- Pico Data logger con 3 ulteriori termocoppie, posizionate rispettivamente in modo da fornire la temperatura della camera climatica, dell'interno della condotta e del detector (quest'ultima sistemata in modo simile a quella collegata alla scheda elettronica);
- Due diversi liquidi, acqua e diesel, per avere la possibilità di cambiare il fluido all'interno della condotta e analizzare un maggior numero di configurazioni;

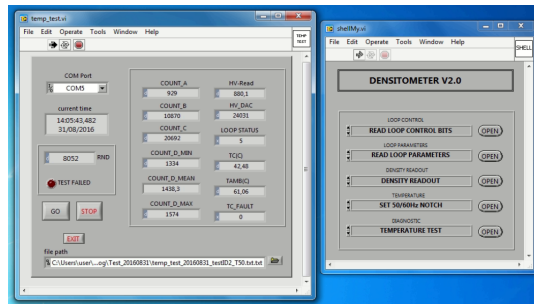


Figura 3.1: Interfaccia programma di presa dati

- Strumenti di utilità secondaria all'esperienza, come un oscilloscopio per verificare il corretto funzionamento del rivelatore e dell'elettronica in tempo reale e un contatore Geiger;

Le configurazioni analizzate sono:

1. Configurazione 1

Il densimetro Q-Gamma, equipaggiato di cristallo scintillatore NaI ed elettronica dedicata, è inserito completamente nella camera climatica. L'interno della condotta è pieno d'aria. Questa è la configurazione standard del test, a cui si fa riferimento anche per le altre misure.

2. Configurazione 1a

Il setup sperimentale è come al punto 1. Nella condotta viene inserita acqua.

3. Configurazione 1b

Lo strumento è sistemato come nella configurazione 1, all'interno della condotta viene versato diesel.

Le configurazioni 1a e 1b servono per verificare che la risposta dello strumento non vari casualmente: l'inserimento di un fluido nella condotta non deve influenzare il funzionamento di nessuna componente dello strumento.

4. Configurazione 2

Attraverso delle prolunghie per i cavi dell'HV e del segnale che collegano il rivelatore all'elettronica, la scheda viene sistemata all'esterno della camera climatica. L'interno della condotta è pieno d'aria.

Questa configurazione viene analizzata per verificare se effettivamente la variazione di temperatura non influenza la risposta della componente elettrica del densimetro.

3.3 Procedura di misura

Definiamo una "serie di dati" un insieme di misure registrate in un intervallo temporale di circa 30/40 minuti, nella condizione per la quale la temperatura del rivelatore fornita dalla scheda elettronica si è stabilizzata al valore di target e non varia per più di 1°C rispetto all'ultima

misura della serie.

La procedura per analizzare il densimetro in una certa configurazione è la seguente:

si fornisce la tensione alla scheda elettronica grazie al “Power Supply”. Tramite l’apposito software si fa variare l’HV finché il sistema non raggiunge lo stato di “Locked”. A questo punto il densimetro Q-Gamma è pronto all’utilizzo. Per avere una serie di dati ad una data temperatura, si imposta dunque la camera climatica ad una temperatura 10 gradi oltre quella di target. Ad esempio se la temperatura di partenza è 30°C e l’obiettivo è stabilizzare il setup a 40°C la camera viene scaldata fino a 50°C e quando la temperatura del detector fornita dalla scheda elettronica è in prossimità della temperatura di target si porta la camera a 40°C e si lascia stabilizzare il sistema. In questo modo si diminuisce sensibilmente il tempo per portare lo strumento alla temperatura di interesse.

Nel momento in cui la temperatura di riferimento si è stabilizzata vengono presi dati per circa 30/40 minuti.

La procedura appena descritta viene ripetuta per ogni temperatura da analizzare. L’accensione della scheda elettronica e la scansione dell’alta tensione per ricercare lo stato “Locked” sono operazioni che vengono invece eseguite solo prima di iniziare ad analizzare una data configurazione, in quanto è la scheda stessa a provvedere ad eventuali aggiustamenti dei valori di tensione in seguito a cambi di guadagno del sistema.

L’intervallo di temperatura analizzato per i diversi setup sperimentali è:

- Configurazione 1: da -30° a 70°C a step di 10°C, più una serie di dati a -5°, 5° e 15°C;
- Configurazione 1a e 1b: da 0° a 50°C a step di 10°C;
- Configurazione 2: da -30° a 70°C a step di 10°C;

Capitolo 4

Risultati sperimentali

In questo capitolo vengono presentati i dati raccolti durante l'esperienza, divisi a seconda delle diverse configurazioni del setup sperimentale.

Per ognuna di esse si hanno molteplici serie di dati a diverse temperature. In Figura 4.1 si può osservare come si presentano per la configurazione 1 queste serie di dati se si grafica ogni loro punto ($Temperatura, conteggi$) per il comparatore D, che registra tutto lo spettro del rivelatore.

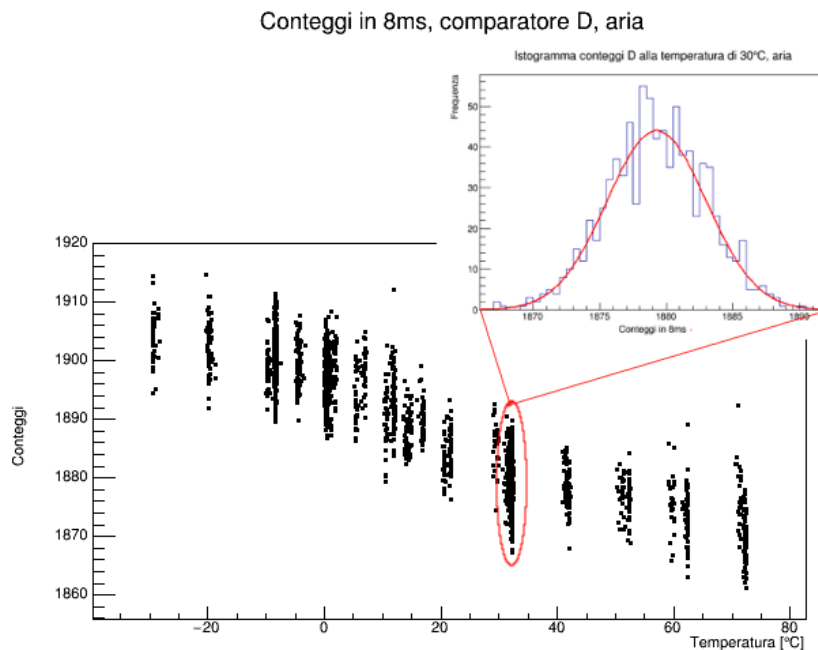


Figura 4.1: Punti di tutte le serie di dati raccolte per la configurazione 1, corrispondenti al comparatore D. In alto a destra la distribuzione dei conteggi per lo stesso comparatore di una serie di dati, alla temperatura di 30°C

Nella stessa figura, in alto a destra, si può osservare la distribuzione dei conteggi, per lo stesso comparatore, di una serie di dati a 30°C. I conteggi si distribuiscono come delle variabili casuali che seguono la distribuzione di Gauss. Per questo motivo è possibile interpolarli con una funzione gaussiana in modo da estrapolare per ogni serie di dati la media e la deviazione standard del numero di conteggi e utilizzare questi valori nel prosieguo dell'analisi dati.

Allo stesso modo si procede per la temperatura: quella letta dalla termocoppia della scheda elettronica non assume mai identicamente lo stesso valore in una serie di dati. Si procede quindi stimandone la media e la deviazione standard tra tutte le misure di ogni serie.

Viene scelta come misura più affidabile della temperatura del detector quella fornita dalla scheda elettronica perchè la termocoppia che garantisce questo dato è meglio inserita tra scudo e rivelatore rispetto alla sonda del Pico Data logger. Inoltre, è una misura che effettua direttamente un componente del densimetro, senza il bisogno di un ulteriore strumento, come lo è il Pico Data Logger.

La relazione tra le temperature del detector misurate dalle due diverse termocoppie risulta comunque costante e regolare.

Ogni configurazione sarà caratterizzata quindi da quattro grafici, ognuno corrispondente ad un diverso comparatore, che comprendono tutti i punti (T_{media} , $Conteggi_{medi}$) per quel dato setup. Siccome il valore dei conteggi corrispondente a D è relativo ad un campione di 8ms, mentre i valori corrispondenti ad A, B, C sono relativi a campioni di 200ms, per poter confrontare tra loro i grafici, questi ultimi vengono riscalati come se fossero relativi a campioni di 8ms.

Inoltre, per le configurazioni 1 e 1a sono stati presi più serie di dati per alcune temperature. In queste circostanze, tranne in Figura 4.2, viene rappresentata la media pesata di tutti i punti alla stessa temperatura.

Per le configurazioni 1a e 1b viene considerato anche il numero di conteggi medio caratteristico del fotopicco, ricavato facendo la differenza tra i comparatori C e A. È analizzato solo in quel frangente per effettuare il conto del "Peak-to-total ratio" per i tre diversi fluidi e perchè i dati che sono utilizzati dall'azienda prevedono l'utilizzo degli altri conteggi, senza mai sfruttare il fotopicco, tranne per il meccanismo di stabilizzazione del gain.

I punti originali (T_{media} , $Conteggi_{medi}$), non normalizzati allo stesso intervallo di tempo di D, vengono interpolati con diverse funzioni in modo da dedurre qual è la migliore per descrivere quei particolari dati. La scelta di usare le misure non riscalate è dettata ancora una volta dalla volontà di eseguire un'analisi che tenga in considerazione dei dati utilizzati da PF.

Nei grafici è comunque riportata la miglior funzione interpolante dei punti rappresentati.

Le funzioni utilizzate sono limitate a polinomi, al massimo di grado 3, in virtù dell'andamento dei punti osservato a priori. L'uso di soli polinomi consente inoltre una maggiore possibilità di confrontare tra loro i parametri ricavati dai fit delle diverse configurazioni.

Il polinomio che meglio descrive la dipendenza dei conteggi di un certo comparatore in funzione della temperatura T viene definito confrontando i valori delle probabilità forniti dal software per analisi dati ROOT [2] per ognuno dei fit. Nel caso in cui la probabilità risulta essere maggiore del 95% per due differenti polinomi, viene privilegiato quello con il grado più basso.

4.1 Configurazione 1

Il Q-Gamma con aria nella condotta è stato analizzato nel range di temperatura prefissato in tre modi diversi per quanto riguarda il variare temperatura della camera climatica. Un primo insieme di dati caratterizza il densimetro da 30° a 70°C, un secondo da 30°C a -30°C e infine il terzo da -30°C a 70°C.

È necessario specificare questo aspetto in quanto la risposta del Q-Gamma sembra presentare una lieve differenza se viene analizzato diminuendo oppure aumentando la temperatura. Questo si può osservare in Figura 4.2, soprattutto per quanto riguarda i dati da -30° a 30°C dei comparatori A e D.

Nel grafico sono riportati i quattro grafici dei punti (T_{medie} , $Conteggi_{medi}$) corrispondenti rispettivamente ad A, B, C e D. I dati sono divisi per colori in base all'insieme di modalità di presa dati a cui appartengono. Per ogni comparatore viene graficata inoltre la migliore funzione che descrive l'andamento dei dati determinata con il criterio discusso in precedenza. In Tabella 4.1 sono invece riportati i parametri del fit effettuato per i dati non normalizzati.

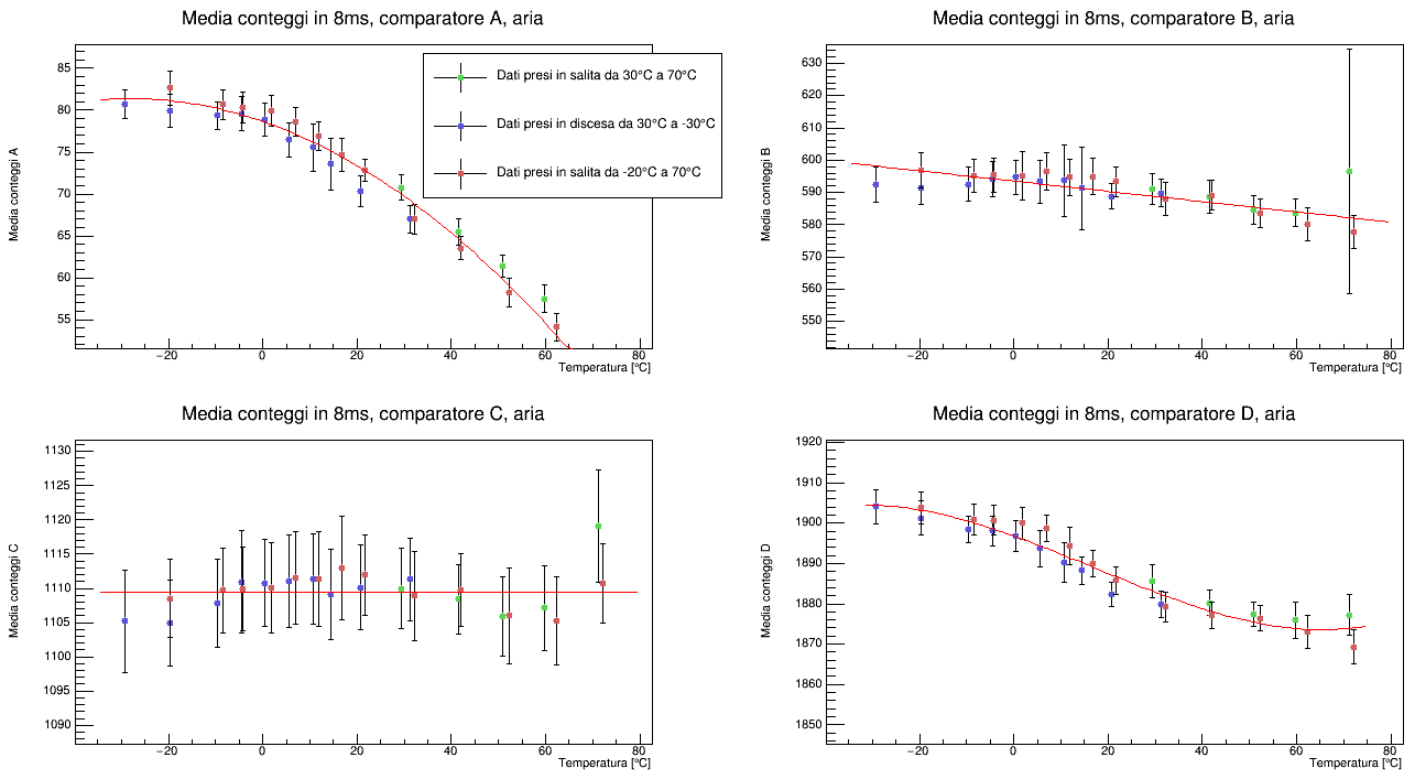


Figura 4.2: Medie dei vari conteggi, configurazione 1

Analizziamo separatamente la dipendenza delle prestazioni dei diversi comparatori dalla temperatura.

Per A, la variazione relativa di conteggi è quella più significativa nel range di temperatura con-

Comparatore	Polinomio	Parametri	Unità di misura	Probabilità
A (200ms)	$ax^2 + bx + c$	$a = (-0.09 \pm 0.01)$ $b = (-4.9 \pm 0.6)$ $c = (197 \pm 1) \cdot 10^1$	C^{-2} C^{-1}	0.89
B (200ms)	$ax + b$	$a = (-4.0 \pm 0.9)$ $b = (1484 \pm 3) \cdot 10^1$	C^{-1}	1.00
C (200ms)	c	$c = (2774 \pm 3) \cdot 10^1$		1.00
D (8ms)	$ax^3 + bx^2 + cx + d$	$a = (7 \pm 3) \cdot 10^{-5}$ $b = (-3 \pm 2) \cdot 10^{-3}$ $c = (-0.42 \pm 0.05)$ $d = (1897 \pm 1)$	C^{-3} C^{-2} C^{-1}	0.98

Tabella 4.1: Parametri migliori fit, configurazione 1

siderato. Questo comparatore è però destinato a misurare un basso numero di conteggi, relativi teoricamente a fotoni con energia superiore a quella del fotopicco. Raggi gamma di tale energia però non dovrebbero essere presenti nel sistema studiato. La maggior parte dei segnali che accetta arriva di conseguenza dal fenomeno di Pile-Up tra due segnali. È difficile quindi prevederne l'andamento in funzione della temperatura. Quel che si può notare è che il numero di conteggi aumenta con il diminuire della temperatura. Questo effetto si può ricondurre all'aumentare della durata dell'intensità della luce di scintillazione prodotta dal cristallo NaI quando la temperatura diminuisce, come descritto precedentemente. Una costante di decadimento più lunga comporta infatti un maggior Pile-Up dei segnali, aumentando il numero di conteggi fornito da A.

Per quanto riguarda i comparatori B e C, il rispettivo numero di conteggi non sembra avere particolari dipendenze dalla temperatura. Mentre C, numero di conteggi riferito al fotopicco e ai fotoni ad energia superiore, ha un andamento costante, B presenta una lieve dipendenza lineare: la variazione in funzione della temperatura, descritta dal coefficiente angolare della retta interpolante, è di 4 conteggi per grado. In termini relativi equivale ad una variazione di conteggi in 200ms dello 0,03% per grado.

D, infine, presenta un'andamento cubico rispetto alla temperatura, con il numero di conteggi che ancora aumenta al diminuire della temperatura, il che in parte giustifica e conferma quanto detto per A. Approssimando la sua dipendenza dalla temperatura con un polinomio di primo grado, si nota che la variazione del numero di conteggi ogni 8ms è circa di 0.4 conteggi per grado, cioè lo 0.02% per grado. Nel range di temperatura preso in considerazione, il quale copre circa 100°C, si stima quindi una variazione massima del numero di conteggi, tra quelli a -30°C e quelli a 70°C, di circa 40 conteggi ogni 8ms, su un totale di circa 1890 conteggi nello stesso intervallo di tempo. La variazione relativa è quindi dell'ordine del 2%.

4.1.1 Configurazione 1a e 1b

Per queste due configurazioni ripetiamo l'analisi effettuata nella precedente. In questo caso, solamente con l'utilizzo dell'acqua sono stati presi due insiemi di dati, uno da 30°

a 0°C, l'altro da 0° a 50°C. La differenza che si osservava registrando dati mentre la temperatura è in salita piuttosto che in discesa nella configurazione precedente si ripete anche in questo setup. L'intervallo di temperatura studiato è limitato da 0° a 50°C, per evitare possibili problemi derivanti dal congelamento dell'acqua all'interno della condotta.

Per quanto riguarda l'analisi dello strumento con il diesel al suo interno, viene preso solo un'insieme di dati, da 0° a 50°C.

L'effetto sui dati forniti dal dispositivo quando viene cambiato il fluido all'interno della condotta

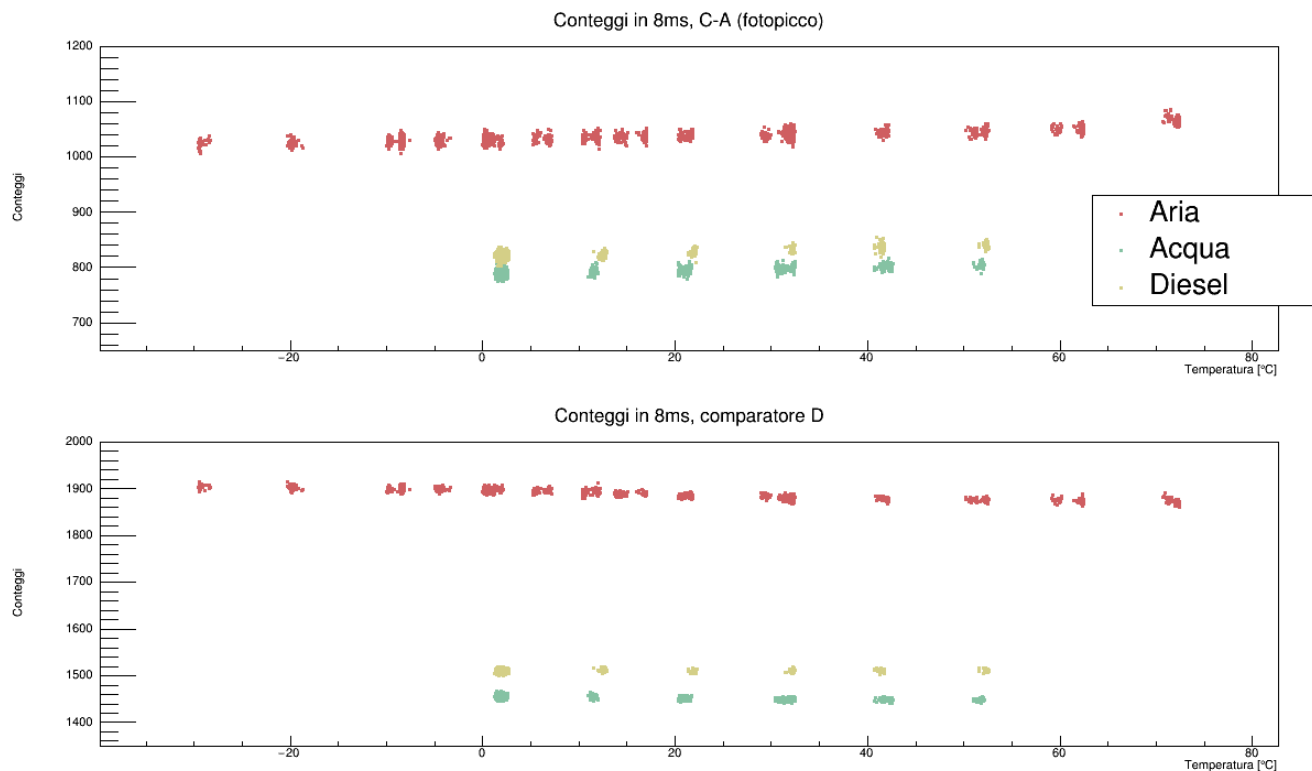


Figura 4.3: Confronto conteggi per le configurazioni con aria, acqua o diesel nella condotta

è evidente: con una densità maggiore il numero di conteggi diminuisce (Figura 4.3). In particolare l'acqua ha una densità maggiore del diesel: $\sim 1000 \text{ kg/m}^3$ il primo fluido, $\sim 840 \text{ kg/m}^3$ il secondo.

In Figura 4.3 sono stati riportati i conteggi relativi all'intero integrale dello spettro, il comparatore D, e la differenza tra i conteggi forniti da C e da A normalizzati. Siccome C identifica i fotoni con energia appartenente al fotopicco o superiore mentre A i gamma che hanno un'energia superiore a quelle caratteristiche del fotopicco, facendo la differenza fra questi due conteggi ho una stima di quelli che sono i conteggi derivanti dai fotoni che appartengono al fotopicco.

Questa può essere interessante per stimare il "Peak-to-total ratio" nelle tre diverse configurazioni 1, 1a e 1b. Oltre ad osservare il fenomeno di assorbimento infatti, inserendo fluidi di diversa

densità, ci si aspetta che, attraversando la condotta, i fotoni interagiscano sempre più per effetto Compton con esso all'aumentare della densità. Questo comporta una maggiore quantità di gamma rivelati dal detector che appartengono alla spalla Compton dello spettro energetico.

In termini di conteggi forniti dai diversi comparatori, ci si aspetta una diminuzione del rapporto tra la differenza dei conteggi C e A e quelli corrispondenti a D.

In Figura 4.4 si può osservare il "Peak-to-total ratio" per i tre fluidi in funzione della temperatura.

L'effetto descritto è evidente solamente se si confrontano la configurazione con l'aria e una delle

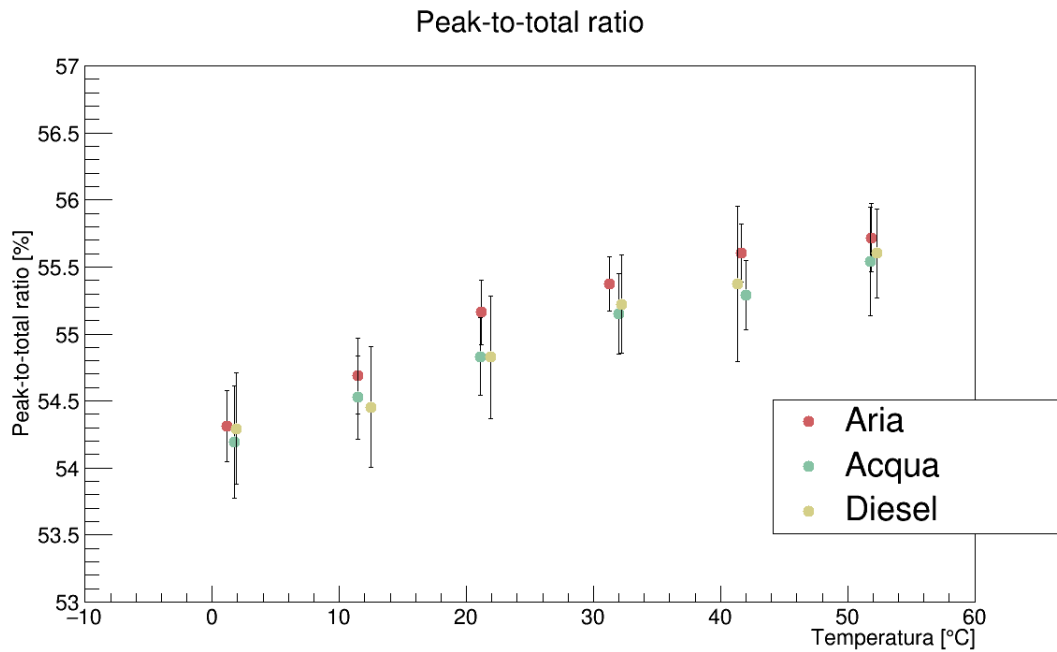


Figura 4.4: Rapporto tra la differenza dei conteggi C ed A e quelli D in funzione della temperatura.

due con i fluidi. Con acqua nella condotta ci si aspetterebbe che il rapporto sia costantemente minore rispetto al setup con il diesel. La differenza tra le densità dei due fluidi è però minima rispetto alla differenza tra le stesse densità e quella dell'aria.

Il fatto che il rapporto diminuisca al diminuire della temperatura può essere causato, tra tutti i possibili effetti, dall'aumentare della costante di decadimento del cristallo NaI(Tl). Questo infatti comporta, come già discusso, un maggior Pile-up dei segnali che peggiora la risoluzione energetica del fotopicco che si ha con i comparatori e, inoltre, innalza segnali sopra la soglia di D, aumentandone i conteggi.

Per quanto riguarda invece l'assorbimento, che comporta un minor numero di conteggi se il fluido ha una densità più elevata, si può effettuare il seguente conto.

Si considerano misure di calibrazione i dati raccolti nella configurazione 1 e 1a alla stessa temperatura. Ipotizzando noto il valore della densità dell'acqua alla temperatura prescelta, si può

ricavare una stima della densità del diesel per una serie di dati nella configurazione corrispondente.

Dall'eqn. 2.3, infatti, se N_0 è il numero di conteggi nella configurazione 1, nella configurazione con l'acqua, vale la relazione:

$$N_{acqua} = N_0 e^{-\mu_{acqua} \rho_{acqua} x}$$

nella quale μ_{acqua} è il coefficiente di assorbimento per l'acqua, ρ_{acqua} la sua densità.

Dalla precedente equazione si può ricavare il prodotto μx e, nell'approssimazione che il coefficiente di assorbimento per acqua e diesel sia lo stesso, la densità del diesel viene stimata attraverso:

$$\rho_{diesel} = \rho_{acqua} \cdot \frac{\ln N_0 - \ln N_{diesel}}{\ln N_0 - \ln N_{acqua}} \quad (4.1)$$

Prendendo come riferimento sempre le serie di dati a 30°C nelle tre configurazioni, la densità stimata del diesel risulta $\rho_{diesel} = 836 \pm 11 \text{ kg/m}^3$, in accordo con le stime che sono riportate in letteratura. Queste riportano un valore per la densità del diesel a 30°C di circa 824 kg/m^3 . Bisogna però tener conto dell'approssimazione effettuata nel ricavare eqn. 4.1.

Si prosegue ora con l'analisi dati standard, come riportato all'inizio del capitolo. In Tabella 4.2 si possono osservare i parametri delle funzioni che meglio si addicono a descrivere l'andamento delle medie dei conteggi con la condotta riempita di acqua, in tabella 4.3 utilizzando invece il diesel.

Comparatore	Polinomio	Parametri	Unità di misura	Probabilità
A (200ms)	$ax + b$	$a = (-6.8 \pm 0.7)$ $b = (123 \pm 2) \cdot 10^1$	C^{-1}	0.98
B (200ms)	c	$c = (1101 \pm 01) \cdot 10^1$		0.99
C (200ms)	c	$c = (2097 \pm 4) \cdot 10^1$		1.00
D (8ms)	$ax + b$	$a = (-0.15 \pm 0.07)$ $b = (1455 \pm 2)$	C^{-1}	0.99

Tabella 4.2: Parametri migliori fit, configurazione 1a

Comparatore	Polinomio	Parametri	Unità di misura	Probabilità
A (200ms)	$ax^2 + bx + c$	$a = (-0.04 \pm 0.05)$ $b = (-7 \pm 3)$ $c = (130 \pm 4) \cdot 10^1$	C^{-2} C^{-1}	0.96
B (200ms)	c	$c = (1152 \pm 5) \cdot 10^1$		0.99
C (200ms)	$ax + b$	$a = (3 \pm 3)$ $b = (218 \pm 1) \cdot 10^2$	C^{-1}	0.99
D (8ms)	c	$c = (1511 \pm 1)$		1.00

Tabella 4.3: Parametri migliori fit, configurazione 1b

Non è significativo confrontare i parametri dei migliori fit calcolati per la configurazione 1 con quelli di questi altri due setup, in quanto l'intervallo di temperatura a cui si riferiscono i dati non è lo stesso. È possibile limitare l'analisi dei dati nella prima configurazione allo stesso range di temperatura ma anche in questo caso il confronto tra i vari setup non risulta significativo. Infatti l'andamento dei conteggi in funzione della temperatura, in particolare per i comparatori C e D, risulta essere leggermente diverso per le tre configurazioni, come si può vedere da Figura 4.5. Il grafico rappresenta le medie per le diverse configurazioni normalizzate al rispettivo numero medio di conteggi a 30°C. Questo valore viene ricavato valutando a 30°C la funzione che rappresenta il miglior fit del comparatore analizzato di una data configurazione.

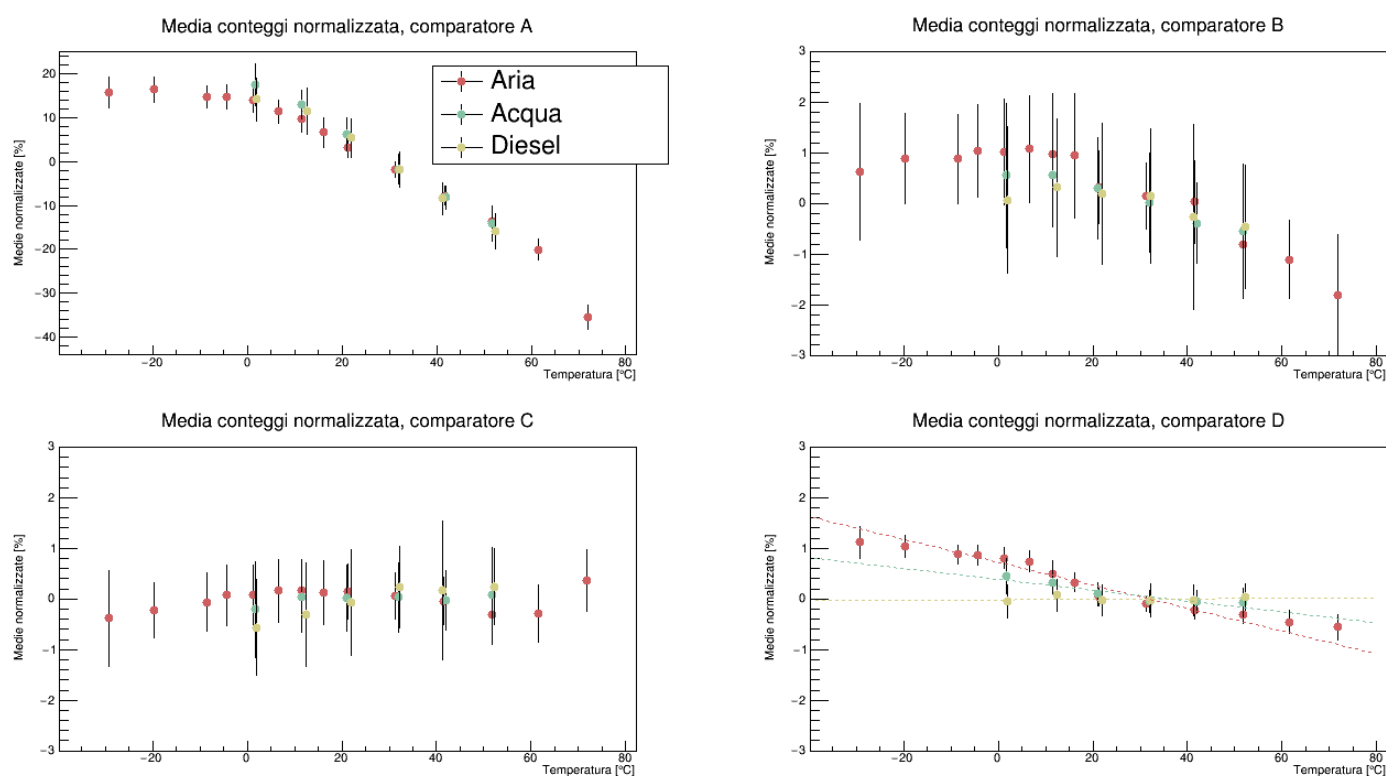


Figura 4.5: Confronto medie conteggi per le configurazioni con aria, acqua o diesel nella condotta

4.1.2 Correzione densità

La variazione della dipendenza del numero di conteggi dalla temperatura avendo diversi fluidi all'interno della condotta non è un effetto previsto dai fenomeni fisici su cui si basa il densimetro. Introdurre un fluido con una densità maggiore rispetto all'aria dovrebbe solamente far diminuire proporzionalmente il numero di conteggi rilevati dall'elettronica ma non influire ne sul funzionamento del detector ne su quello della stessa elettronica. La correzione da applicare ai dati affinché il problema sollevato nel paragrafo precedente e osservabile in Figura 4.5 venga spiegato

è da cercare nella dipendenza della densità dalla temperatura.

Mentre per l'aria la variazione della densità in funzione del parametro temperatura è trascurabile ai nostri fini, per l'acqua e il diesel la densità varia apprezzabilmente nel range di temperatura considerato.

Ambedue i fluidi aumentano la loro densità al diminuire della temperatura, con la differenza che la densità del diesel aumenta linearmente secondo la relazione [3]:

$$\rho(T) = 843.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} - 0.651 \text{ kg} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-3} T \quad (4.2)$$

mentre quella dell'acqua ha un andamento parabolico con vertice (densità massima) a circa 4°C [12]:

$$\rho(T) = 999.891 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} + 0.025 \text{ kg} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-3} T - 0.0055 \text{ kg} \cdot \text{C}^{-2} \cdot \text{m}^{-3} T^2 \quad (4.3)$$

Ciò comporta che, diminuendo la temperatura, il numero di conteggi, oltre a variare perchè cambia la risposta dello strumento, diminuisce in quanto la densità del fluido aumenta. Essendo interessati alla risposta del solo densimetro rispetto ad una variazione della temperatura si deve cercare di eliminare questa dipendenza del fluido dallo stesso parametro, che non è parte dello strumento.

La correzione è stata calcolata a partire dall'eqn. 2.3.

Derivando il numero di conteggi in funzione della densità:

$$dN_\rho = -N_0 \cdot \mu x e^{-\mu \rho x} d\rho$$

e ricavando dalla stessa equazione il prodotto μx ,

$$\mu x = -\ln \frac{N_\rho}{N_0} \cdot \frac{1}{\rho}$$

si ottiene, dopo alcune semplici sostituzioni,

$$\Delta N_\rho = \ln \frac{N_\rho(T_i)}{N_0} \cdot N_\rho(T_i) \cdot \frac{\Delta \rho(T)}{\rho(T_i)} \quad (4.4)$$

L'eqn. appena ricavata descrive approssimativamente in che modo ad una variazione di densità $\Delta \rho = \rho(T_f) - \rho(T_i)$, nel nostro caso imputabile ad una variazione di temperatura del fluido, segue una variazione nel numero di conteggi tra due temperature differenti $\Delta N_\rho = N(\rho_f) - N(\rho_i)$.

A partire da questa relazione vengono corretti i numeri di conteggi appartenenti alle configurazioni con acqua e diesel nella condotta.

La correzione viene applicata tra temperature di step contigui.

N_0 , numero di conteggi di riferimento quando nella condotta è presente aria, è stato calcolato valutando il miglior fit per ogni comparatore nella configurazione a 30°C.

$\Delta \rho(T)$ viene invece stimato per i diversi fluidi attraverso le due equazioni precedentemente riportate, a seconda che nella condotta ci sia acqua o diesel, valutandole alla temperatura corri-

spondente al passo i -esimo e al passo successivo.

$N_\rho(T_i)$, infine, è la media dei conteggi già corretta alla temperatura i -esima.

Prendendo come riferimento la temperatura a 30°C , la prima correzione viene calcolata per i dati a questa temperatura mediante le stime del numero di conteggi a 30°C dei polinomi interpolanti selezionati. Il processo di correzione viene iterato sempre tra temperature di punti contigui e il valore della correzione viene via via sommato rispetto al punto a 30°C .

Il grafico con i dati corretti e rinormalizzati tramite i valori della funzione che meglio descrive i nuovi dati valutata a 30°C , è rappresentato in Figura 4.6.

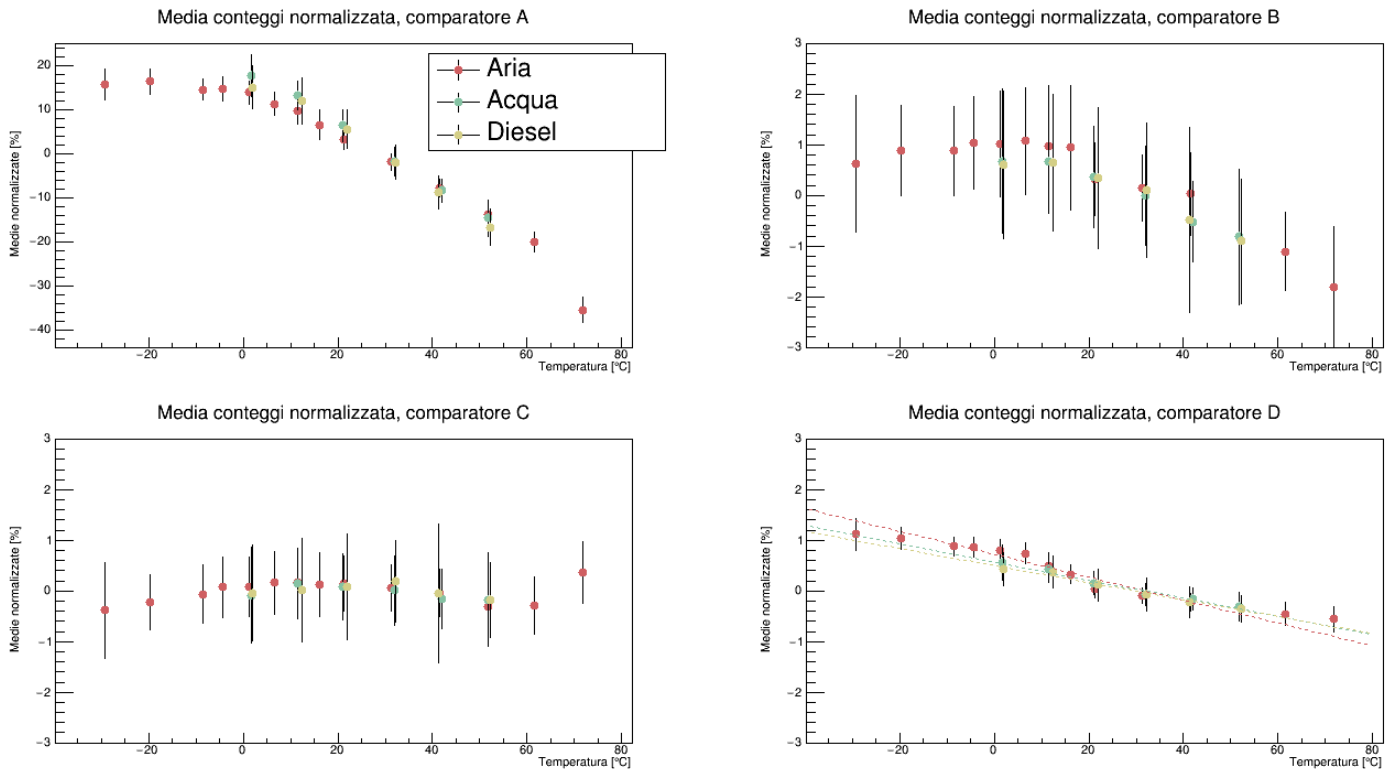


Figura 4.6: Confronto medie conteggi corretti per le configurazioni con aria, acqua o diesel nella condotta

Come si può vedere, dopo aver eliminato la dipendenza della densità dalla temperatura nella misura del numero di conteggi con la correzione appena applicata, l'andamento del numero di conteggi per i vari comparatori in funzione del parametro temperatura sembra essere quasi lo stesso per le tre configurazioni 1, 1a e 1b.

Per dimostrare quanto appena affermato riportiamo i parametri delle funzioni che meglio si prestano a fungere da "fit" per le misure riguardanti la configurazione con aria ma nel range di temperatura tra 0° e 50°C e i dati corretti con acqua o diesel all'interno della condotta.

Comparatore	Polinomio	Parametri	Unità di misura	Probabilità
A (200ms)	$ax + b$	$a = (-9.7 \pm 0.6)$ $b = (201 \pm 2) \cdot 10^1$	C^{-1}	0.90
B (200ms)	$ax + b$	$a = (-5 \pm 2)$ $b = (1112 \pm 7) \cdot 10^1$	C^{-1}	1.00
C (200ms)	c	$c = (2775 \pm 4) \cdot 10^1$		1.00
D (8ms)	$ax^2 + bx + c$	$a = (-0.001 \pm 0.001)$ $b = (-0.42 \pm 0.05)$ $c = (1895.5 \pm 0.9)$	C^{-2} C^{-1}	0.91

Tabella 4.4: Parametri migliori fit, configurazione 1, temperatura tra 0° e 50°C

Comparatore	Polinomio	Parametri	Unità di misura	Probabilità
A (200ms)	$ax + b$	$a = (-7.0 \pm 0.7)$ $b = (123 \pm 2) \cdot 10^1$	C^{-1}	0.98
B (200ms)	$ax + b$	$a = (-3 \pm 4)$ $b = (1112 \pm 7) \cdot 10^1$	C^{-1}	1.00
C (200ms)	c	$c = (2099 \pm 4) \cdot 10^1$		1.00
D (8ms)	c	$c = (1450 \pm 1)$		1.00

Tabella 4.5: Parametri migliori fit, configurazione 1a corretta

Comparatore	Polinomio	Parametri	Unità di misura	Probabilità
A (200ms)	$ax^2 + bx + c$	$a = (-0.05 \pm 0.05)$ $b = (-5 \pm 3)$ $c = (131 \pm 4) \cdot 10^1$	C^{-2} C^{-1}	0.96
B (200ms)	$ax + b$	$a = (-4 \pm 3)$ $b = (1163 \pm 9) \cdot 10^1$	C^{-1}	1.00
C (200ms)	c	$c = (2190 \pm 6) \cdot 10^1$		1.00
D (8ms)	$ax + b$	$a = (-0.25 \pm 0.08)$ $b = (1519 \pm 3)$	C^{-1}	0.99

Tabella 4.6: Parametri migliori fit, configurazione 1b corretta

Si calcola poi la compatibilità tra i coefficienti angolari dei polinomi di primo grado usati come fit di queste misure, in quanto sono gli unici parametri confrontabili tra le diverse configurazioni considerate. Inoltre, da Figura 4.6, si può osservare che ipotizzare un andamento lineare nel range tra 0° e 50°C dei vari grafici corretti non è troppo restrittivo. La dipendenza dalla temperatura dei quattro diversi conteggi per acqua e diesel risulta essere molto simile per ognuno di essi. Anche l'andamento dei conteggi B e C per l'aria e i due fluidi è compatibile, questo perchè i comparatori B e C sembrano quasi indipendenti dalla variazione di temperatura. Diverso il discorso per i comparatori A e D: entrambi hanno un andamento che non è propriamente lineare se la condotta è riempita di aria. È quindi una piccola forzatura utilizzare i parametri del fit di una funzione lineare. Nonostante questo, i coefficienti angolari tra aria, acqua, diesel risultano discretamente compatibili anche per questi conteggi.

Configurazioni confrontate	Comparatori			
	A	B	C	D
Acqua - Aria	2.97	0.51	0.25	1.94
Diesel - Aria	2.16	0.45	0.35	1.88
Acqua - Diesel	0.42	0.001	0.12	0.06

Tabella 4.7: Compatibilità tra coefficienti angolari di polinomi di primo grado usati come fit per le configurazioni 1 e 1a e 1b corrette

4.2 Configurazione 2

Vengono ora presentati i dati riguardanti la configurazione nella quale la scheda elettronica è posta al di fuori della camera climatica, in modo da poter variare la temperatura del detector mentre quella della scheda rimane costante tra 25° e 35°C. L'obiettivo del test di questo setup è cercare di distinguere la dipendenza dalla temperatura del detector dalla dipendenza dell'elettronica, per poter meglio caratterizzare la risposta delle due componenti.

I risultati che si ottengono devono essere però soppesati da un fattore logistico non indifferente. Infatti, per poter sistemare fuori la scheda elettronica essa è stata collegata al detector attraverso due cavi, una per l'alta tensione, di 150cm, l'altro per il segnale, di 40cm, molto più lunghi rispetto ai cavi utilizzati nelle altre configurazioni. L'utilizzo di cavi di lunghezza maggiore provoca un aumento del rumore che disturba il segnale in output. Questo si traduce, nel caso in analisi, in una sovrastima dei conteggi, soprattutto di D, in quanto la soglia prefissata potrebbe non essere sufficientemente elevata da scartare i segnali dovuti al rumore. Inoltre, essendo il rumore di questa natura proporzionale alla temperatura, il problema dovrebbe persistere maggiormente ad alte temperature rispetto alle basse. Alla luce di queste considerazioni, prima di commentare i risultati ottenuti nella corrente configurazione, è doveroso tener conto di questa complicazione. Le medie (non normalizzate perchè confrontabili) per ogni serie di dati ad una data temperatura possono essere visualizzate in Figura 4.7.

Mentre per i conteggi A, B, C non si evidenzia alcun cambiamento nell'andamento del numero di conteggi in funzione della temperatura, i conteggi D sembrano avere una diversa dipendenza

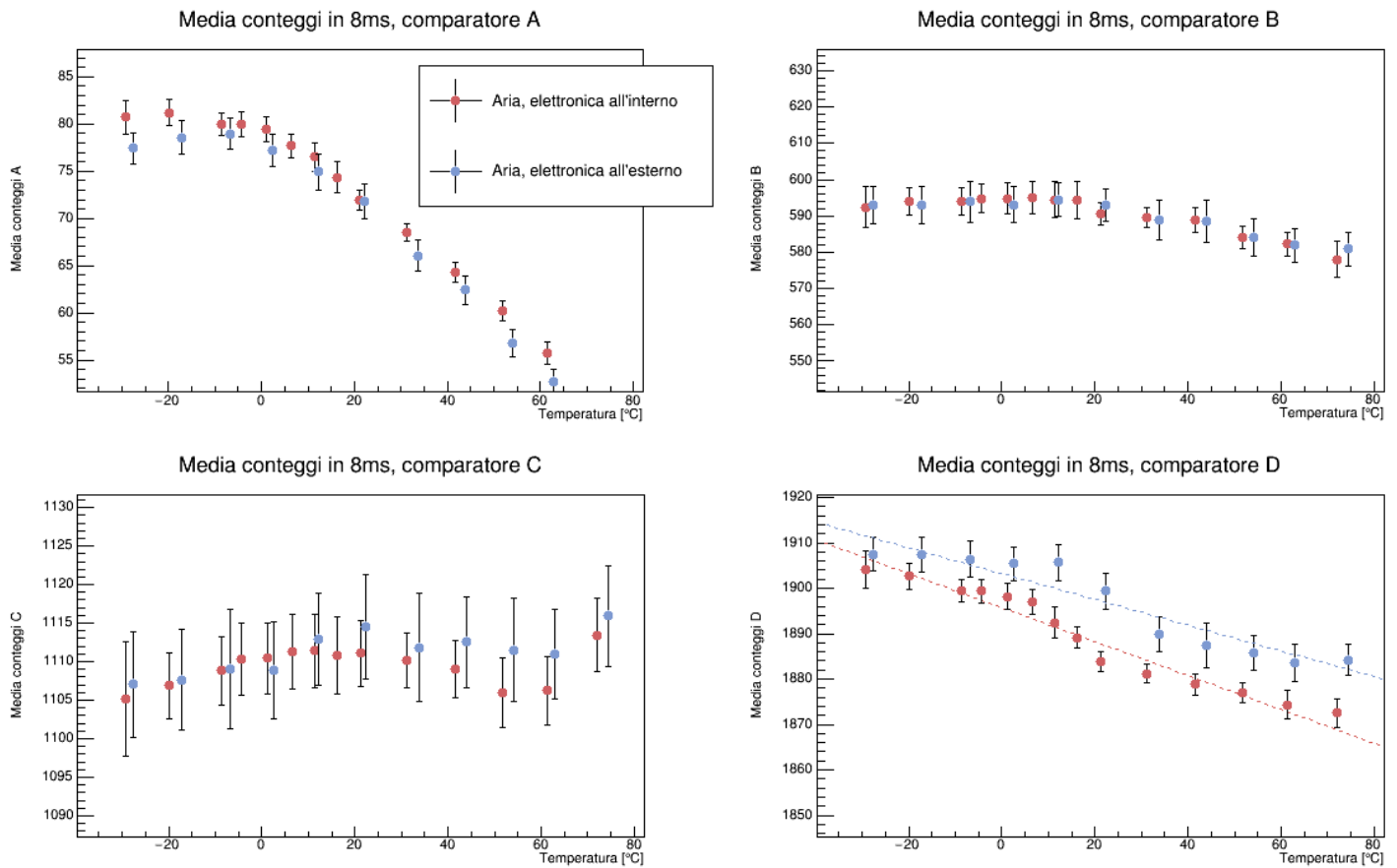


Figura 4.7: Confronto medie dei vari conteggi, con elettronica all'interno o all'esterno della camera climatica

rispetto agli stessi nella configurazione 1. Questo è segno che per i primi tre comparatori, la variazione di temperatura influenza la risposta per la parte del detector e non dell'elettronica. Diverso il discorso per il comparatore D: l'andamento è simile per le due configurazioni ma per l'ultima testata sembra esserci una sovrastima sistematica del numero di conteggi. Questo effetto può essere ricondotto alla causa di rumore prima discussa. È comprensibile che questo effetto venga evidenziato nei conteggi di questo particolare comparatore in quanto è quello che comprende tutta la regione compton in cui si ha il minor controllo di tutte le possibili conseguenze che il rumore può comportare.

Si riportano per completezza i parametri dei migliori fit per la configurazione con l'elettronica fuori (Tabella 4.9). Per evidenziare quanto appena detto si riportano le compatibilità tra i coefficienti angolari di fit lineari dei dati delle due configurazioni per gli stessi comparatori (Tabella 4.8).

Dalle compatibilità ottenute si può dedurre, come si poteva già osservare dal grafico, che per quanto riguarda i primi tre comparatori, A, B e C l'andamento è lo stesso per le due configu-

Comparatori			
A	B	C	D
0.88	0.33	0.72	2.04

Tabella 4.8: Compatibilità tra coefficienti angolari di polinomi di primo grado usati come fit per le configurazioni 1 e 2

razione e i parametri sono compatibili tra loro, come ci si aspettava. Per quanto riguarda D i coefficienti angolari sono meno compatibili per l'effetto discusso precedentemente dovuto al maggior rumore nel segnale in uscita.

Comparatore	Polinomio	Parametri	Probabilità
A (200ms)	$ax^2 + bx + c$	$a = (-0.09 \pm 0.01)$ $b = (-4.0 \pm 0.8)$ $c = (192 \pm 2) \cdot 10^1$	0.97
B (200ms)	$ax + b$	$a = (-3 \pm 1)$ $b = (1482 \pm 5) \cdot 10^1$	0.99
C (200ms)	c	$c = (2778 \pm 5) \cdot 10^1$	1.00
D (8ms)	$ax^3 + bx^2 + cx + d$	$a = (9 \pm 5) \cdot 10^{-5}$ $b = (-7 \pm 3) \cdot 10^{-3}$ $c = (-0.27 \pm 0.07)$ $d = (1907 \pm 2)$	0.97

Tabella 4.9: Parametri migliori fit, configurazione 2

Capitolo 5

Conclusioni

Il Q-gamma, equipaggiato con un cristallo scintillatore NaI(Tl), è stato analizzato in quattro differenti configurazioni, in modo da poter caratterizzare la sua risposta in funzione della temperatura.

Per ognuna di esse si riportano le considerazioni essenziali fatte nel capitolo 4.

- Configurazione 1 (Densimetro all'interno della camera climatica e aria nella condotta)
Il numero di conteggi dei comparatori B, C e D ha una variazione dell'ordine del 2-3% nel range di temperatura da -30° a 70°C . Il comparatore A, invece, è caratterizzato da un numero di conteggi che varia più sensibilmente. Per raggiungere l'obiettivo dello strumento, cioè il calcolo della densità, si sfrutta però solamente il comparatore D.
La dipendenza dalla temperatura dei segnali che oltrepassano la soglia di questo comparatore può essere descritta attraverso un polinomio di terzo grado.
- Configurazione 1a e 1b (Rispettivamente acqua o diesel nella condotta)
Vengono versati dei liquidi di diversa densità all'interno della condotta in modo da poter verificare il corretto funzionamento del Q-Gamma, in un intervallo di temperatura ristretto da 0° a 50°C . Grazie ai dati raccolti è stato infatti possibile stimare la densità del diesel ottenendo un valore in accordo con quelli presenti in letteratura. Per poter invece osservare la dipendenza della risposta del densimetro dalla temperatura è stato necessario eliminare la dipendenza dallo stesso parametro della densità dei due fluidi. Una volta implementata questa correzione, è possibile notare che il numero di conteggi dei diversi comparatori ha lo stesso andamento in funzione della temperatura rispetto ai dati raccolti nella configurazione 1.
- Configurazione 2 (Scheda elettronica all'esterno della camera climatica)
In base alle misure effettuate in questa configurazione è possibile concludere che la componente che più influenza la risposta del Q-Gamma in funzione della temperatura è il detector. Infatti seppur la scheda rimanga ad una temperatura quasi costante e vari solo quella di cristallo scintillatore e PMT, il numero di conteggi ha un andamento simile alle altre configurazioni.

L'obiettivo della tesi è stato quindi raggiunto in quanto è stata caratterizzata la risposta del densimetro Q-Gamma in funzione della temperatura.

Grazie agli algoritmi determinati per i conteggi dei diversi comparatori, si è in grado di compensare la dipendenza dalla temperatura e rendere costante la risposta dello strumento. Questo permette di ottenere una stima più precisa della densità del flusso all'interno della condotta a temperature diverse da quella di calibrazione.

Bibliografia

- [1] Blaney S., *Gamma Radiation Methods for Clamp-On Multiphase Flow Metering*, Phd thesis, Supervisor: Dr. H. Yeung, February 2008.
- [2] Brun R., Rademakers F., *ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework*, *Proceedings AIHENP'96 Workshop*, Lausanne, Sep. 1996, Nucl. Inst. & Meth. in Phys. Res. A 389 (1997) 81-86.
- [3] Esteban B., Riba J., Baquero G., Rius A., Puig R., *Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils*, in "Biomass and Bioenergy", Vol. 42, July 2012, 164–171.
- [4] Falcone G., Hewitt G. F., Alimonti C., *Multiphase Flow Metering: principles and application*, in "Developments in Petroleum Science", Vol. 54, London, Elsevier, 2013.
- [5] Falcone G., Hewitt G. F., Alimonti C., Harrison B., *Multiphase Flow Metering: Current Trends and Future Developments*, in "Journal of Petroleum Technology", 54(04) April 2013, JPT, 2013, 77-84.
- [6] Fortescue T. R., *Quick-Gamma Densitometer Design Report*, Pietro Fiorentini, 2010.
- [7] Helmer R. G., Chechev V.P., *LNE - LNHB / CEA Table de Radionucléides*, http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Cs-137_tables.pdf in data 5/09/2016.
- [8] Knool G. F., *Radiation Detection and Measurement*, 3rd edition, New York, John Wiley and Sons, Inc, 1999.
- [9] Krane K. S., *Introductory nuclear physics*, 2nd edition, New York, John Wiley and Sons, Inc, 1988.
- [10] Pepin C. M., Bérard P., Perrot A., Pépin C., Houde D., Lecomte R., Melcher C. L., Dautet H., *Properties of LYSO and Recent LSO Scintillators for Phoswich PET Detectors*, in "IEEE transactions on nuclear science", Vol. 51, no. 3, Giugno 2004, 789-795.
- [11] Saint-Gobain Ceramics & Plastics, Inc., *NaI(Tl) and Polyscin® NaI(Tl) Sodium Iodide*, 2014, [http://www.crystals.saint-gobain.com/uploadedFiles/SG-Crystals/Documents/NaI\(Tl\)%20Data%20Sheet.pdf](http://www.crystals.saint-gobain.com/uploadedFiles/SG-Crystals/Documents/NaI(Tl)%20Data%20Sheet.pdf), 19/09/2016.

- [12] Spieweck F., Bettin H., *Review: solid and liquid density determination*, in *Technisches Messen* 59 (1992), pp. 285-292.
- [13] Tavernier S., *Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics*, London, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.