

SISTEMA PER LA RIVELAZIONE DEL TRANSITO ILLECITO DI MATERIALI RADIOATTIVI

Dr.ssa Silvia Cipiccia

Tutor: Ing. Vanio Ortenzi
Cotutor: Sig. Maurizio Borreca

Sommario:

<i>Riassunto</i>	2
<i>Abstract</i>	3
Capitolo 1: Introduzione	4
Capitolo 2: La protezione dalle radiazioni e gli effetti Biologici	5
2.1 La radioattività.....	5
2.2 Gli effetti biologici delle radiazioni.....	6
2.2.1 La dose Limite	7
Capitolo 3: Il trasporto di materiale radioattivo e le misurazioni radiometriche.....	9
3.1 La regolamentazione AIEA per il trasporto del materiale radioattivo.....	9
3.2 Metodi il controllo dei livelli esterni di radiazione.....	9
3.2.1 Dispositivi di rivelazione portatili e fissi a confronto.....	9
Capitolo 4: Sistemi di rivelazione a portali.....	12
4.1 Schemi a blocchi di un sistema di rivelazione a portali:.....	12
4.1.1 Rivelazione della radiazione di fondo.....	12
4.1.2 Passaggio di un automezzo	13
4.1.3 Depressione e sottrazione del fondo	13
4.1.4 Completamento del processo di misurazione	14
4.2 Limiti del sistema di rivelazione fisso a portali.....	14
Capitolo 5: Il sistema di rivelazione radiometrica “ON/OFF”	15
5.1 L’utilità di un sistema radiometrico “ON/OFF”	15
5.2 Il cuore del portale ON/OFF: il dispositivo di rivelazione	15
5.2.1 Le interazioni dei raggi- γ	16
5.2.2 Panoramica sui rivelatori gamma.....	17
5.2.3 La scelta del rivelatore	21
5.2.4 Il fotomoltiplicatore: caratteristiche generali.....	22
5.2.5 La scelta del fotomoltiplicatore	24
5.3 Stima del rumore del rivelatore e dell’elettronica associata	26
5.4 Il ruolo dell’informatica	27
Capitolo 6: Conclusioni	30
<i>Bibliografia:</i>	31

Riassunto

In tutto il mondo è notevole il traffico di materiale radioattivo, (stimato essere pari a 10 milioni di imballaggi l'anno), ciò rende possibile l'esposizione, anche se temporanea, di persone del pubblico a deboli campi di radiazioni.

L'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA), per proteggere persone, beni e ambiente dagli effetti delle radiazioni nel corso del trasporto di materiale radioattivo, ha emesso un regolamento che prevede:

- Confinamento dei contenuti radioattivi
- Controllo dei livelli di radiazione esterni
- Prevenzione della criticità
- Prevenzione dei danni causati dal calore

Per quanto riguarda il controllo del livello di radioattività all'esterno, allo stato attuale esistono dei sistemi di rivelazione portatili e fissi. I sistemi di rivelazione fissi (portali) sono più vantaggiosi dei portatili in quanto consentono il controllo remoto del processo di misurazione, ma hanno una limitata possibilità di applicazione. La massima velocità consentita per l'attraversamento dei rivelatori è, infatti, di circa 8 km/h: ne segue che è possibile installare portali di rivelazione solo in presenza di barriere (dogane, autostrade, etc.).

Lo scopo del presente lavoro è lo studio di un sistema innovativo per la rivelazione della radioattività "ON/OFF", ad alta sensibilità e rapidità di risposta, in grado di misurare un campo di radiazioni indipendentemente dalla velocità della sorgente, e di identificare un automezzo radiocontaminato per consentirne il successivo arresto.

Ciò consentirà una maggiore possibilità di applicazione dei sistemi di rivelazione e un più accurato controllo del trasporto di materiali radioattivi.

Nella tesi sono valutati i requisiti più idonei per l'apparato di rivelazione, per l'elettronica e per il sistema informatico, necessari per la realizzazione del sistema "ON/OFF".

System for illicit transportation of radioactive materials detection

Abstract

Handling of radioactive materials all over the world is significant (estimated to be more than 10 millions of packages each year) so people may be exposed to radiation fields

In order to protect people, goods and the environment from the effects of radiation during the transport of radioactive materials, the International Atomic Energy Agency (IAEA) has issued these regulations which envisage:

- Isolation of radioactive contents
- Checking of external radiation levels
- Prevention of critical situations
- Prevention of damage due to heat

As far as checks on the level of radiation both portable and fixed system exist today.

The fixed ones (portals) are more convenient than the portable ones because they allow a remote measurement process check. however they have a lot of application limits: indeed the highest speed allowed to go through the portals is about 8 km/h. So it is only possible to install these fixed systems where there are barriers (customs, tollgates, etc.).

The aim of this project is to define a new “ON/OFF” highly sensitive survey system which gives a rapid response and which can measure a radiation field without taking the source speed into account and which can identify a contaminated motor vehicle and subsequently block it.

This will increase the possibility of application for survey systems and lead to a more rigorous check on radioactive material transport.

The requirement of the detector device, the electronics and the computer system which are needed to create the new “ON/OFF” system are assessed in this study.

Capitolo 1: Introduzione

E' conoscenza comune che le radiazioni possono essere dannose per gli organismi viventi, ma forse non molti sanno che annualmente più di 10 milioni di imballaggi, contenenti materiali radioattivi, vengono trasportati su tutto il territorio mondiale con potenziali rischi di contaminazione e di esposizione per l'ambiente circostante e per gli essere viventi in esso presenti.

Il mio stage all'interno dell'APAT si è incentrato sulle tecniche di monitoraggio della radioattività partendo dagli effetti biologici dell'esposizione e dalla protezione dalle radiazioni.

La presente tesi è il completamento del percorso formativo durante il quale ho prima approfondito lo stato dell'arte dei sistemi per la misurazione delle radiazioni, poi ho ipotizzato un possibile scenario per la realizzazione di un innovativo sistema di monitoraggio "ON/OFF".

La tesi è così articolata:

- Il secondo capitolo è una rapida panoramica sulla radioattività, sugli effetti biologici e dosi limite;
- Nel terzo capitolo si introduce la necessità del controllo del trasporto di materiale radioattivo confrontando i sistemi di rivelazione portatili e fissi;
- Il quarto capitolo entra nel dettaglio dei portali di rivelazione fissi: tecniche di misura e limiti;
- Il quinto capitolo espone l'idea di un innovativo sistema di rivelazione "ON/OFF": specifiche tecniche e procedura operativa;
- Il sesto capitolo infine trae le conclusioni sulla fattibilità del progetto e le potenziali applicazioni.

Capitolo 2: La protezione dalle radiazioni e gli effetti Biologici

2.1 La radioattività

Ogni giorno siamo immersi nelle radiazioni: luce del sole, onde radio, microonde, infrarossi e raggi cosmici: la maggior parte di queste sono innocue o perché possiedono una bassa energia o perché la loro intensità è esigua.

Le radiazioni ionizzanti si differenziano in quanto:

- sono costituite da particelle (alfa, beta o neutroni) o da onde (gamma);
- hanno energia sufficiente per ionizzare molecole e quindi causare danni biologici.

Le radiazioni ionizzanti provengono da elementi aventi nuclei instabili i quali, emettendo particelle alfa, beta o neutroni, si trasformano in elementi differenti: questi a loro volta possono essere instabili e decadere. La catena di decadimenti continua finché non si forma un elemento stabile. I raggi gamma sono un “mezzo” per espellere l’energia in eccesso rilasciata durante i decadimenti nucleari.

Una caratteristica dei nuclei radioattivi è il “tempo di dimezzamento”, ossia il tempo necessario perché decada la metà di un dato numero di atomi di un elemento instabile (detto *half-life*).

Le principali radiazioni ionizzanti sono:

Particelle alfa (α): Le particelle alfa sono costituite da due neutroni e due protoni (un nucleo di elio). Esse sono assorbite da un sottilissimo strato di tessuto corporeo, da un foglio di carta o da pochi centimetri di aria: per questo motivo sono difficili da rilevare e un’esposizione diretta è poco probabile. Le particelle alfa sono dannose solo se inalate, ingerite, assorbite o iniettate.

Particelle beta (β): Le particelle beta sono elettroni o positroni, possono attraversare un foglio di carta, alcuni strati di tessuti ma sono arrestate da una lamina di metallo o vetro. Le particelle beta, come le alfa, sono in grado di danneggiare la pelle ma diventano gravemente dannose solo se inalate, ingerite o iniettate.

Raggi gamma (γ): I raggi gamma sono onde elettromagnetiche, viaggiano alla velocità della luce e penetrano la gran parte degli oggetti senza grandi variazioni di lunghezza

d'onda ma con una graduale riduzione dell'intensità. I raggi gamma attraversano la materia quasi inalterati ma possono essere schermati con vari metri di acqua, diversi centimetri di ferro e pochi centimetri di piombo.

Neutroni (n): Alcuni nuclei decadono in altri emettendo neutroni durante la fissione. I neutroni sono emessi con un'elevata energia cinetica che è dissipata gradualmente attraverso la collisione con le molecole di aria o di un altro mezzo. L'energia minima che possono possedere è pari a quella delle molecole che diffondono nell'aria a temperatura ambiente: tali neutroni sono detti "neutroni termici". I neutroni attraversano l'aria e vengono fermati da pochi decimetri di acqua o di calcestruzzo. Sono arrestati più facilmente dagli elementi più leggeri (ad es. l'idrogeno nell'acqua) che da quelli più pesanti come il piombo utilizzato per arrestare i raggi- γ .

Come già precedentemente esposto, sorgenti naturali di radiazioni sono presenti ovunque, ma normalmente sono troppo deboli per essere dannose. La radioattività naturale (fondo o background naturale) è principalmente costituita di raggi- γ a bassa energia provenienti da sorgenti cosmiche, sorgenti geologiche locali, comprendenti radon, torio e tracce di uranio, materiali da costruzione, fertilizzanti. Anche il corpo umano può contenere tracce di elementi radioattivi.

La radioattività naturale è soggetta a variazioni in base all'altitudine, alla composizione geologica e alle condizioni meteorologiche: ad esempio le precipitazioni atmosferiche, abbattendo al suolo una frazione rilevante del particolato cui i radionuclidi sono associati, possono provocare temporanei innalzamenti del fondo naturale fino a circa il 30% del valore rilevabile in condizioni di tempo stabile, soprattutto nelle fasi iniziali del precipitazioni stesse.

2.2 Gli effetti biologici delle radiazioni

Le radiazioni ionizzanti, ossia le radiazioni che hanno il potere di ionizzare la materia che attraversano, sono pericolose per i tessuti viventi in quanto hanno la capacità di danneggiare le cellule viventi o rompendo i legami chimici di importanti molecole biologiche (come il DNA), o creando indirettamente radicali chimici all'interno delle cellule a partire dalle molecole di acqua, che a loro volta attaccano chimicamente le molecole biologiche.

Fino ad un'estensione limitata del danno queste molecole possono essere riparate attraverso processi biologici naturali ma, se l'azione riparatrice fallisce, la cellula può andare incontro a tre possibili destini:

- Morte (della cellula)
- Mal funzionamento della cellula, che conduce ad effetti somatici come il cancro
- Alterazione permanente della cellula: l'alterazione potrebbe essere trasmessa geneticamente alle generazioni successive

I danni biologici causati da sorgenti radioattive dipendono ovviamente dal tipo e dall'intensità della radiazione, da quanto la sorgente è schermata, dal tempo di esposizione e dal tipo di tessuto vivente esposto. In generale le radiazioni più penetranti (raggi- γ e neutroni) causano danni minori ma sono più difficili da schermare, mentre le radiazioni meno penetranti (α e β) sono le più dannose ma possono essere schermate con maggiore facilità.

2.2.1 La dose Limite

A questo punto è spontaneo chiedersi quale sia la massima dose di radiazioni cui un individuo può essere esposto. La risposta non è immediata, infatti teoricamente non esistono livelli di radiazioni innocui in quanto gli effetti sono cumulativi. Tuttavia le radiazioni possono produrre anche effetti benefici, ad esempio quando utilizzate in medicina nella diagnostica o nelle terapie contro il cancro. Quindi, stabilire la dose limite cui un individuo può essere esposto, implica il dover soppesare i benefici ottenuti dal loro utilizzo con i potenziali rischi di esposizione. Il punto di equilibrio è soggettivo e dipende dagli individui, dal luogo in cui essi vivono, etc.

L'unico organismo internazionalmente riconosciuto che può stabilire tali valori limite è la Commissione Internazionale per la Protezione Radiologica (ICRP) che comunque, vista la soggettività del punto di equilibrio, li propone solo come valori consigliati (1).

	Operatori nel campo delle radiazioni	Persone comuni
<i>Intero corpo</i>	100 mSv in 5 anni, ma non più di 50mSv in ogni anno	1 mSv/yr in media per ogni 5 anni consecutivi
<i>Singoli organi</i>		
Occhi	150 mSv/yr	15 mSv/yr
Pelle (100cm ²)	500 mSv/yr	50 mSv/yr
Altri organi o tessuti	500 mSv/yr	50 mSv/yr

Tabella 2-1: Dosi limite come raccomandate dall'ICRP

Capitolo 3: Il trasporto di materiale radioattivo e le misurazioni radiometriche

3.1 La regolamentazione AIEA per il trasporto del materiale radioattivo

Materiale radioattivo viene abitualmente utilizzato all'interno di industrie, per la ricerca, la diagnosi e la terapia medica: ciò ne implica necessariamente il trasporto e dunque la possibilità, anche se temporanea, che persone del pubblico vengano esposte a deboli campi di radiazioni. Al fine di garantire alle persone, ai beni e all'ambiente un elevato livello di protezione dai rischi collegati al trasporto di materiale radioattivo, l'Agenzia Nazionale per l'Energia Atomica (AIEA) ha elaborato e pubblicato uno specifico Regolamento per il trasporto di materiali radioattivi la cui ultima versione risale al 1996.

Il regolamento prevede che la protezione venga assicurata attraverso:

- 1) Il confinamento dei contenuti radioattivi;
- 2) Il controllo dei livelli di radiazione esterni;
- 3) La prevenzione della criticità;
- 4) La prevenzione di danneggiamenti causati dal calore.

Proprio sul controllo dei livelli di radiazione esterni si è incentrato il mio percorso formativo all'interno dell'APAT.

3.2 Metodi il controllo dei livelli esterni di radiazione

Il controllo del livello esterno di radioattività può essere effettuato con dispositivi di rivelazione portatili o fissi.

3.2.1 Dispositivi di rivelazione portatili e fissi a confronto

Supponendo di dover analizzare il livello di radiazione esterna di un carico facendo uso di strumentazione portatile è necessario che un operatore attivi manualmente

il dispositivo di rivelazione (Figura 3.1) e che il carico sia fermo per tutto il tempo necessario all'ispezione. La misurazione ottenuta è sicuramente accurata anche se la procedura lunga e complessa.



Figura 3-1: Due dispositivi di rivelazione radiometrica portatili

I sistemi di rivelazione fissa generalmente utilizzati per il controllo di merci trasportate hanno la configurazione a portale (Figura 3.2): durante il transito della merce attraverso barriere, costituite da dispositivi di rivelazione, viene misurato il campo di radiazioni esterno.

Rispetto alla strumentazione portatile, i sistemi fissi hanno il vantaggio di non necessitare della presenza in situ dell'operatore, visto che consentono un controllo remoto del processo di misurazione. Inoltre non obbligano alla stazionarietà del carico durante l'ispezione ma solo a un passaggio a velocità controllata, inferiore a un limite massimo predefinito (ad es: 8 km/h (4)); infine possono essere utilizzati per controllare qualsiasi carico che attraversa la soglia dei portali e non solo i trasporti autorizzati di materiale radioattivo appositamente fermati.



Figura 3-2: Portali installati ad un varco di controllo

Da quanto emerso sopra, i sistemi di rivelazione fissi presentano notevoli vantaggi rispetto ai portatili, dunque focalizziamo l'attenzione solo sui primi esaminandone in dettaglio il principio di funzionamento

Capitolo 4: Sistemi di rivelazione a portali

4.1 Schemi a blocchi di un sistema di rivelazione a portali:

Un sistema di rivelazione a portali può essere schematizzato come mostrato in Figura 4.1.

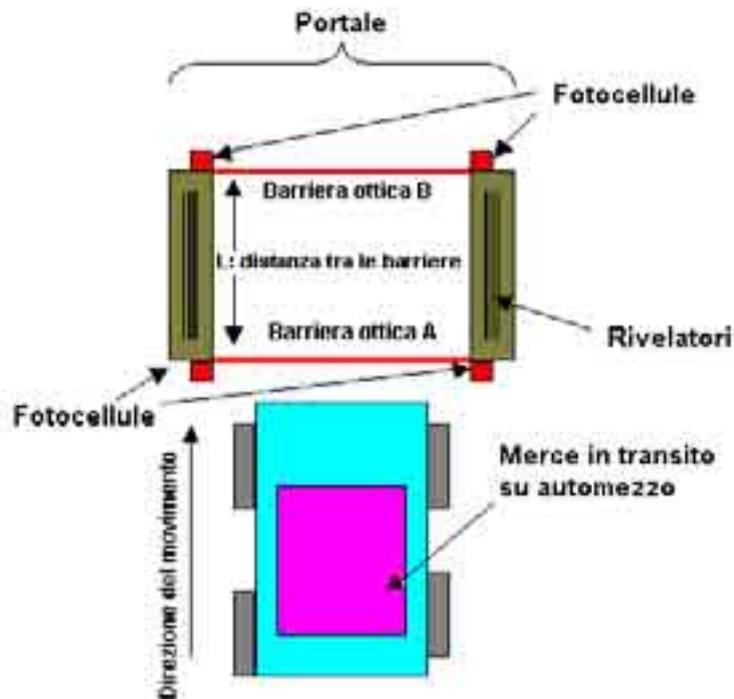


Figura 4-1: Schema di un sistema di rivelazione a portale

Ovviamente lo schema sopra riportato rappresenta solo una delle possibili configurazioni per la disposizione dei pannelli di rivelazione.

Il principio di rivelazione si articola nei seguenti nei punti.:

4.1.1 Rivelazione della radiazione di fondo

Quando le barriere ottiche A e B non sono oscurate il sistema effettua la misurazione del background naturale acquisendo dati dai rivelatori ad intervalli di tempo regolari e predefiniti (generalmente dell'ordine del secondo). Ciò consente di seguire l'andamento del fondo naturale che, come precedentemente introdotto, è influenzato dalle condizioni meteorologiche (ad es. la neve abbassa il livello di radiazione naturale) o dalla

presenza anche temporanea di un possibile agente schermante (ad es. automezzo in sosta nelle vicinanze del portale).

4.1.2 Passaggio di un automezzo

Nel momento in cui un automezzo attraversa il portale vengono oscurate in sequenza prima la fotocellula A e poi la fotocellula B. Appena è oscurata A parte il processo di misurazione della radiazione che si interrompe solo quando la fotocellula B, dopo essere stata anch'essa oscurata dal passaggio del carico, torna ad essere in luce.

La misurazione del tempo che intercorre tra l'oscuramento di A e quello successivo di B rende possibile la valutazione della velocità del mezzo, essendo nota la distanza tra le due fotocellule. Tale velocità deve essere inferiore ad un limite massimo stabilito (ad es: 8 km/h (4)) in modo che il tempo di passaggio attraverso le barriere sia sufficientemente lungo da consentire ai rivelatori di misurare correttamente il livello di radiazione e, qualora il carico risulti contaminato, il mezzo trasportatore possa essere agevolmente fermato.

Nell'eventualità che il carico superi la velocità limite, viene attivato un allarme ed è necessario un ulteriore passaggio dello stesso carico attraverso le barriere.

4.1.3 Depressione e sottrazione del fondo

Supponendo che un carico non contenga materiale radioattivo, durante il suo passaggio attraverso i pannelli di un portale, si osserva un abbassamento del background naturale. Questo fenomeno, detto depressione del fondo, è dovuto all'effetto schermante che il mezzo in transito esercita sui rivelatori. In generale la depressione relativa è funzione delle dimensioni geometriche e del materiale costituente l'automezzo.

Il coefficiente di depressione medio, che indico per comodità con "k", viene stimato con algoritmi differenti da diversi produttori di portali, ed è dell'ordine del 30÷40%.

Perciò, per ottenere il conteggio della radiazione emessa da un carico, terminato il transito del mezzo attraverso la barriera di rivelazione, alla misura ottenuta durante il passaggio viene sottratta l'ultima rilevazione del background naturale prima del passaggio stesso, corretta con il fattore k che tiene conto della depressione del fondo.

4.1.4 Completamento del processo di misurazione

Una volta sottratto il fondo depresso alla misura effettuata, il valore ottenuto viene confrontato con un valore limite (fissato dalle normative vigenti) (2), pari al 50% del valore del fondo di riferimento a 30 cm dal carico, e se superato viene attivato lo stato di allarme.

4.2 Limiti del sistema di rivelazione fisso a portali

Il procedimento di misurazione più snello e la possibilità di controllo remoto dell'ispezione dei carichi rendono, in generale, i sistemi di rivelazione radiometrica fissi preferibili a quelli portatili. Tuttavia allo stato attuale i portali di rivelazione presentano ancora limitate possibilità di applicazione: la ridottissima velocità con cui il mezzo può procedere attraverso ai pannelli rivelatori (8 km/h) fa sì che questi possano essere posizionati solo in prossimità di varchi con barriere (entrata-uscita da aziende, dogane, caselli autostradali), e ne pregiudica un più ampio impiego ad esempio lungo tratti stradali ad elevata percorrenza ma privi di caselli.

L'attività di ricerca da me svolta in questi mesi all'interno dell'APAT è stata mirata al superamento di tale limite, ossia all'individuazione di un sistema fisso di rivelazione radiometrica "ON/OFF" innovativo in grado di misurare, in un ridottissimo lasso di tempo, deboli campi di radiazione: ciò è finalizzato ad aumentare il limite massimo di velocità e rendere così possibile l'installazione dei nuovi portali in luoghi fino ad oggi a essi preclusi.

A tale scopo sarà necessario ottenere prestazioni migliori rispetto agli attuali portali di rivelazione intervenendo sul dispositivo di rivelazione, sull'elettronica associata e sul sistema informatico.

Capitolo 5: Il sistema di rivelazione radiometrica “ON/OFF”

5.1 L'utilità di un sistema radiometrico “ON/OFF”

Per sistema radiometrico fisso “ON/OFF” si intende un sistema di rivelazione di radioattività estremamente rapido in grado di individuare ed identificare un carico radiocontaminato che transita attraverso le sue barriere, a prescindere dalla velocità. Tale sistema non necessita della fermata immediata del mezzo ma garantisce la sua rintracciabilità grazie all'identificazione dello stesso.

Facendo un esempio pratico, supponiamo che un carico radiocontaminato viaggi su un automezzo alla velocità di 50 km/h. Il sistema ON/OFF deve essere in grado di percepire il campo di radiazioni ionizzanti prodotto dalla contaminazione, inserire lo stato di allarme e contemporaneamente attivare il sistema di identificazione (ad esempio video-sorveglianza). Una volta identificato, il carico contaminato può essere bloccato anche ad alcuni chilometri di distanza dal portale di rivelazione per opera del personale addetto, tempestivamente allertato dal sistema d'allarme.

La soluzione ON/OFF renderebbe possibile l'installazione di portali di rivelazione della radioattività anche in posizioni fino ad oggi ad essi precluse, come su strade ad alta frequentazione ma prive di caselli, consentendo un controllo sistematico e più accurato degli automezzi in transito.

Per raggiungere questo obiettivo va innanzitutto valutato accuratamente il tipo di rivelatore più adatto a tale scopo.

5.2 Il cuore del portale ON/OFF: il dispositivo di rivelazione

I quattro tipi più comuni di radiazione nucleare (α , β , γ , n), come già accennato, possiedono un differente potere penetrante che può essere schematizzato come in figura 5.1

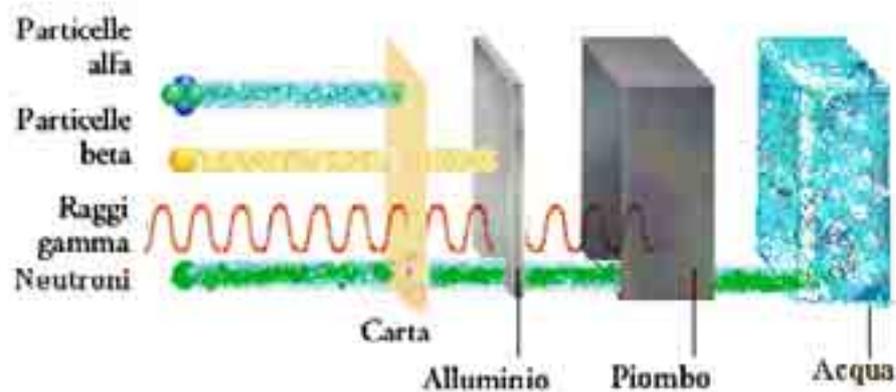


Figura 5-1: Potere penetrante delle radiazioni

Visto che particelle α e β sono facilmente schermate è corretto supporre che non riescano a fuoriuscire dall’imballaggio di un eventuale carico contaminato. Per quanto riguarda i neutroni, non sono radiazioni molto comuni anche se estremamente penetranti; emettitori di neutroni sono le armi al plutonio, dunque monitorare i neutroni equivarrebbe a rilevare traffico illecito di armi nucleari, che al momento esula dal mio obiettivo.

La radiazione più rilevante da monitorare è perciò costituita dai raggi- γ . Al fine di poter identificare il migliore dispositivo per la rilevazione gamma e giustificare eventuali scelte future, è necessario accennare brevemente ai meccanismi di interazione dei raggi- γ con la materia.

5.2.1 Le interazioni dei raggi- γ

I raggi- γ sono fotoni con energia che va da qualche decina di keV a qualche MeV. Senza addentrarsi troppo nei dettagli dei meccanismi della loro interazione con la materia (effetto fotoelettrico, scattering compton, produzione di coppie) basti sapere che la probabilità di interazione aumenta all’aumentare del numero atomico del bersaglio (Z : somma dei protoni presenti del nucleo) e che un fascio di fotoni, passando attraverso la materia, non è degradato in energia ma solo in intensità. Quest’ultimo punto è una conseguenza del fatto che qualunque sia il meccanismo con cui un fotone interagisce, esso viene completamente rimosso dal fascio, mentre gli altri fotoni proseguono indisturbati mantenendo la loro energia originaria.

5.2.2 Panoramica sui rivelatori gamma

Esistono in commercio numerosi rivelatori tra cui si possono evidenziare i seguenti:

I rivelatori a gas sfruttano l'effetto prodotto dal passaggio di una radiazione attraverso un gas, ossia la ionizzazione o eccitazione delle molecole di gas lungo il percorso della radiazione. Il prodotto della ionizzazione di una molecola è uno ione positivo e un elettrone libero che costituiscono una "coppia di ioni". Tutti i rivelatori a gas, attraverso metodi differenti, ricavano un segnale elettrico d'uscita dalla coppia di ioni generata.

I principali tipi di rivelatori a gas sono:

1. Camere a ionizzazione
2. Contatori proporzionali
3. Contatori Geiger-Mueller

I rivelatori a gas hanno, generalmente, tempi per la formazione del segnale e di recupero relativamente lunghi.

Per lo scopo di questo studio, i rivelatori che risultano più idonei alla rivelazione delle radiazioni sono i seguenti:

Rivelatori a scintillazione

I materiali scintillatori manifestano una proprietà nota come "luminescenza". I materiali luminescenti, quando vengono colpiti da una radiazione, assorbono energia e la riemettono sotto forma di luce visibile. Se la riemissione avviene immediatamente dopo l'assorbimento, o più precisamente nell'arco di 10^{-8} s, il processo è chiamato "fluorescenza". Se invece la riemissione è ritardata il processo è chiamato "fosforescenza".

Il tempo che trascorre tra l'assorbimento e la riemissione è detto costante di decadimento.

a) Scintillatori organici: Gli scintillatori organici sono composti di idrocarburi aromatici. Il processo di fluorescenza deriva dalla transizione di elettroni tra i livelli energetici di una singola molecola ed è perciò indipendente dallo stato fisico (solido,

liquido o gassoso). La principale caratteristica distintiva degli scintillatori organici è la rapidità di risposta, dell'ordine di pochi nanosecondi o meno.

Gli scintillatori organici si distinguono in: cristalli, liquidi e plastici.

I cristalli hanno una risposta rapida ma anisotropa, ossia dipendente dall'orientazione del cristallo. Sono resistenti e dunque duraturi. Tra i più importanti va ricordato l'antracene che produce la maggiore luce di uscita di tutti gli scintillatori organici.

I liquidi sono soluzioni di uno o più scintillatori organici in un solvente inorganico. In questo caso l'energia viene assorbita principalmente dal solvente che poi la trasferisce al soluto innescando il meccanismo di scintillazione. La risposta di questi materiali è abbastanza rapida, dell'ordine di pochi nanosecondi, ma sono estremamente sensibili alla presenza di impurità nel solvente.

I plastici sono i più utilizzati. Come i liquidi sono una soluzione di uno scintillatore organico ma in un solvente solido plastico. I plastici manifestano una costante di decadimento dell'ordine di 2-3 ns, una notevole luce di uscita e come ulteriore vantaggio un'estrema flessibilità che consente di forgiarli nelle più disparate forme. Inoltre rispetto ai cristalli possiedono un maggiore potere d'arresto per i raggi- γ .

b) Scintillatori inorganici: Il meccanismo di scintillazione nei materiali inorganici dipende dagli stati energetici determinati dal reticolo cristallino del materiale. Come mostrato in figura 5.2 gli elettroni, negli isolanti e nei semiconduttori, hanno a disposizione solo bande di energia discrete. La banda inferiore, detta di valenza, rappresenta gli elettroni legati ai siti del reticolo cristallino, mentre la banda di conduzione rappresenta quegli elettroni che hanno un'energia sufficiente per migrare attraverso il cristallo. La banda intermedia, detta "proibita", è la banda nella quale, se il cristallo è puro, non possono essere mai trovati elettroni.

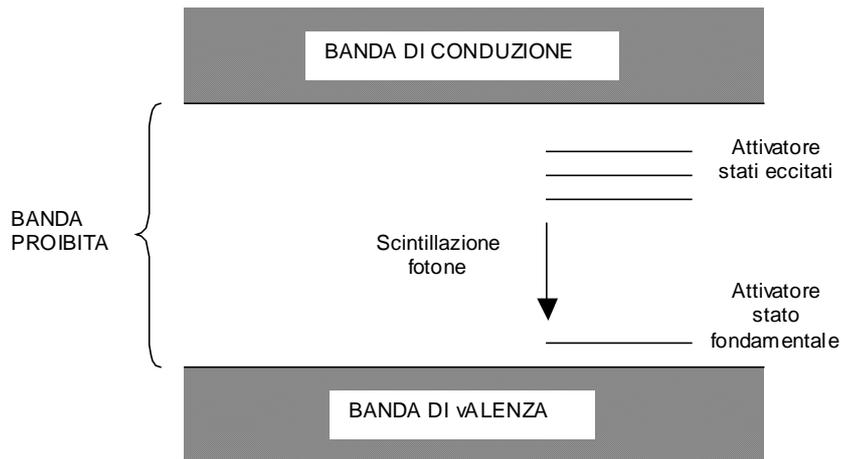


Figura 5-2: struttura della banda energetica di uno scintillatore cristallino attivato.

L'assorbimento di energia può determinare il salto di un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione. Il vuoto lasciato dall'elettrone nella banda di valenza è detto "lacuna". Nei cristalli puri, il ritorno dell'elettrone alla banda di valenza con l'emissione di un fotone è un processo inefficiente, inoltre, vista la larghezza tipica della banda proibita, il fotone emesso avrebbe energia troppo elevata e non risulterebbe visibile. Per aumentare la probabilità di emissione nel campo del visibile durante i processi di emissione, si usa aggiungere agli scintillatori inorganici una piccola quantità di impurità, chiamate attivatori, che modificano la struttura della banda energetica aggiungendo dei livelli energetici nel mezzo della banda proibita. In questo modo, quando una radiazione attraversa il mezzo e forma coppie di elettrone-lacuna, la lacuna è rapidamente catturata da un attivatore e lo ionizza, l'elettrone saltato in banda di conduzione è libero di migrare all'interno del cristallo finché non incontra un sito attivatore ionizzato. A questo punto l'elettrone viene catturato dall'attivatore formando una configurazione neutra. Gli attivatori possono avere, oltre al livello fondamentale, degli stati energetici eccitati. Se l'elettrone è stato catturato in un livello eccitato allora può passare allo stato fondamentale diseccitandosi con l'emissione di un fotone. Il tempo medio di permanenza di un elettrone in uno stato eccitato è di 50÷500ns e determina il tempo caratteristico di scintillazione del materiale.

I più importanti cristalli inorganici sono NaI(Tl), dove il Tallio è l'attivatore, CsI(Tl), BGO, etc. Il vantaggio dell'utilizzo di cristalli inorganici risiede nel loro maggiore potere di arresto dei raggi- γ grazie al loro numero atomico più grande rispetto agli organici (in particolare il BGO, da 3 a 5 volte più efficiente anche del NaI) e nella maggiore quantità di luce prodotta come mostrato nella tabella 5.1.

Inorganici		Organici	
Materiale	eV/fotone	Materiale	eV/fotone
Antracene	60	NaI	25
Plastico	100	BGO	300

Tabella 5-1: Energia media persa per la produzione di un fotone (1)

Rivelatori a semiconduttore

I rivelatori a semiconduttore, detti anche rivelatori allo stato solido, sono basati sulla struttura cristallina dei materiali semiconduttori, di cui i più importanti sono il silicio (Si) e il germanio (Ge). La struttura della banda energetica è analoga a quella mostrata in figura 5.2 per i cristalli inorganici.

In modo estremamente semplificato si può dire che il passaggio di una radiazione attraverso un materiale semiconduttore produce coppie elettrone-lacuna che possono essere raccolte applicando un campo elettrico all'interno del semiconduttore stesso.

I vantaggi che derivano dall'utilizzo di rivelatori a semiconduttore sono innanzitutto la bassissima energia necessaria per creare una coppia elettrone-lacuna mostrata in tabella 5.2 per il Si e il Ge, inoltre l'alta densità del Germanio assicura un buon potere d'arresto per i raggi γ .

Temperatura	Si	Ge
300K	3.62eV	-
77K	3.91eV	2.96eV

Tabella 5-2: energia media per la produzione di una coppia elettrone-lacuna nel silicio e nel germanio a differenti temperature

D'altro canto però, proprio per il germanio, la bassa energia necessaria per la produzione di coppie elettrone-lacuna, fa sì che un rilevante numero di coppie possa essere generato a temperatura ambiente per effetto della sola agitazione termica. Ne deriva un notevole rumore elettronico (segnali spuri) che disturba la misurazione e che può essere ridotto solo facendo lavorare il rivelatore a temperature criogeniche, mantenute con appositi sistemi di refrigerazione che rendono l'apparato estremamente ingombrante (Figura 5.3). Per quanto riguarda il tempo di formazione del segnale è difficile da stimare in quanto dipendente dalla traiettoria della radiazione incidente, dalla densità di ionizzazione lungo il percorso, dalle linee di forza del campo elettrico all'interno del semiconduttore, nonché dalle dimensioni geometriche del dispositivo (orientativamente di decimi di microsecondo).



Figura 5-3: Rivelatore al Germanio con sistema di refrigerazione

5.2.3 La scelta del rivelatore

Ricapitolando brevemente, per la realizzazione di un sistema di rivelazione ON/OFF il rivelatore deve rispondere alle seguenti caratteristiche:

- Alta efficienza per la rivelazione dei raggi- γ
- Rapidità di risposta
- Alta sensibilità

- Possibilità di essere plasmato in pannelli

In base alle esigenze sopra riepilogate vanno immediatamente scartati i rivelatori a gas, in quanto eccessivamente lenti nella risposta, e i rivelatori a semiconduttore per l'ingombro arrecato dall'apparato criogenico, che renderebbe complessa (e probabilmente anche estremamente costosa) la realizzazione di pannelli.

I migliori candidati risultano essere gli scintillatori e, in particolare, ritengo che i più convenienti siano gli scintillatori organici plastici. Questi, infatti, tra gli organici hanno il migliore potere d'arresto per i raggi- γ , inoltre sono più rapidi degli inorganici nella risposta (2-3ns contro 500ns circa), rispetto all'inorganico BGO (dotato anch'esso di un ottimo potere d'arresto per i gamma) producono più luce a parità di energia depositata e pertanto possiedono una maggiore sensibilità, infine possono essere agevolmente plasmati in pannelli.

La scelta del particolare tipo di materiale da utilizzare per la realizzazione dello scintillatore plastico dovrà essere tale da soddisfare le richieste della vigente normativa sui metodi per la determinazione delle anomalie radiometriche, ossia(4):

- Campo energetico da 40 KeV a 1,3 MeV
- Sensibilità di 0,02 μ Gy/h

Stabilito di utilizzare per il sistema di rivelazione ON/OFF scintillatori plastici va considerato che il segnale d'uscita da essi prodotto è un segnale luminoso e questo, prima di poter essere elaborato ed utilizzato, deve essere trasformato in un segnale elettrico. A tale scopo è necessario accoppiare lo scintillatore con un opportuno fotomoltiplicatore (PM).

5.2.4 Il fotomoltiplicatore: caratteristiche generali

Un tipico tubo fotomoltiplicatore consiste in un catodo fotoemettitore, seguito da elettrodi focalizzatori e da un anodo per la raccolta degli elettroni, il tutto all'interno di un tubo a vuoto, come mostrato in figura 5.4.

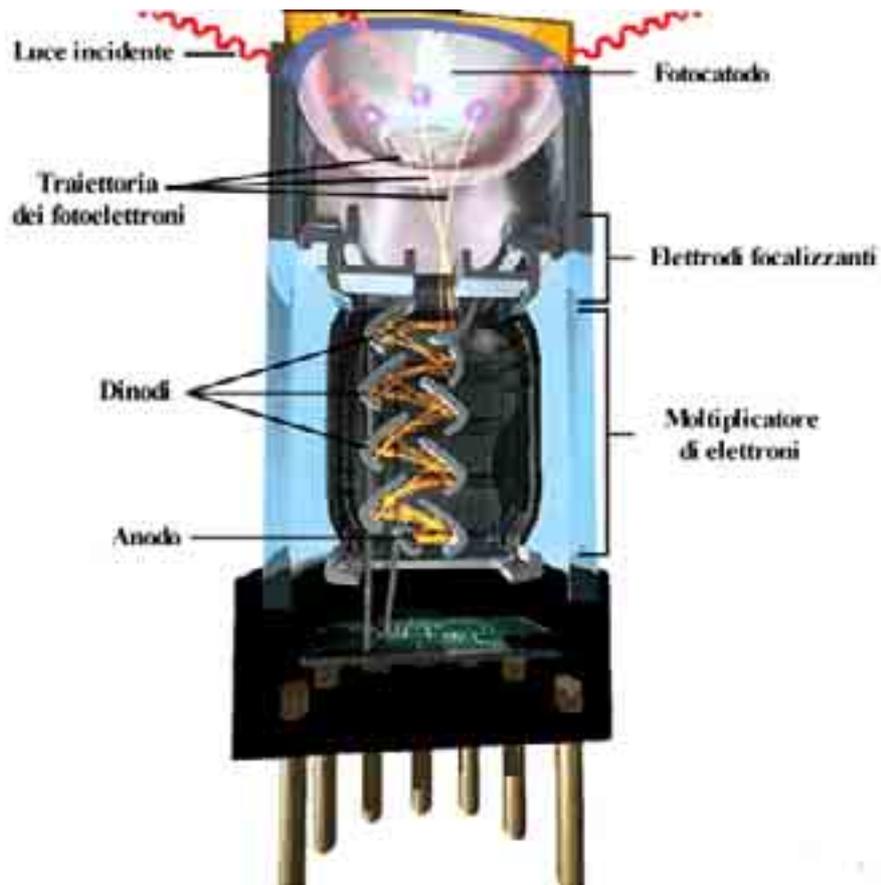


Figura 5-4: sezione di un tubo fotomoltiplicatore

Quando la luce entra dal fotocatodo, questo emette fotoelettroni (elettroni emessi per effetto fotoelettrico) nel vuoto. Gli elettroni emessi sono indirizzati, dagli elettrodi focalizzanti, verso l'elettromoltiplicatore. L'elettromoltiplicatore è costituito da una serie di elettrodi, detti dinodi, a diverso potenziale: qui gli elettroni vengono accelerati e moltiplicati per processi di emissione secondaria ed infine raccolti dall'anodo, formando il segnale d'uscita del PM.

Il fotocatodo di un PM converte l'energia della luce incidente in elettroni. L'efficienza di conversione varia al variare della lunghezza d'onda (energia) della luce incidente. La relazione tra la risposta del fotocatodo e la lunghezza d'onda è detta risposta spettrale caratteristica. Una tipica risposta spettrale è mostrata in figura 5.5.



Figura 5-5: tipica risposta spettrale di un fotocatodo

Affinché l'accoppiamento tra uno scintillatore e un fotocatodo sia efficiente, la lunghezza d'onda della luce di scintillazione deve cadere nell'intorno del massimo della risposta spettrale del fotocatodo.

Nella misura di un impulso luminoso, il segnale d'uscita all'output dovrebbe riprodurre fedelmente la forma d'onda dell'impulso incidente. La riproducibilità è però affetta dal tempo di transito degli elettroni, dal tempo di salita del segnale all'anodo e dalla distribuzione del tempo di transito dell'elettrone (TTS).

Il tempo di transito di un elettrone è l'intervallo di tempo tra l'arrivo di un impulso luminoso sul catodo e l'istante in cui il segnale d'uscita all'output raggiunge la massima ampiezza. Il tempo di salita del segnale all'anodo è definito come il tempo necessario perché il segnale salga dal 10% al 90% del massimo di ampiezza. Il tempo di transito degli elettroni è soggetto a fluttuazioni tra un segnale luminoso e un altro. Questa fluttuazione è definita TTS.

Tempi di transito tipici sono dell'ordine di alcune decine di nanosecondi.

Un importante parametro dei PM è il guadagno da cui dipende la sensibilità del PM stesso. Il guadagno è definito come il numero di elettroni secondari raccolti dall'anodo per ogni elettrone primario emesso dal fotocatodo, e tipicamente è pari a 10^6 .

5.2.5 La scelta del fotomoltiplicatore

Ricordando che l'obiettivo principale da raggiungere nel sistema ON/OFF è un'elevata velocità di rivelazione, anche il fotomoltiplicatore deve possedere come

prerogativa un'estrema rapidità nel trasformare il segnale luminoso di input nel segnale elettrico di output.

Nella mia ricerca ho individuato come potenziale candidato una particolare configurazione di PM: le "piastre multicanale" (MCP: *microchannel plate*).

L'MCP è un sottile disco costituito da milioni di microtubi (canali) saldati in parallelo l'uno con l'altro (Figura 5.6). Ogni canale ha un diametro estremamente piccolo (tipicamente $15\div 50\mu\text{m}$ (1)). Una differenza di potenziale applicata attraverso la lunghezza del tubo, attrae gli elettroni dal foro di entrata al foro d'uscita. Gli elettroni che entrano nel tubo possono urtare le pareti del canale dando origine a elettroni secondari. Questi sono accelerati lungo il tubo finché non colpiscono a loro volta le pareti del canale originando ulteriori elettroni secondari. Ogni microcanale agisce come un elettromoltiplicatore indipendente.

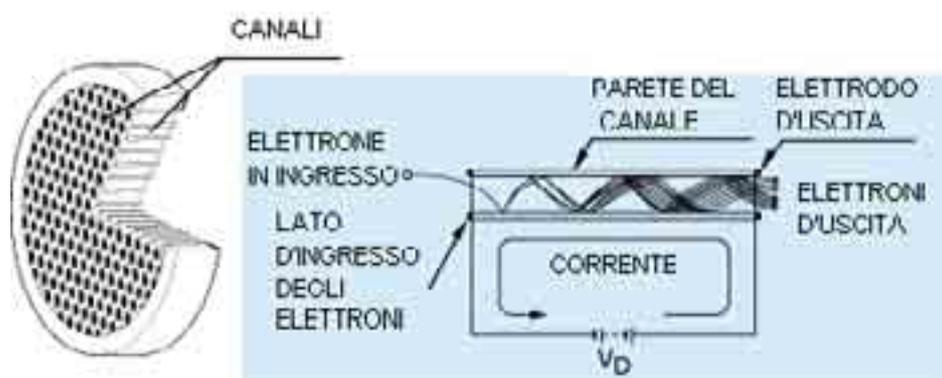


Figura 5-6: Elementi di un PM basato su elettro-moltiplicatore a piastre multicanale

Il guadagno degli MCP è di circa $10^5\div 10^6$ (5), ossia dello stesso ordine di grandezza dei fotomoltiplicatori standard. Inoltre, grazie alla loro compattezza, il tempo di transito degli elettroni negli MCP è di pochi nanosecondi contro i $20\div 50\text{ns}$ tipici dei PM con struttura convenzionale: ciò rende questa tipologia di dispositivo assolutamente soddisfacente per la realizzazione del sistema ON/OFF.

Il segnale d'uscita dall'MCP, come per tutti i PM, prima di poter essere utilizzato, deve essere opportunamente amplificato per mezzo di un pre-amplificatore e un amplificatore in serie.

Il primo, posizionato il più vicino possibile all'uscita del PM, evita la degradazione del segnale, il secondo rende il segnale compatibile con l'elettronica a valle.

5.3 Stima del rumore del rivelatore e dell'elettronica associata

Il sistema ON/OFF, oltre all'elevata velocità di rilevazione deve possedere un'altra qualità: rumore del rivelatore e dell'elettronica estremamente basso. Questo perché, non ponendo limiti alla velocità del carico nell'attraversamento dei portali, rispetto a un sistema a velocità controllata, diminuisce il tempo di passaggio di un'eventuale sorgente radioattiva attraverso i pannelli e dunque il numero di decadimenti che possono essere rilevati. Il rumore deve essere minimizzato per evitare che venga "confuso" con un'anomalia radiometrica e generi falsi allarmi.

Avendo individuato in uno scintillatore plastico accoppiato ad un MCP un possibile candidato per la realizzazione del sistema di rivelazione ON/OFF principalmente per la rapidità di risposta, deve essere controllato che anche il rumore generato da tale accoppiamento e dall'elettronica associata sia accettabile.

Una tecnica per la stima del rumore potrebbe essere inviare da un generatore di impulsi un segnale di ampiezza nota all'ingresso test di cui sono dotati i preamplificatori, prima con il rivelatore collegato e poi senza rivelatore e analizzare lo spettro d'uscita. Se non ci fosse rumore si otterrebbe uno spettro a riga monoenergetico. A causa del rumore la riga spettrale si allarga formando una campana (gaussiana) e la larghezza della campana (σ) è una misura del rumore stesso.

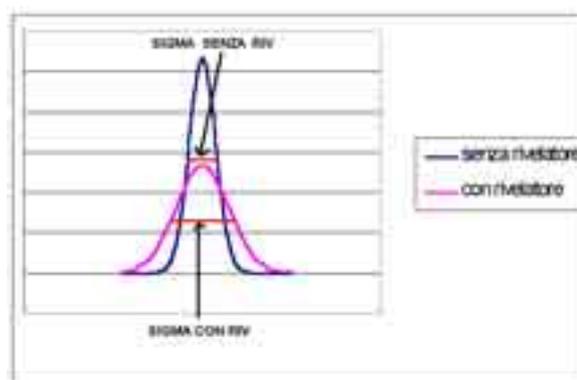


Figura 5-7: Spettro d'uscita ottenuto inviando un segnale noto all'ingresso test del pre-, con e senza rivelatore inseritomplicatore

La σ dello spettro senza il rivelatore corrisponde al rumore dell'elettronica associata, quella dello spettro con rivelatore collegato è la somma del rumore dell'elettronica con il rumore del rivelatore (figura 5-7).

Dall'analisi dei risultati sarà possibile valutare la bontà della scelta del rivelatore separatamente da quella dell'elettronica e procedere con opportune modifiche.

5.4 Il ruolo dell'informatica

L'informatica gioca un ruolo fondamentale già all'interno dei portali tradizionali dove controlla la velocità del mezzo, sottrae il background naturale allo spettro registrato durante il passaggio di un carico e controlla lo stato di allarme.

Nel nuovo sistema ON/OFF, come ulteriore compito, il sistema informatico dovrà normalizzare lo spettro acquisito prima di effettuare la sottrazione del fondo, per renderlo confrontabile con livelli di allarme prestabiliti, in quanto lo spettro dipenderà dalla velocità del mezzo.

Per capire cosa si intende per normalizzazione prendiamo in considerazione un sistema di portali di larghezza un metro in cui il fondo naturale è registrato ogni volta per la durata di un secondo. Supponiamo che il limite di allarme (opportunamente calcolato) sia fissato a 100 conteggi al secondo.

Consideriamo un automezzo che attraversi il portale ad una velocità di 2m/s. Se al suo interno è presente una sorgente radioattiva puntiforme questa scorre attraverso il portale in 0.5s, ossia in un tempo pari alla metà del tempo di registrazione del fondo. Se vengono rilevati durante il passaggio 55 conteggi la soglia di allarme non sembra superata. Se però si normalizza a 1s lo spettro, applicando un'ipotetica relazione lineare tra tempo e numeri di conteggi, si ottiene 110 conteggi/secondo, ben al di sopra della soglia di allarme.

L'algoritmo di normalizzazione, qui semplicisticamente ipotizzato come una relazione lineare, potrà esser valutato solo sperimentalmente al variare delle condizioni al contorno (tipologia di mezzo di trasporto, tipo di sorgente, fattori climatici, etc.).

In base all'esito del confronto il sistema informatico dovrà inoltre gestire l'allarme e il processo per l'identificazione del mezzo.

Un problema che potrebbe verificarsi con l'introduzione dell'algoritmo di normalizzazione è l'aumento dei falsi allarme. Supponiamo infatti che un automezzo non contaminato proceda alla velocità di 30m/s (108km/h) e al momento del passaggio attraverso i rivelatori si abbia una fluttuazione statistica del fondo che fa registrare 4 conteggi. Normalizzando la misura con il semplice algoritmo lineare si ottiene un conteggio di 120 conteggi/secondo, al di sopra della soglia di allarme!

Per evitare falsi allarmi dovuti alla combinazione degli effetti di fluttuazioni statistiche con un'elevata velocità di transito si potrebbe dotare il portale di due ulteriori barriere ottiche posizionate esternamente ai rivelatori (Figura 5.8) per stimare la velocità del mezzo prima dell'ingresso nei portali.

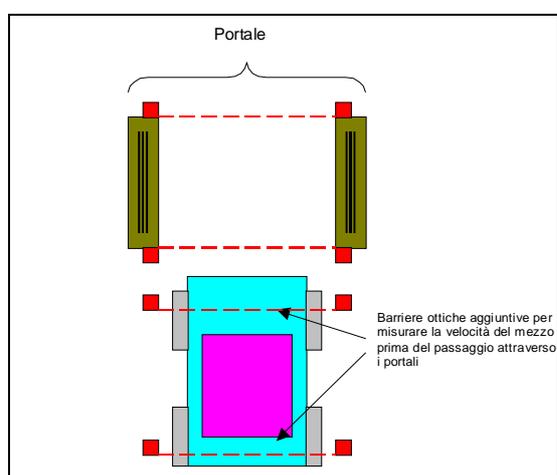


Figura 5-8: schema della disposizione delle barriere ottiche nel nuovo sistema di rivelazione "ON/OFF"

Se la velocità è superiore ad un limite massimo stabilito, oltre il quale la misura non è da considerarsi affidabile, si può decidere o di annullare la misura o di modificare opportunamente la soglia d'allarme. Ciò consentirebbe di ridurre al minimo il numero dei falsi allarme.

Nella figura 5.9 è riportato lo schema a blocchi dell'intero sistema di rivelazione "ON/OFF".

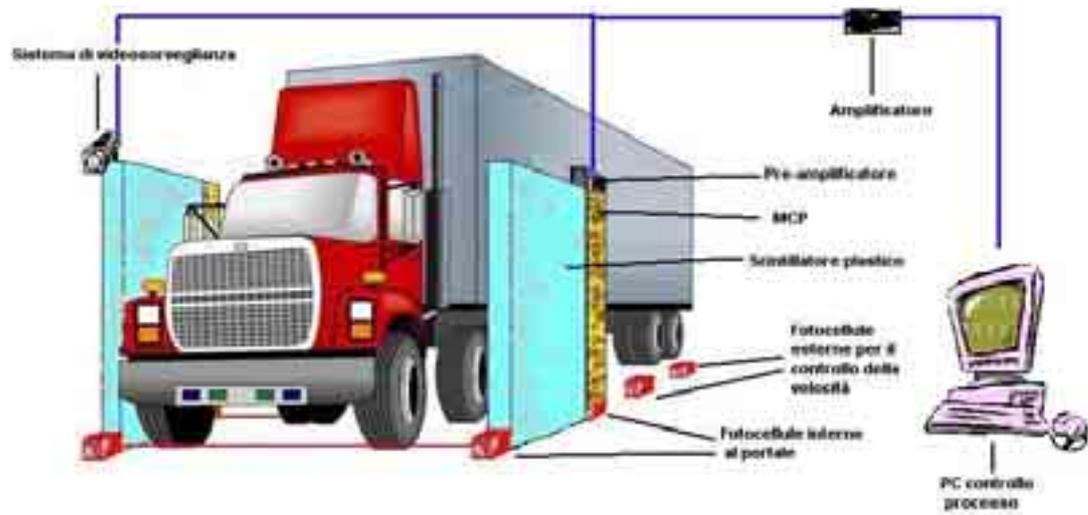


Figura 5-9: Schema a blocchi del nuovo sistema di rivelazione "ON/OFF"

Capitolo 6: Conclusioni

Nel capitolo precedente è stata esposta l'idea per la realizzazione di un innovativo sistema di rivelazione "ON/OFF" dando principale rilievo agli aspetti tecnici e tecnologici.

Ovviamente si tratta solo di ipotesi e congetture che potrebbero rappresentare lo studio di fattibilità di un progetto che necessiterebbe sicuramente di un'intensa attività di sperimentazione.

Non sono state effettuate neanche considerazioni di carattere economico in quanto esulano dallo spirito della tesi, che andrebbero invece attentamente valutate nell'eventuale realizzazione del progetto.

Quello che mi auguro sia emerso è l'enorme potenzialità del sistema "ON/OFF" che potrebbe trasformare completamente il concetto di misurazione radiometrica. La possibilità di applicazione su larga scala, anche su vie d'accesso senza blocchi o caselli, consentirebbe la realizzazione di una rete di monitoraggio minuziosa e dettagliata e dunque un notevole passo avanti nella rivelazione del transito illecito di materiali radioattivi.

Si vuole evidenziare inoltre che la realizzazione di un portale "ON/OFF" è possibile utilizzando rivelatori e dispositivi elettronici già esistenti in commercio, senza dover sviluppare ulteriormente la ricerca.

Bibliografia:

- (1).Knoll, 1999, *Radiation Detection and Measurement*, Wiley & Sons Inc
- (2).W.R..Leo, 1994, *Techniques for nuclear and particle physics experiment*; Springer-Verlag
- (3).IAEA, 1996, *Regulation for the Safe Transport of Radioactive Material*, Vienna,
- (4).*Normativa UNICEN 185 del 5 Maggio-1999, “Carichi di rottami metallici, rivelazione di radionuclidi con misure X e gamma, Metal Scrap”*
- (5). Burle, *PhotomultiplierTubes Technical Informations*,
http://www.burle.com/mcp_pmts.htm