

Costruzione del rivelatore

Primo Galletti

Aldo Aluigi

28 Febbraio 2005

1 Introduzione

È nostra intenzione mettere a disposizione l'esperienza che è stata acquisita in questi anni nella costruzione e messa a punto dei rivelatori di onde gravitazionali che utilizzano fotoresistori al solfuro di cadmio (CdS).

Cercheremo di dare tutte le informazioni necessarie per la costruzione del rivelatore compresi disegni, grafici e fotografie. Saranno messi a disposizione anche gli schemi elettrici da noi utilizzati per la realizzazione dell'alimentatore, del regolatore della corrente anodica e dei regolatori di temperatura.

Inoltre, verranno fornite le informazioni necessarie per la messa a punto finale del rivelatore, compreso quel periodo iniziale di funzionamento che abbiamo chiamato “*formattazione*”, in cui, con il passare del tempo, il rivelatore diventa sempre più sensibile alle onde gravitazionali.

2 I rivelatori attualmente in funzione

Per quanto riguarda i nostri rivelatori, ad oggi la situazione è la seguente.

Rivelatore N. 1. Si tratta del primo rivelatore costruito da P. Galletti alla fine del 1993 e messo a punto nei primi mesi del 1994 ¹.

Il sensore vero e proprio è costituito da un display FUTABA a 6 cifre, utilizzato come sorgente di luce costante, e da un fotoresistore al CdS posto all'interno di due camere termostatiche (interna ed esterna). La camera termostatica interna è stata installata nei primi mesi del 1994 e in questa il sensore viene mantenuto ad una temperatura costante di circa 35 °C, mediante un sistema di riscaldamento realizzato con resistenze elettriche.

Nella seconda metà del 1996 è stata installata la camera termostatica esterna nella quale, mediante un sistema di riscaldamento-raffreddamento realizzato con celle Peltier, la temperatura viene mantenuta costante intorno a 25 ÷ 26 °C. Questa camera termostatica contiene quella interna con il sensore, l'alimentatore ed il regolatore della corrente anodica.

¹Questo apparecchio è stato descritto, nei suoi aspetti essenziali, in **Un Rivelatore di Onde Gravitazionali** (Parte 1): *Descrizione e funzionamento del Rivelatore*

Viene effettuata *una lettura ogni 20 minuti* della tensione V_{CD} ai capi del ponte di Wheatstone, mediante un sistema di conversione Analogico/Digitale (A/D) auto-costruito e collegato ad un Personal Computer (PC) attraverso la porta seriale RS 232.

Il rivelatore è in funzionamento continuo da oltre 10 anni e durante questo periodo di tempo ha avuto soltanto alcuni problemi di lieve entità che non ne hanno pregiudicato il funzionamento.

Il segnale di questo rivelatore, registrato in continuo dalla fine di Aprile 1994, viene pubblicato con cadenza mensile sul nostro sito www.omirp.it.

Rivelatore N. 2. Si tratta di un apparecchio che è stato costruito agli inizi del 1997 e che ha iniziato a funzionare a partire dalla seconda metà dello stesso anno.

L'apparecchio era stato costruito con una sola camera termostatica, analoga a quella del **Rivelatore N. 1**, nella quale la temperatura veniva mantenuta a circa $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il sensore, pertanto, risultava sensibile alle escursioni giornaliere della temperatura ambiente. Inoltre, in estate, quando la temperatura ambiente superava i $30 \div 32\text{ }^{\circ}\text{C}$, si avevano problemi di regolazione della temperatura, con continue pendolazioni che ne disturbavano il funzionamento.

Il sensore aveva, al suo interno, 5 fotoresistori al CdS, tre dei quali erano dello stesso tipo di quello utilizzato nel **Rivelatore N. 1**. Gli altri due erano fotoresistori di tipo diverso.

Questo rivelatore ha funzionato regolarmente fino al 2000. I tre fotoresistori dello stesso tipo fornivano segnali che erano in ottimo accordo con quello del **Rivelatore N. 1**. Gli altri due fotoresistori, invece, non hanno mai funzionato in modo soddisfacente.

Agli inizi del 2000 si era deciso di rendere trasportabile questo rivelatore. A tale scopo è stato realizzato un telaio dove installare le varie apparecchiature e nuove batterie.

Il trasferimento delle alimentazioni elettriche dalle vecchie alle nuove batterie ha disturbato il rivelatore senza, però pregiudicarne il funzionamento (il sensore non è mai rimasto disalimentato).

Nel Novembre 2000, la camera termostatica originaria è stata sostituita con un'altra dal funzionamento più stabile e preciso. Durante questa operazione è stato disturbato il regolatore della corrente anodica (che, purtroppo, non era stato escluso!) e, per alcuni secondi, la tensione sul filamento ha raggiunto il suo valore minimo di -2.7 V (valore limitato dal diodo zener che era stato posto a protezione del filamento).

La tensione del filamento iniziale era ad un valore di $-1,840\text{ mV}$, con una corrente anodica di $3,760\text{ }\mu\text{A}$. Dopo aver ripristinato il funzionamento del regolatore, la tensione del filamento si è portata a $-1,540\text{ mV}$ con la corrente anodica sempre a $3,760\text{ }\mu\text{A}$.

Nei mesi successivi la tensione del filamento ha ripreso, lentamente, a scendere fino a portarsi, alla fine di Dicembre 2000, a $-1,750\text{ mV}$. Il rivelatore si era ripreso anche se la sua sensibilità si era ridotta.

Prima dell'estate 2002 è stata messa in funzione anche la seconda camera termostatica, funzionante in riscaldamento-raffreddamento mediante celle Peltier, che nel frattempo era stata costruita.

Fin dagli inizi del 2002 sia l'alimentatore che il regolatore della corrente anodica avevano mostrato di non funzionare correttamente e, spesso, bisognava intervenire correggendo manualmente la corrente anodica con il trimmer multigiri dell'LM 337 variando la tensione del filamento. Per evitare questi continui interventi manuali, alla fine del 2002 si è deciso di sostituire il regolatore insieme all'alimentatore.

Il 7 Febbraio 2003 è stato effettuato questo intervento durante il quale non si è potuta evitare una nuova variazione della tensione del filamento, analoga al precedente, ma di durata più lunga (alcuni minuti).

Dopo aver sostituito l'alimentatore ed inserito il regolatore della corrente anodica impostato con un valore di $3,760 \mu A$, la tensione del filamento è salita a oltre $-1,500 mV$. Nei mesi successivi la tensione del filamento a ripreso a scendere, ma molto più lentamente della volta precedente.

Dopo questo secondo e più grave incidente i tre fotoresistori buoni hanno smesso definitivamente di funzionare. Alla fine di Agosto 2003 l'apparecchio è stato disalimentato.

Abbiamo voluto raccontare la storia di questo rivelatore perché pensiamo possa essere utile a coloro che intendono cimentarsi nella costruzione di questi apparecchi.

Rivelatore N. 3. Questo rivelatore è stato costruito nella seconda metà del 2002 ed è stato alimentato per la prima volta il 29 Dicembre dello stesso anno.

Il rivelatore è stato reso completamente autonomo e trasportabile. In esso vi è tutta l'esperienza che è stata acquisita con la costruzione dei precedenti apparecchi.

Il rivelatore ha, montati sul un display FUTABA a 6 cifre, 6 fotoresistori al CdS tutti aventi caratteristiche differenti tra di loro (indicati con "a", "b", "c", "d", "e", ed "f"). Il fotoresistore "b" è dello stesso tipo di quello utilizzato sul **Rivelatore N. 1**, i fotoresistori "c", "d" ed "e" sono stati acquistati (v. catalogo RS Components) e i fotoresistori "a" ed "f" sono stati recuperati dalle fotocellule di vecchi bruciatori.

Dopo essere stato alimentato e messo a punto, l'apparecchio è stato posto in un ambiente chiuso (cantina interrata) e al buio, con variazioni della temperatura ambiente limitate. La camera termostatica esterna è stata installata solo di recente (Giugno 2004).

Ad oggi, il rivelatore non ha avuto alcun tipo di malfunzionamento. Tutti i circuiti elettrici da noi progettati e realizzati si sono dimostrati essere molto affidabili e precisi. La regolazione della temperatura e della corrente anodica sono molto buone. La tensione anodica risulta leggermente influenzata (circa $1 mV$ dalla temperatura ambiente (l'alimentatore si trova all'esterno)).

Dalla fine di Marzo 2003 il fotoresistore "b" ha, praticamente, smesso di aumentare in modo continuo la sua resistenza e si sono iniziate a registrare le prime variazioni (positive) della tensione ai capi del ponte di Wheatstone. Nei mesi successivi questo fotoresistore ha continuato a migliorare sempre di più la sensibilità. Possiamo dire che

la sensibilità alle *variazioni rapide* è stata acquisita dopo, soltanto, qualche mese, mentre la sensibilità alle *variazioni lente* è stata acquisita dopo circa $9 \div 10$ mesi. Degli altri 5 fotoresistori soltanto il fotoresistore “f” (fotocellula di un vecchio bruciatore di una caldaia) dopo oltre 1 anno di funzionamento ha mostrato di possedere una qualche sensibilità alle variazioni più rapide. Per le variazioni lente, invece, la sensibilità è praticamente inesistente e tale da essere coperta dalle variazioni di temperatura (anche se, soltanto, di alcuni millesimi di $^{\circ}K$!). Gli altri 4 fotoresistori continuano, tutt’ora, ad aumentare la loro resistenza in modo continuo.

Il **Grafico D3_1** riporta l’andamento delle tensioni ai capi dei ponti di Wheatstone, registrate con cadenza giornaliera, dal 29 Dicembre 2002 fino al 27 Agosto 2003.

Dal 28 Agosto 2003 l’apparecchio è stato messo in registrazione continua sotto l’Agilent 34970A, predisposto per una lettura ogni minuto e dal 1 Settembre 2003 anche il segnale del fotoresistore “b” viene pubblicato con cadenza mensile sul nostro sito www.omirp.it, insieme a quello del **Rivelatore N. 1**.

Rivelatore N. 2bis. Sulle “macerie” del **Rivelatore N. 2** abbiamo costruito un nuovo rivelatore.

Lo scopo principale di questo nuovo apparecchio è quello di provare alcuni nuovi fotoresistori che nel frattempo siamo riusciti a procurarci.

L’impegno nella realizzazione di questo rivelatore è stato modesto, in quanto buona parte dei circuiti elettronici e apparecchiature erano già disponibili e funzionanti.

Come display è stato usato lo stesso del **Rivelatore N. 2** sul quale sono stati montati 4 fotoresistori. Il fotoresistore “a” è la fotocellula di un bruciatore di caldaia, il fotoresistore “b” uno dei tre, buoni, che erano installati sul **Rivelatore N. 2** mentre gli altri due (il “c” e il “d”) sono al selenuro di cadmio (CdSe).

Il rivelatore è stato alimentato per la prima volta il 29 Novembre 2003. Il giorno successivo è stata messa in funzione la camera termostatica (interna) del sensore, mentre il 9 Dicembre 2003 quella esterna.

Il **Grafico D2bis_1** riporta l’andamento delle resistenze dei 4 fotoresistori durante questo primo periodo di funzionamento.

3 La costruzione del rivelatore

Il principio di funzionamento del rivelatore al CdS é molto semplice ma la sua costruzione e messa a punto non lo sono altrettanto. Si tratta di un apparecchio molto sensibile, che per poter funzionare correttamente devono essere rispettati alcuni punti importanti che possiamo riassumere nel modo seguente:

1. la temperatura del sensore deve essere mantenuta costante entro *alcuni milli-Kelvin*;
2. la corrente anodica deve essere mantenuta costante almeno entro il *micro-Ampère*;
3. la tensione anodica deve essere mantenuta costante almeno entro il *milli-Volt*.

Inoltre occorre tenere presente che:

- I fotoresistori al CdS sono molto sensibili alle variazioni di temperatura. Variazioni anche minime di temperatura (e.g. di qualche centesimo di °K) alterano in modo sensibile il funzionamento del sensore. Le escursioni della temperatura ambiente devono essere molto contenute, soprattutto se il sensore non ha la camera termostatica esterna. Pertanto, una volta messo a punto, è consigliabile porre l'apparecchio in un luogo protetto, privo di umidità, lontano da campi elettrici e magnetici (e.g. video, etc...) e da fonti calore e luce (anche il calore irraggiato dalle persone che si trovano nelle vicinanze può disturbarlo!);
- la sensibilità alle onde gravitazionali *viene acquistata dopo un periodo di funzionamento abbastanza lungo* (circa 1 anno) al quale abbiamo dato il nome di "formattazione". Con il passare dei mesi il fotoresistore, se non viene disturbato, acquisisce sempre di più questa sensibilità;
- una volta costruito e messo in funzione, *il rivelatore non deve essere più disalimentato*. Variazioni, anche minime, sia della corrente anodica che della tensione anodica *lo disturbano al punto di fargli perdere la sensibilità acquisita durante la "formattazione"*. Se l'interruzione è stata di breve durata (qualche secondo), in genere, il sensore riprende a funzionare dopo un periodo di tempo più o meno lungo dipendente dalla durata della interruzione;
- le variazioni di temperatura, anche di qualche °K, alterano fortemente il funzionamento del sensore *senza, però, fargli perdere la sensibilità alle onde gravitazionali*. Dopo qualche ora che la temperatura è stata riportata al suo valore iniziale, il sensore riprende a funzionare regolarmente.

È molto importante *costruire il rivelatore con un elevato grado di affidabilità*, soprattutto per quanto riguarda l'alimentatore e il regolatore della corrente anodica.

Per ottenere questo elevato grado di affidabilità di funzionamento, senza dover spendere eccessive somme di denaro, ci siamo auto-costruiti buona parte delle apparecchiature necessarie.

3.1 Materiali e componenti principali

Nel descrivere la costruzione e la messa a punto del rivelatore faremo riferimento, per quanto riguarda, disegni, fotografie, schemi elettrici, grafici, etc... al **Rivelatore N. 3**, il quale è quello che ha con sé tutta l'esperienza da noi acquisita nella costruzione di questi apparecchi.

3.1.1 Diodo a vuoto (display)

Come sorgente di luce per il fotoresistore abbiamo utilizzato un display con diodo a vuoto. In questo modo siamo riusciti a realizzare una sorgente di luce di intensità costante e molto stabile nel tempo. I display con diodi a vuoto fin'ora utilizzati sono stati recuperati da vecchie sveglie, orologi o bilance.

Tutti gli elementi attivi (anodi) che costituiscono le cifre (e/o i punti) del display vanno collegate insieme in modo da avere una sorgente luminosa più uniforme possibile. È bene individuare un punto di lavoro (I_a, V_a) del diodo a vuoto in una zona abbastanza "piatta", in cui la variazione della corrente anodica I_a non influisca molto sulla tensione

anodica V_a e viceversa. In questo modo la regolazione della corrente anodica risulta più stabile e precisa.

Nel caso del display FUTABA a 6 cifre, che è stato quello utilizzato fin'ora nei nostri rivelatori, il punto di lavoro scelto è compreso tra $V_a \approx 12 \div 13 V$ e $I_a \approx 3.5 \div 4.0 mA$.

Occorre tenere presente che un display con più cifre ha, a parità di intensità di luce, una corrente anodica e una tensione di filamento più elevate.

Prima di essere utilizzato è bene mantenere alimentato il display per alcune settimane affinché il filamento e l'anodo possano "pulirsi" ed ottenere, quindi, un funzionamento più stabile. Ciò vale soprattutto se il display è nuovo oppure è rimasto spento per molto tempo.

3.1.2 Fotoresistori

I fotoresistori al CdS hanno dimostrato questa loro capacità di essere sensibili alle onde gravitazionali anche se non se ne comprende ancora bene il perché ².

Ad oggi, il fotoresistore al CdS che ha dimostrato di funzionare meglio di qualunque altro è quello montato sul **Rivelatore N. 1** ed il "b" montato sul **Rivelatore N. 3**. Già nel 1997, con la realizzazione del **Rivelatore N. 2**, ci si era resi conto che altri tipi di fotoresistori, di più facile reperibilità, non funzionavano in modo soddisfacente.

Questo fotoresistore era facilmente reperibile fino agli inizi degli anni '90. Forse, oggi è ancora possibile trovarne qualche esemplare in qualche vecchia apparecchiatura elettronica. Nel 1994, quando ci si è resi conto di queste sue "strane" proprietà, si è riusciti a trovarne ancora degli esemplari in alcuni negozi di componenti elettronici di Roma.

Il fissaggio (definitivo) dei fotoresistori al display è fatto con colla trasparente al cianuro. I fotoresistori vanno, prima, schermati con due striscioline adesive di carta nera in modo da formare una fessura di luce di circa $1 \div 1.5 mm$ di larghezza. I fotoresistori vanno fissati sul display in modo da avere le bande fotosensibili perpendicolari alla fessura.

Il sensore, costituito dal display e dai fotoresistori, viene protetto contro la luce esterna avvolgendolo con carta adesiva nera fissata con nastro isolante di colore nero. Il sensore deve essere schermato anche dalla radiazione elettromagnetica avvolgendolo, esternamente, con una retina o foglio di rame o alluminio.

È utile installare sul display più di un fotoresistore, anche di tipo diverso. I fotoresistori che risulteranno non essere sensibili alle onde gravitazionali potranno essere utilizzati per controllare il funzionamento del display come sorgente luminosa! A tale riguardo, è utile installare sul display anche un fotodiode o un fototransistor.

3.2 Ponti di Wheatstone

La misura della resistenza di ciascun fotoresistore viene effettuata mediante un ponte di Wheatstone dedicato. Il ramo fisso del ponte è costituito da due resistenze da $10 k\Omega$, $1/2 W$ e all'1 % di precisione. Le resistenze sono del tipo a strato metallico con basso coefficiente termico (inferiore a $50 ppm/^\circ C$).

²Si veda a questo proposito **Un Rivelatore di Onde Gravitazionali** (Parte 4): *Il "rompicapo" del Rivelatore*.

L'altro ramo del ponte è costituito dal fotoresistore (lato superiore) e dalla resistenza variabile DVR (lato inferiore) per il bilanciamento del ponte. In questo modo, ad un aumento della resistenza del fotoresistore corrisponde una diminuzione della differenza di potenziale (V_{CD}) ai capi del ponte.

Si è preferito utilizzare una resistenza variabile DVR del tipo a scatti (16 posizioni) in quanto più precisa ed affidabile. Per la sua realizzazione sono stati utilizzati 2 interruttori DIL da 8 posizioni con contatti di tipo dorato. Anche in questo caso le resistenze sono da $1/2 W$ a strato metallico, con basso coefficiente termico (inferiore a $50 ppm/^\circ C$). I 16 valori di resistenza da noi utilizzati sono quelli riportati nella **Tabella 1**.

Tabella 1: Resistenza (variabile) DVR

DIL n. 1:	75	39.2	20	10	7.5	3.92	2	1	=	158.6200	$k\Omega$	
DIL n. 2:	750	392	200	100	75	39.2	20	10	=	1.5862	$k\Omega$	
Totale										=	160.2062	$k\Omega$

In questo modo è stato possibile realizzare una resistenza variabile da 0Ω fino ad un valore massimo di $160.2062 k\Omega$, con risoluzione minima di 10Ω .

Se, col passare del tempo, la fotoresistenza dovesse superare il valore di massimo di $160 k\Omega$ è necessario aggiungere una resistenza in serie alla DVR (e.g. $100 k\Omega$).

Per quei fotoresistori che, hanno, fin dall'inizio un valore di resistenza maggiore di $160 k\Omega$, è bene realizzare il ponte di Wheatstone con una DVR di valore più elevato (e.g. 1^a resistenza da $100 k\Omega$ e 16^{ma} resistenza da 20Ω , etc...). Un discorso opposto può essere fatto per quei fotoresistori che hanno inizialmente una resistenza molto più bassa.

Il ponte di Wheatstone è alimentato superiormente con circa $12 V$ ed inferiormente con circa $-8 V$, per cui la tensione totale V_{AB} risulta di una ventina di Volt.

Tra i punti C e D del ponte di Wheatstone, dove viene prelevato il segnale, è bene inserire un condensatore anti-disturbo in poliestere da, almeno, una decina di μF .

3.3 Alimentatore

I livelli di tensione (stabilizzati) utilizzati per il sensore sono i seguenti:

- $+18 V$ per l'alimentazione (polo positivo) degli amplificatori operazionali;
- $+12 V$ per l'anodo del display e l'alimentazione (polo positivo) dei ponti di Wheatstone;
- variabile da circa $-1.5 V$ a circa $-2.5 V$ per il filamento del display e modulata dal regolatore della corrente anodica;
- $-8 V$ per l'alimentazione (polo negativo) dei ponti di Wheatstone e degli amplificatori operazionali.

Per la costruzione dell'alimentatore, i regolatori variabili LM 317 (positivo) e LM 337 (negativo) si sono dimostrati una valida scelta. È bene effettuare, soprattutto per LM 317 che produce il livello di tensione di $+12 V$ per l'anodo del display, una selezione utilizzando quelli che hanno un coefficiente di temperatura più basso. In questo modo si

può ottenere una tensione stabile, entro il mVolt, anche per variazioni della temperatura ambiente di alcuni $^{\circ}C$ ³.

Le resistenze usate per i partitori di tensione dei regolatori sono da $1/2 W$, a strato metallico con basso coefficiente termico (inferiore a $50 ppm/^{\circ}C$).

I condensatori elettrolitici devono essere di buona qualità (e lunga durata), scelti con tensioni di lavoro sufficientemente elevate (e.g. $100 V_L$ per i regolatori positivi e $63 V_L$ per i regolatori negativi).

Il partitore di tensione del regolatore LM 337 che produce la tensione per il filamento deve avere un trimmer multigiri di buona qualità per poter effettuare manualmente variazioni di tensione del filamento che per il display FUTABA a 6 cifre devono essere comprese, almeno, da circa $-1.5 V$ fino a circa $-2.5 V$.

Sull'uscita dell'LM 337 che alimenta il filamento è necessario inserire un condensatore (e.g. $10 \mu F$) per evitare l'insorgere di oscillazioni. Inoltre, è bene proteggere il filamento del display da possibili sbalzi di tensione inserendo uno zener da $2.7 V$ (o $3.3 V$) e, almeno, $1 Watt$.

3.4 Regolazione della corrente anodica

La regolazione della corrente anodica del display viene effettuata modulando la tensione del filamento.

La soluzione che è stata scelta consiste nell'iniettare nel nodo per il riferimento dell'LM 337 che genera la tensione del filamento una corrente di controllo da un regolatore. Questo sistema ha il vantaggio che, con una semplice operazione di bilanciamento, è possibile scollegare provvisoriamente il regolatore di corrente e lasciare alimentato il filamento a tensione costante. Il bilanciamento viene fatto agendo mediante il trimmer multigiri dell'LM 337.

In questo modo il sensore risulta meno preciso ma si mantiene funzionante. Di tanto in tanto occorre aggiustare, variando la tensione del filamento, la corrente anodica del display.

Rispetto allo schema originario nel **Rivelatore N. 1** sono state apportate alcune modifiche al regolatore che hanno permesso di migliorarne sensibilmente le prestazioni, portando la stabilità della corrente anodica al di sotto dei $100 nA$.

La corrente anodica viene rilevata mediante una resistenza da 100Ω posta sull'anodo e, mediante un circuito differenziale del tipo a ponte di Wheatstone, viene convertita in un segnale di tensione utilizzando un amplificatore operazionale per strumentazione (AD 621 o similare). La resistenza variabile del ponte di Wheatstone è del tipo DVR a 16 posizioni, del tutto analoga a quella impiegata per i ponti di Wheatstone dei fororesistori, ma con un valore massimo di circa $16 k\Omega$ (1^a resistenza da $7.5 k\Omega$ e 16^{ma} resistenza da 1Ω).

Il guadagno dell'AD 621 è impostato in modo da avere una corrispondenza tra il segnale (tensione) in uscita dall'amplificatore e la corrente anodica di $1 mV$ per μA . Questo segnale pilota un regolatore (AD 711 o equivalente) ad azione Proporzionale+Integrale

³Un modo semplice per effettuare la selezione degli LM 317 è il seguente: si alimenta il regolatore con una tensione in ingresso più bassa (e.g. $5 V$) e lo si collega in modo che la tensione in uscita sia uguale a quella del riferimento interno ($1.25 V$). Quindi, si corto-circuita l'uscita in modo da scaldare il regolatore e si misura la variazione subita dalla tensione di riferimento.

(P+I) la cui uscita (tensione) viene convertita in corrente (di controllo) per LM 337 mediante una resistenza da $10\text{ k}\Omega$ posta in serie sull'uscita.

Le due resistenze da $100\ \Omega$ del circuito differenziale, così come la resistenza variabile *DVR*, devono essere a strato metallico con basso coefficiente termico.

Il condensatore dell'azione integrale del regolatore deve essere in poliestere di ottima qualità, con una corrente di perdita molto bassa.

Il valore della resistenza da porre in serie all'uscita del regolatore dipende dal valore delle resistenze impiegate per il partitore di tensione dell'LM 337. È bene che la resistenza venga scelta in modo che la correzione (massima) possibile sulla tensione del filamento non risulti troppo elevata, per evitare che eventuali guasti del regolatore abbiano, come conseguenza, variazioni troppo elevate della corrente anodica.

In **Appendice A.1** viene riportato il metodo da noi utilizzato per fare questa scelta.

Il regolatore (P+I) deve avere alcuni interruttori/deviatori per consentire di effettuare il passaggio MAN/AUTO e viceversa. Prima di passare in AUTO il regolatore, è necessario allineare (bilanciamento) il segnale di uscita in modo che il passaggio non abbia alcun flusso della corrente di controllo, la quale disturberebbe i fotoresistori. Nel bilanciamento è bene scaricare (e.g. corto-circuitandolo) il condensatore dell'azione integrale del regolatore ⁴.

Con il regolatore in MAN è possibile variare la corrente anodica modificando direttamente la tensione del filamento mediante il trimmer multigiri sull'LM 337 mentre, con il regolatore in AUTO, la corrente anodica può essere variata mediante la resistenza variabile a scatti *DVR*.

Di tanto in tanto, è bene riportare a zero la corrente di controllo in modo che il regolatore non effettui correzioni troppo elevate sulla tensione del filamento. Ciò può essere ottenuto agendo sul trimmer multigiri del LM 337 con il regolatore in AUTO, (si tratta di una operazione che va fatta con cautela e con variazioni molto piccole, in modo da dare tempo sufficiente al regolatore di effettuare le relative compensazioni).

Con il passare del tempo la tensione del filamento varia. All'inizio questa diminuisce (in valore assoluto) in quanto il filamento e l'anodo si "puliscono". Dopodiché la tensione inizia ad aumentare (andando, cioè verso valori sempre più negativi) in quanto il diodo a vuoto tende, anche se molto lentamente, ad esaurirsi.

Sul **Rivelatore N. 1** si è potuto constatare che, dopo il primo anno circa di funzionamento, l'incremento di tensione sul filamento si è stabilizzato intorno a circa 1 mV alla settimana. Per cui, dopo 10 anni di funzionamento la tensione si è incrementata di circa 0.5 V !

3.5 Regolazione della temperatura

Per mantenere la temperatura del sensore entro alcuni milli-Kelvin è stato necessario l'impiego di due camere termostatiche (interna+esterna). La camera termostatica interna, che è la più importante, mantiene costante a circa $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ la temperatura del sensore, mentre quella esterna, serve a compensare le variazioni della temperatura ambiente, mantenendo al suo interno una temperatura costante di $20 \div 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

⁴Se si vogliono evitare le operazioni manuali di bilanciamento del regolatore, può essere inserito un circuito automatico di bilanciamento (regolatore di bilanciamento).

3.5.1 Camera termostatica interna

La camera termostatica interna, che contiene il sensore (display+fotoreistori), è costruita con tavole in legno multistrato dello spessore di 20 mm, rivestite esternamente con lastre di polistirolo da 30 mm di spessore incollate alle tavole stesse. Esternamente il polistirolo è protetto con un foglio di compensato da 4 mm di spessore, anch'esso incollato.

Tra le pareti ed il polistirolo è inserito un foglio di materiale conduttore (e.g. tessuto di rame, foglio di alluminio, etc...) per schermare il sensore dai campi elettromagnetici a radiofrequenza.

Le dimensioni (interne) della camera termostatica sono le seguenti: 100 mm × 200 mm × 125 mm (*larghezza × lunghezza × altezza*).

La camera termostatica viene continuamente riscaldata mediante due transistor di potenza NPN (TIP 132 o similare) montati su un unico dissipatore da 2 °C/W fissato sul soffitto. Il sistema di riscaldamento è alimentato da il sistema di batterie a 12 V e ciascun transistor di potenza pilotato in corrente (driver) mediante un amplificatore operazionale (CA 3130 o similare). Si è scelta questa soluzione, rispetto a quella originaria utilizzata per il **Rivelatore N. 1**, la quale era basata sul riscaldamento mediante resistenze, in quanto più efficiente e consente un controllo della potenza termica con una caratteristica tensione di controllo e la potenza dissipata pressoché lineare, migliorando il comportamento dinamico del regolatore di temperatura (le resistenze presentano una caratteristica quadratica, con qualche difficoltà nella messa a punto della regolazione, soprattutto con basse potenze termiche di riscaldamento).

La camera termostatica va costruita con cura, evitando trafile di aria, ponti termici, etc.... Se ben costruita, con una temperatura esterna di 20 ÷ 25 °C, la camera termostatica ha bisogno di meno di 1 W di potenza termica per essere mantenuta alla temperatura di 35 °C.

La circolazione dell'aria all'interno della camera è realizzata mediante due ventilatori assiali in miniatura (40 × 40 mm) montati su cuscinetti a sfere, in modo da avere una elevata affidabilità e durata. La velocità dei ventilatori deve poter essere variata (elettronicamente) in modo da ottimizzare il comportamento dinamico della regolazione.

L'apporto termico del ventilatore è significativo (dell'ordine di qualche decimo di Watt) e, pertanto, è bene evitare di variarne troppo spesso la velocità. Quando necessario, effettuare l'operazione lentamente per dare tempo al regolatore di temperatura di effettuare la relativa compensazione.

La temperatura all'interno della camera viene rilevata mediante due sonde costituite da resistenze a coefficiente di temperatura negativo (NTC). Una di esse, quella utilizzata per la regolazione, è installata più esternamente, mentre l'altra è montata vicino al fotoreistore.

Per ridurre il rumore indotto dall'energia cinetica dell'aria che colpisce la sonda, è bene ridurre al minimo indispensabile la circolazione dell'aria nella camera e schermare la sonda di temperatura per la regolazione (e.g. posizionandola appena sotto la retina di alluminio che avvolge il sensore). In questo modo, inoltre, si riduce l'usura dei ventilatori.

La resistenza di ciascun sensore (NTC) viene misurata mediante un ponte di Wheatstone accoppiato con un amplificatore operazionale per strumentazione (AD 623 o similare), con una tensione di riferimento intermedia di +5 V. Il riferimento di tensione deve avere una buona stabilità (entro il milli-Volt) per evitare le variazioni della tensione di tensione della batteria possano disturbare le misure di temperatura. Per questo scopo

può essere usato un regolatore del tipo LM 7805 o, meglio, se un riferimento di precisione (AD 586 o similare).

I resistori NTC impiegati sono del tipo a goccia con resistenza nominale di $100\text{ k}\Omega$ (a $25\text{ }^\circ\text{C}$). La resistenza variabile del ponte di Wheatstone è del tipo DVR (è sufficiente un solo DIP switch a 8 posizioni) con un valore massimo di circa $160\text{ k}\Omega$.

Il guadagno dell'AD 623 è impostato in modo da avere una corrispondenza tra la tensione di uscita e la temperatura di circa 1 V per $^\circ\text{C}$.

Il segnale di temperatura pilota direttamente il regolatore di temperatura (AD 711 o similare), con azione Proporzionale+Integrale ($P+I$), la cui uscita ($0\div 10\text{ V}$) costituisce il segnale di riferimento per il driver di corrente del transistor di potenza. Il driver ha una caratteristica tensione-corrente di $1\text{ V} \approx 0.02\text{ A}$. Per cui, con 10 V in ingresso la corrente di riscaldamento risulta di circa 0.2 A , con una potenza termica massima di riscaldamento di circa 2 Watt .

I sistemi di riscaldamento (ventilatore, transistor di potenza, driver di corrente e sonda di temperatura sono doppi, di cui uno normalmente è in funzione mentre l'altro rimane di riserva.

Sono utili l'installazione di un termometro digitale (a batteria), con doppio display e precisione di $0.1\text{ }^\circ\text{C}$, in modo da avere una lettura immediata sia della temperatura interna che di quella esterna e un indicatore (voltmetro digitale con 3 cifre e $1/2$) per il monitoraggio del segnale di pilotaggio del driver di corrente.

3.5.2 Camera termostatica esterna

La camera termostatica esterna ha lo scopo di compensare le variazioni di temperatura dell'ambiente. Questa camera non è strettamente necessaria se il rivelatore si trova in un luogo protetto contro: sbalzi di temperatura, circolazione di aria, radiazione luminosa, radiazione infrarossa (e.g. presenza di persone), etc...

La temperatura all'interno di questa camera viene mantenuta ad un valore costante corrispondente, più o meno, al valore medio di temperatura dell'ambiente in cui si trova a funzionare il rivelatore (e.g. $20\div 25\text{ }^\circ\text{C}$), in modo da consentire dei risparmi di energia elettrica.

La camera è realizzata con tavole di legno multistrato da 20 mm ricoperte esternamente con lastre di polistirolo da 20 mm incollate alle tavole stesse. Il polistirolo è protetto esternamente da un foglio di compensato da 4 mm anch'esso incollato.

Le dimensioni (interne) della camera termostatica sono di $500\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 500\text{ mm}$, (*larghezza* \times *lunghezza* \times *altezza*) in modo da contenere la camera termostatica (interna) del sensore.

Il sistema di controllo della temperatura utilizza un sistema di riscaldamento-raffreddamento mediante celle Peltier. Il controllo della corrente nelle celle Peltier viene effettuato utilizzando un ponte ad "H" costituito da due coppie di transistor di potenza (darlington) complementari da, almeno, una decina di Ampère (e.g. MJ 2501/MJ 3001 o similari). L'utilizzo del ponte ad "H" consente di effettuare il passaggio caldo-freddo e viceversa, con inversione automatica della corrente nelle celle Peltier.

Per realizzare un controllo più efficace, si è preferito pilotare le celle Peltier in corrente piuttosto che in tensione.

La misura di temperatura è effettuata in modo analogo a quella per la camera ter-

mostatica interna. Anche il regolatore di temperatura, del tipo Proporzionale+Integrale (P+I), è del tutto simile.

La circolazione dell'aria all'interno della camera viene mantenuta attiva mediante un ventilatore assiale ($60 \times 60 \text{ mm}$) con la possibilità di regolarne (elettronicamente) la velocità. La sonda di temperatura è montata sull'aspirazione del ventilatore.

Le celle Peltier sono due da 50 W ciascuna e vengono disposte in serie (termicamente) tra di loro ⁵. Da punto di vista elettrico possono essere collegate in parallelo (alimentatore da $15 \div 18 \text{ V}$ e corrente massima di 10 A), oppure in serie (alimentatore da $30 \div 35 \text{ V}$ e una corrente massima di 5 A). Quest'ultima soluzione si è dimostrata migliore per quanto riguarda i consumi di energia elettrica.

Con questo tipo di regolazione si riesce, abbastanza facilmente, a mantenere la temperatura costante all'interno della camera entro $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$.

L'alimentatore (non stabilizzato) è collegato direttamente alla rete esterna (220 Vac) in quanto la mancanza della tensione di rete non crea mai grossi problemi al sensore in quanto la camera termostatica interna è in grado di compensare, in parte, le variazioni di temperatura.

Le apparecchiature non sono ridondate in quanto si tratta di una regolazione non critica.

L'installazione delle celle Peltier può essere fatta sulla parte superiore della camera termostatica, realizzando un'apertura di circa $50 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ per il passaggio del calore. All'interno della camera è sufficiente un dissipatore da $1 \div 1.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$, mentre all'esterno ne è necessario uno da $0.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$. I due dissipatori sono connessi tra di loro con un blocco di alluminio, di sezione $50 \times 60 \text{ mm}$, per il trasferimento del calore. Tra i dissipatori e il blocco di alluminio vengono montate le due celle Peltier.

Il ventilatore esterno, è di tipo assiale con sezione da ($120 \times 120 \text{ mm}$). La stessa aria viene utilizzata anche per raffreddare i transistor di potenza del ponte ad "H". Questo ventilatore, necessario soltanto in raffreddamento, deve avere la possibilità di poterne variare manualmente i giri (e.g. utilizzando i regolatori variabili LM 317) che vengono aggiustati di tanto in tanto in funzione della temperatura esterna.

Per risparmiare energia elettrica, il trasformatore dell'alimentatore può essere del tipo multiuscita (e.g. 5 V , 10 V , 12 V , 15 V , etc...) in modo da variare (manualmente) la tensione di alimentazione delle celle Peltier in base alle effettive necessità.

3.6 Batterie e alimentazione elettrica esterna

Il rivelatore è alimentato in corrente continua con tensione doppia di $+24 \text{ V}$ e -12 V . Il $+24 \text{ V}$ è realizzato con 2 batterie al piombo, del tipo per automobile, da 12 V e $45 \div 50 \text{ Ah}$ collegate in serie. Il -12 V è ottenuto con due batterie dello stesso tipo collegate in parallelo.

Il sistema a -12 V è dimensionato con una capacità maggiore ($90 \div 100 \text{ Ah}$) in quanto alimenta anche la camera termostatica (interna).

Un sistema di alimentazione di questo genere consente un'autonomia di funzionamento del rivelatore (con la camera termostatica interna) di $15 \div 20$ giorni.

⁵Se le escursioni della temperatura ambiente non sono elevate, può essere sufficiente una sola cella Peltier.

Le batterie vengono mantenute cariche (in tampone) mediante due alimentatori stabilizzati collegati alla rete esterna. L'alimentatore per il $+24 V$ è dimensionato per una corrente massima di $2.5 A$, mentre quello per il $-12 V$ per $5 A$.

Gli alimentatori stabilizzati sono impostati con tensioni in uscita, rispettivamente, $+26.5 V$ e $-13.25 V$. Sono stati scelti questi valori per mantenere bassa la corrente di perdita nelle batterie e avere, quindi, una durata molto più lunga delle stesse. In questo modo, le batterie, se di buona qualità e controllate periodicamente, possono raggiungere gli $8 \div 10$ anni di vita.

La sostituzione delle batterie deve essere effettuata in modo da mantenere (sempre!) alimentato il rivelatore, evitando eccessivi sbalzi di tensione e utilizzando temporaneamente dei diodi per evitare scambi di corrente tra batterie.

3.7 Collegamenti elettrici

La maggior parte dei circuiti elettronici sono stati realizzati utilizzando schede multifori in vetronite con passo da $2.54 mm$ (Eurocard da laboratorio da $160 \times 100 mm$). Per i collegamenti tra i vari componenti montati sulla scheda è stato utilizzato filo per "wire-wrap" da 24awg e 28awg saldato.

I collegamenti elettrici principali tra le batterie e tra queste e i rispettivi alimentatori sono stati realizzati con filo di rame di grossa sezione $4 \div 6 mm^2$.

I collegamenti delle alimentazioni ai vari circuiti sono stati realizzati in piattina di rame (bipolare/tripolare) con sezione (minima) di $0.5 mm^2$.

I collegamenti dei fotoresistori ai rispettivi ponti di Wheatstone sono stati realizzati con cavo multipolare schermato con sezione dei fili da $0.25 mm^2$ e schermo collegato a $0 V$.

Un cavo schermato (2 poli più schermo) con sezione minima $0.5 mm^2$ è stato utilizzato per collegare il display all'alimentatore (con lo schermo collegato al catodo).

3.8 Telaio

Il rivelatore con la camera termostatica (interna) è stato disposto su un telaio realizzato con legno multistrato da $30 mm$ sul quale sono state poste anche le (quattro) batterie.

La camera termostatica (esterna) è stata realizzata in due metà. La parte inferiore è fissata al telaio in modo da aumentarne la rigidità, mentre la parte superiore sulla quale sono montate le celle Peltier è rimovibile.

Le dimensioni in pianta dell'apparecchio sono di $1,000 mm \times 500 mm$ con un'altezza totale di circa $600 mm$.

Il peso complessivo, incluse le batterie, è di circa $80 kg$.

4 Verifiche e messa a punto

Per la messa a punto del rivelatore è consigliabile procedere nel modo seguente.

Step 1. Mettere in funzione l'alimentatore e collegarlo al display senza inserire il regolatore della corrente anodica. Controllare i livelli di tensione e verificare il range di variazione della tensione del filamento con il trimmer multigiri dell'LM 337.

Step 2. Mettere in funzione la camera termostatica (interna) senza il sensore aiutandosi con il termometro digitale per l'indicazione della temperatura interna ed esterna.

Ottimizzare i parametri del regolatore di temperatura (guadagno dell'azione proporzionale K_p e tempo di integrazione T_I) effettuando variazioni dapprima del set-point attraverso la DVR e, poi, variando a gradini il numero di giri del ventilatore verificandone, di volta in volta, il raggiungimento delle nuove condizioni di regime senza pendolazioni e/o con tempi troppo lunghi. Le verifiche vanno effettuate nel campo di funzionamento da, almeno, 20 °C a 40 °C).

Step 3. Inserire il (solo) display nella camera termostatica installando al posto dei fotoresistori delle resistenze ad elevata stabilità da circa 50 ÷ 100 kΩ e collegarle al ponte di Wheatstone.

In questo modo è possibile verificare anche il funzionamento dei ponti di Wheatstone. Al variare della temperatura all'interno della camera termostatica, la differenza di potenziale V_{CD} ai capi del ponte deve rimanere rigorosamente costante e il rumore presente non deve essere superiore a qualche decimo di milli-Volt.

Step 4. Inserire al posto delle resistenze degli NTC da qualche decina di kΩ).

In questo modo è possibile fare ulteriori verifiche sul funzionamento dei ponti di Wheatstone e il loro l'azzeramento mediante le DVR, nonché il rumore introdotto dalla regolazione di temperatura.

Step 5. A questo punto può essere inserito il regolatore della corrente anodica.

Poichè questo regolatore agisce iniettando una corrente di controllo sul nodo di riferimento dell'LM 337 che alimenta il filamento, prima di inserirlo occorre effettuare il bilanciamento.

Se non è stato realizzato il regolatore di bilanciamento, ciò può essere ottenuto corto-circuitando il condensatore dell'azione integrale e agendo sulla resistenza DVR (set-point).

Una volta inserito il regolatore va tolto il corto-circuito al condensatore. Occorre tenere presente che questa operazione provoca una leggera variazione della corrente anodica (in quanto il regolatore tende, ora, ad annullare l'errore) la quale può essere recuperata manualmente agendo sulla DVR.

Una operazione più o meno analoga deve essere fatta prima di disinserire il regolatore.

È consigliabile installare, incollandolo sul display, anche un fotodiodo o un fototransistor. In questo modo si può verificare, diversamente, la stabilità del funzionamento del display come sorgente di luce costante e, quindi, la regolazione della corrente anodica.

Step 6. Mantenere in funzione l'alimentatore, il display, il regolatore della corrente anodica nella camera termostatica (interna) per un periodo abbastanza lungo (e.g. qualche mese) in modo da verificarne l'affidabilità. Durante tale periodo, il display si "pulisce" per cui la tensione del filamento diventare sempre più stabile.

Step 7. Togliere, a questo punto, gli NTC ed installare i fotoresistori, mettendo nuovamente il sensore nella sua camera camera termostatica. Il fotodiodo (o fototransistor) può essere lasciato in quanto utile per le verifiche periodiche del display.

Step 8. Portare gradualmente la temperature del sensore a circa $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si tenga presente che per stabilizzare completamente la temperatura del sensore occorrono diverse ore.

Step 9. Nel periodo iniziale di funzionamento, non è necessario inserire la camera termostatica (esterna), quando le variazioni di resistenza del fotoresistore sono elevate.

Soltanto dopo alcuni mesi, quando le variazioni della tensione ai capi del ponte di Wheatstone di sono ridotte al di sotto della decina di mVolt al giorno può essere messa in servizio la camera termostatica (esterna) la quale, come è stato detto, serve per ridurre l'influenza delle condizioni ambientali rendendo il funzionamento del rivelatore più preciso.

5 Controlli periodici e registrazione dei dati

La misura della tensione ai capi dei ponti di Wheatstone non è particolarmente critica. È sufficiente uno strumento digitale con 3 cifre e 1/2 con una impedenza di ingresso di almeno $10\text{ }M\Omega$. Uno strumento con una impedenza di ingresso da $1\text{ }M\Omega$ disturba un poco i fotoresistori.

In alternativa, per ciascun ponte di Wheatstone, può essere realizzato uno stadio di amplificazione a guadagno unitario che utilizza operazionali con ingresso a FET.

È bene non prelevare direttamente dal circuito i segnali di monitoraggio della corrente anodica e della tensione anodica. Per la corrente anodica è sufficiente monitorare le sole variazioni utilizzando il segnale (in tensione) di uscita dell'amplificatore (AD 621), mentre per la tensione anodica ci si può accontentare della tensione (circa 12 V) di uscita del LM 317, a meno di interporre, anche in questo caso uno stadio amplificatore con operazionali a FET.

All'inizio, nei primi mesi di "formattazione", è sufficiente una lettura o due al giorno (che possono prese manualmente). Soltanto quando la tensione ai capi del ponte di Wheatstone ha smesso o quasi di scendere in modo continuo ed iniziano le variazioni può essere messo in funzione il sistema di acquisizione automatica dei dati. Una frequenza di una lettura ogni $10 \div 20$ minuti è sufficiente per le onde di intensità più elevata, mentre occorre scendere ad un lettura al minuto se si vogliono registrare anche le variazioni più rapide (il rivelatore è in grado di "vedere" variazioni fino a ben oltre i $1,000\text{ }Hz$).

Una volta completata la "formattazione", sul segnale registrato è possibile distinguere:

- variazioni di tensione molto grandi (da alcuni milli-Volt fino a $100\text{ }mV$ e oltre al giorno) e che possono durare anche per molti giorni, corrispondenti alle onde di grande intensità (a forma di "forchetta") prodotte dai collassi dei nuclei dei Quasar a Nucleo Multiplo (QNM);
- variazioni di tensione dell'ordine di $1 \div 5\text{ }mV$ e durata da meno di 1 minuto fino ad alcuni minuti, corrispondenti alla nascita di "nuova" materia sotto forma di bolle di idrogeno neutro;

- variazioni di tensione dell'ordine del centinaio di micro-Volt e durata dell'ordine del secondo o inferiore, corrispondenti alla caduta di stelle o altri oggetti più massicci sui nuclei dei QNM;
- variazioni di qualche decina di micro-Volt e con frequenze di $10 \div 100 \text{ Hz}$, corrispondenti alla caduta di oggetti celesti di più piccole dimensioni (pianeti, etc...) sui nuclei dei QNM.

5.1 Azzeramento dei ponti di Wheatstone

Inizialmente e nei primi mesi di funzionamento la resistenza dei fotoresistori varia in modo sensibile per cui occorre azzerare più di frequente i ponti di Wheatstone dei fotoresistori.

È bene non superare differenze di tensione ai capi del ponte di $1 \div 1.5 \text{ V}$ per non alterare troppo il funzionamento del fotoresistore durante gli azzeramenti e per non comprimere eccessivamente il segnale del ponte.

Occorre tenere presente che *una variazione eccessiva della tensione ai capi del fotoresistore ne altera la dissipazione interna per effetto Joule*, per cui occorrono diverse ore affinché possa riprendere a funzionare regolarmente.

5.2 Variazioni delle condizioni ambientali

Se le variazioni della temperatura ambiente dovessero influenzare in modo sensibile il funzionamento del sensore, in modo particolare la tensione anodica, si hanno a disposizione le seguenti due possibilità:

- posizionare il rivelatore in un ambiente con temperatura controllata (e.g. climatizzato), al buio e in assenza di persone;
- montare l'alimentatore ed eventualmente anche il regolatore della corrente anodica direttamente all'interno della camera termostatica (esterna).

5.3 Acquisizione dei dati

Abbiamo trovato abbastanza conveniente utilizzare l'Agilent 34970A come sistema automatico di acquisizione dei dati. Ciascuna "slot" (il 34970A può accettarne fino ad un massimo di tre) è in grado di acquisire una ventina di segnali analogici i quali sono più che sufficienti per un monitoraggio completo del rivelatore (fotoresistori, tensioni di alimentazione, temperature, etc...). Per la lettura dei segnali sono sufficienti 5 cifre e 1/2 (anche se il voltmetro automatico del 34970A può arrivare fino a 6 cifre e 1/2).

L'Agilent 34970A può essere interfacciato con un PC via seriale con la porta RS 232 oppure attraverso l'interfaccia IEEE-488.

Tuttavia, possono essere usati anche altri sistemi di acquisizione dei dati diversi quale l'Hydra della Fluke oppure schede montate direttamente su PC (e.g. National Instruments), controllori logici programmabili (PLC) con software di supervisione, etc...

6 "Formattazione" dei fotoresistori

Ad oggi (sono, ormai, trascorsi circa 18 mesi) la situazione per quanto riguarda la formattazione dei fotoresistori del **Rivelatore N. 3** è la seguente:

- Il fotoresistore principale, dopo i primi mesi di funzionamento ha rallentato sensibilmente la sua variazione (aumento) della resistenza e possiamo dire che dopo circa 6 mesi ha iniziato a mostrare le prime variazioni di tensione. Dopo 9 mesi circa la sua “formattazione” era, praticamente, completata e si è messo in linea con quello del **Rivelatore N. 1**.
- Una delle fotocellule di caldaia, ha mostrato un andamento opposto a tutti gli altri, con una diminuzione della resistenza. Dopo circa $8 \div 10$ mesi il valore della resistenza si è stabilizzato per poi iniziare ad aumentare molto lentamente. Questo fotoresistore risulta sensibile alle onde gravitazionali di variazione più rapida (fino a qualche ora), anche se la sua sensibilità risulta molto bassa (circa $3 \div 5$ volte inferiore a quella del fotoresistore principale).
- Gli altri 4 fotoresistori, ad oggi, continuano ancora ad aumentare in modo monotono la loro resistenza. Di questi, soltanto uno (il fotoresistore di piccole dimensioni, utilizzato nelle macchine fotografiche) sembra avere acquisito una qualche sensibilità alle onde gravitazionali di durata più breve.

È importante tenere presente che, man mano che i fotoresistori si “formattano”, diventano sempre meno sensibili alle variazioni di temperatura!

7 Conclusioni

Speriamo di avere fornito informazioni utili per la costruzione e la messa a punto del rivelatore di onde gravitazionali che utilizza fotoresistori al CdS.

Forse, non siamo stati sufficientemente esaustivi per quanto riguarda la scelta ed il reperimento dei fotoresistori da utilizzare per la costruzione del sensore. Su questo argomento abbiamo in corso alcune verifiche sperimentali i cui risultati preliminari indicano che i fotoresistori al CdS/CdSe sembrano avere una sensibilità superiore alle onde gravitazionali.

A APPENDICE

A.1 Controllo della tensione del filamento

Il bilancio delle correnti nel nodo O di riferimento dell'LM 337, trascurando la corrente attraverso il piedino "Adj", fornisce la seguente relazione (v. **Figura 1**):

$$\frac{V_C - V_O}{R_C} - \frac{V_O}{R_B} = \frac{V_O - V_f}{R_A} \quad (1)$$

dall quale si ricava la tensione V_f per il filamento:

$$V_f = V_C \frac{\frac{1}{R_C}}{\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}} - V_{ref} \frac{\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}}{\frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C}} \quad (2)$$

con,

$$V_{ref} = V_O - V_f \equiv 1.25 \text{ V}$$

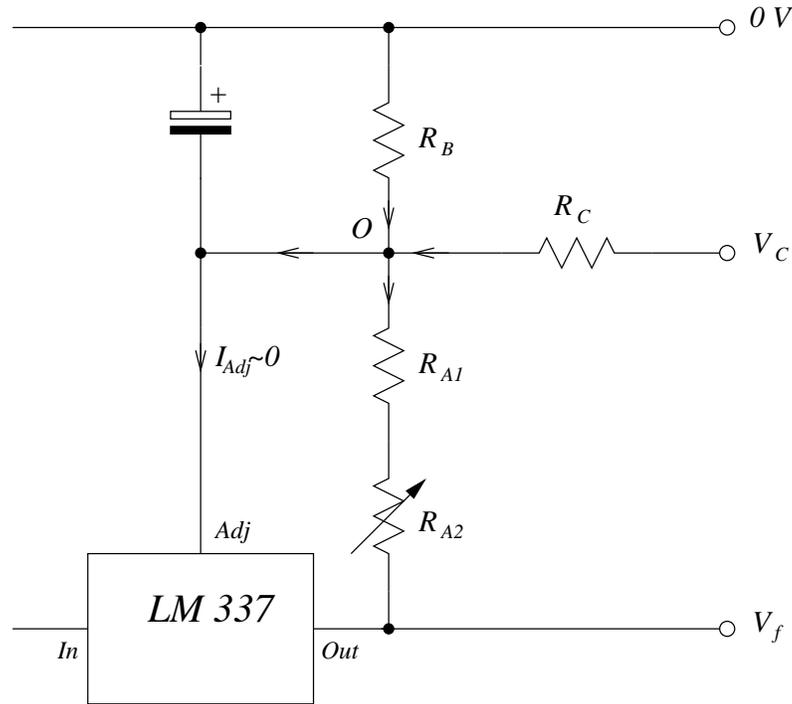


Figura 1: Controllo della tensione del filamento

Poiché con $V_C \approx 0$ si deve avere $-2.5 \text{ V} \leq V_f \leq -1.5 \text{ V}$, occorre che:

$$-2.5 = -1.25 \left(\frac{R_B}{R_{A1}} + 1 \right) \quad (3)$$

e,

$$-1.5 = -1.25 \left(\frac{R_B}{R_{A1} + R_{A2}} + 1 \right) \quad (4)$$

dove, nella (2) è stato trascurato il termine $1/R_C$ rispetto agli altri. Quindi,

$$\frac{R_B}{R_{A1}} = \frac{2.5}{1.25} - 1 \equiv 1$$

e,

$$\frac{R_B}{R_{A1} + R_{A2}} = \frac{5.5}{1.25} - 1 \equiv 0.2$$

dalle quali si ottiene:

$$\frac{R_{A2} + R_{A1}}{R_{A1}} = \frac{1}{0.2} \equiv 5$$

Scegliendo il trimmer R_{A2} da $1 \text{ k}\Omega$ si ha:

$$R_{A1} \equiv R_B = 290 \text{ }\Omega \text{ (= } 470 \text{ }\Omega \parallel 750 \text{ }\Omega)$$

Se si vuole che la massima variazione di V_f che è in grado di effettuare il regolatore non superi i 0.5 V , tenendo presente che la tensione di controllo V_C può andare da circa $+15 \text{ V}$ a circa -5 V), la resistenza R_C in serie al regolatore deve risultare:

$$R_C = \left(\frac{15 + 5}{0.5} - 1 \right) R_B = 39\,290 \approx 10 \text{ k}\Omega$$