



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica

Tesi di Laurea

**Realizzazione di un sistema per  
la caratterizzazione elettrica di  
dispositivi elettroluminescenti**

**Laureando:**

Gianni Loforti

**Relatore:**

Dott. Ing. Mauro Mosca

**Tesi sviluppata presso il Laboratorio di Tecniche Laser**

Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica  
e delle Telecomunicazioni

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

La teoria è quando si sa tutto e niente funziona. La pratica è quando tutto funziona e nessuno sa il perché. Noi abbiamo messo insieme la teoria e la pratica: non c'è niente che funzioni... e nessuno sa il perché!

*Albert Einstein*

# Sommario

Scopo di questo lavoro di tesi è la realizzazione di un sistema per la caratterizzazione elettrica di dispositivi elettroluminescenti. Questo lavoro è la prima parte di un progetto per la caratterizzazione completa, elettrica e fotometrica, di dispositivi elettroluminescenti, sviluppato presso il *Laboratorio di Tecniche Laser del Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e delle Telecomunicazioni dell'Università degli Studi di Palermo*.

Il *sistema* realizzato e descritto in questa tesi è di fatto un *Source-Meter* programmabile, in grado di pilotare il dispositivo da caratterizzare e di misurarne le grandezze caratteristiche  $V-I$ . La possibilità di scegliere il tipo di pilotaggio del dispositivo (*tensione o corrente*), la tensione di fondo scala del pilotaggio o il range di corrente che attraversa il dispositivo, rende il *Source-Meter* uno strumento molto versatile e di *uso generico*.

Il *Source-Meter* è controllato da un calcolatore tramite un software dedicato realizzato in LabVIEW<sup>TM</sup>. Per interfacciarlo con il calcolatore è stata utilizzata una *scheda di acquisizione (DAQ)* della NATIONAL INSTRUMENTS<sup>TM</sup>.

La tesi si articola in quattro capitoli. Nel primo capitolo viene presentato il funzionamento generale del *sistema di misura*. Nel secondo capitolo vengono illustrate le varie parti del *sistema di misura* da un punto di vista *hardware*. Nel terzo capitolo viene descritto il *software* realizzato per la programmazione del *Source-Meter* e per il tracciamento della caratteristica  $V-I$ . Il quarto capitolo, infine, riporta le prove sperimentali di misura effettuate in laboratorio su diversi dispositivi.

# Indice

<b>Sommario</b>	<b>iii</b>
<b>1 Funzionamento del sistema</b>	<b>1</b>
1.1 Il sistema di caratterizzazione . . . . .	1
1.2 Operazioni preliminari . . . . .	2
1.3 Caratterizzazione elettrica $V-I$ . . . . .	4
1.4 Pilotaggio in corrente . . . . .	8
1.5 Struttura dei file . . . . .	12
<b>2 L'hardware</b>	<b>15</b>
2.1 Scheda di acquisizione <i>NI USB-6009</i> . . . . .	15
2.2 Pilotaggio in tensione . . . . .	20
2.3 Pilotaggio in corrente . . . . .	26
2.4 Circuito completo . . . . .	27
<b>3 Il software</b>	<b>32</b>
3.1 Introduzione a LabVIEW™ . . . . .	32
3.2 Pannello principale . . . . .	41
3.3 Operazioni preliminari e taratura . . . . .	43
3.4 Configurazione pilotaggio in tensione . . . . .	44
3.5 Configurazione pilotaggio in corrente . . . . .	48
3.6 Acquisizione . . . . .	50
3.7 Buffer . . . . .	55
3.8 Scrivi file . . . . .	56
<b>4 Caratterizzazione <i>LED</i> e altre misure</b>	<b>60</b>
4.1 Linearità del sistema . . . . .	60
4.2 Caratterizzazione <i>Led</i> . . . . .	64
4.3 Misure a corrente variabile . . . . .	70
<b>Conclusioni</b>	<b>72</b>

Bibliografia	73
A Datasheet	74

# Elenco delle tabelle

3.1	Rapporti di partizione . . . . .	42
4.1	Configurazione verifica linearità . . . . .	61
4.2	Grandezze caratteristiche verifica linearità . . . . .	63
4.3	Configurazione caratteristica <i>LED</i> blu e giallo . . . . .	64
4.4	Grandezze caratteristiche <i>LED blu e giallo</i> . . . . .	65
4.5	Grandezze caratteristiche. Range corrente $10\ \mu\text{A}$ - $10\ \text{mA}$ . . . . .	67
4.6	Grandezze caratteristiche. Range corrente $1\ \text{nA}$ - $10\ \mu\text{A}$ . . . . .	69
4.7	Grandezze caratteristiche. Pilotaggio in corrente . . . . .	71

# Elenco delle figure

1.1	Schema del sistema di caratterizzazione . . . . .	1
1.2	Menu principale . . . . .	2
1.3	Valori di default per le resistenze . . . . .	3
1.4	Taratura resistenze . . . . .	4
1.5	Configurazione pilotaggio in tensione . . . . .	5
1.6	Tracciamento caratteristica e acquisizione . . . . .	6
1.7	Fine acquisizione . . . . .	7
1.8	Salvataggio dati su file . . . . .	8
1.9	Errore mancata accensione . . . . .	9
1.10	Configurazione pilotaggio in corrente . . . . .	9
1.11	Pilotaggio con corrente costante avviato . . . . .	10
1.12	Stato acquisizione pilotaggio a corrente costante . . . . .	11
1.13	Pilotaggio con corrente variabile avviato . . . . .	11
1.14	Acquisizione pilotaggio con corrente variabile . . . . .	12
1.15	File per il pilotaggio in tensione . . . . .	13
1.16	File per i pilotaggi in corrente . . . . .	14
2.1	Scheda <i>DAQ NI USB-6009</i> . . . . .	16
2.2	Schema a blocchi <i>DAQ NI USB-6009</i> . . . . .	16
2.3	Terminali <i>DAQ NI USB-6009</i> . . . . .	17
2.4	Circuiteria della singola uscita analogica . . . . .	17
2.5	Circuiteria ingressi analogici . . . . .	18
2.6	Terminali ingressi/uscite digitali <i>DAQ NI USB-6009</i> . . . . .	18
2.7	Uscita <i>open-drain</i> con resistenza di <i>pull-up</i> esterna . . . . .	19
2.8	Schema elettrico del circuito di pilotaggio in tensione . . . . .	21
2.9	Protezione ingressi analogici scheda <i>NI USB-6009</i> . . . . .	22
2.10	Convertitore corrente-tensione . . . . .	23
2.11	Selezione range corrente . . . . .	24
2.12	Relè <i>reed</i> SPST . . . . .	25
2.13	Convertitore tensione-corrente . . . . .	27
2.14	Relè reed SPDT . . . . .	28
2.15	Schema elettrico del circuito completo . . . . .	29

2.16	Alimentatore $\pm 15\text{ V}$ , $+5\text{ V}$ . . . . .	30
2.17	Circuito realizzato su basette sperimentali . . . . .	31
3.1	Tipi di collegamento . . . . .	32
3.2	Il pannello frontale e il diagramma a blocchi di un <i>VI</i> . . . . .	33
3.3	Controls Palette (a) e Functions Palette (b) . . . . .	34
3.4	Controlli, indicatori e relativi terminali . . . . .	35
3.5	Tipi di controlli e indicatori . . . . .	35
3.6	Struttura <i>while loop</i> . . . . .	35
3.7	Struttura <i>case</i> . . . . .	36
3.8	Tipi di condizioni nelle strutture <i>case</i> . . . . .	36
3.9	Struttura <i>for</i> . . . . .	37
3.10	Struttura <i>flat sequence</i> . . . . .	37
3.11	Struttura <i>stacked sequence</i> . . . . .	38
3.12	Variabili locali e globali . . . . .	38
3.13	DAQ Assistant . . . . .	39
3.14	DAQ Assistant wizard . . . . .	39
3.15	Generazione di un segnale analogico con l'utilizzo del <i>Daq Assistant</i> .	40
3.16	Diagramma a blocchi del <i>menu.vi</i> . . . . .	41
3.17	<i>SubVI Node Setup</i> . . . . .	42
3.18	Diagramma a blocchi <i>operazioni preliminari.vi</i> . . . . .	43
3.19	Diagramma a blocchi <i>taratura.vi</i> . . . . .	44
3.20	Frame0 <i>pilotaggio tensione.vi</i> . . . . .	44
3.21	Diagramma a blocchi <i>pilotaggio tensione.vi</i> . . . . .	46
3.22	Scelta range corrente <i>pilotaggio tensione.vi</i> . . . . .	47
3.23	Diagramma a blocchi <i>pilotaggio corrente.vi</i> . . . . .	49
3.24	Diagramma a blocchi <i>acquisizione corrente.vi</i> . . . . .	51
3.25	Struttura <i>sequence acquisizione corrente.vi</i> . . . . .	52
3.26	Inizializzazione elementi registri <i>acquisizione corrente.vi</i> . . . . .	53
3.27	Diagramma a blocchi <i>acquisizione tensione corrente variabile.vi</i> . . .	54
3.28	Diagramma a blocchi <i>XY Chart Buffer.vi</i> . . . . .	55
3.29	Diagramma a blocchi <i>BufferV.vi</i> . . . . .	55
3.30	Diagramma a blocchi <i>scrivi file.vi</i> . . . . .	57
3.31	Composizione configurazione in funzione del pilotaggio . . . . .	58
3.32	Inserimento valori grandezze caratteristiche . . . . .	59
4.1	Caratteristiche V-I resistenze . . . . .	61
4.2	Caratteristiche V-I. LED blu e giallo . . . . .	64
4.3	Caratteristiche V-I. Range corrente $10\ \mu\text{A}$ - $10\ \text{mA}$ . . . . .	66
4.4	Caratteristiche V-I. Range corrente $1\ \text{nA}$ - $10\ \mu\text{A}$ . . . . .	68
4.5	Pilotaggio con corrente variabile . . . . .	70



# Capitolo 1

## Funzionamento del sistema

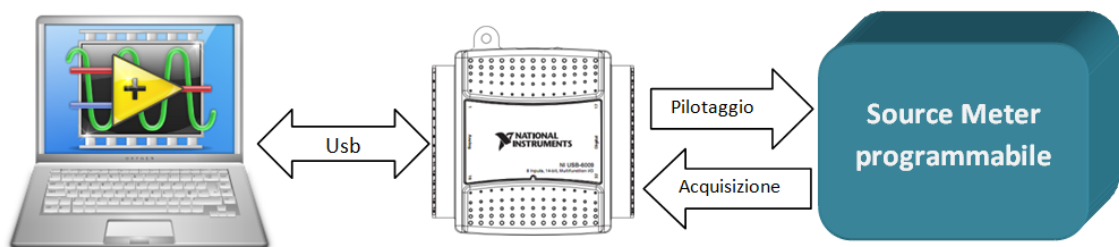
Questo capitolo vuole essere una sorta di *manuale d'uso* per l'utente. L'approfondimento dei criteri di progettazione che sono stati adoperati per la realizzazione del *Source-Meter programmabile* e del software di controllo verranno illustrati nei capitoli successivi.

### 1.1 Il sistema di caratterizzazione

Il sistema per la caratterizzazione dei dispositivi elettroluminescenti, di seguito descritto, è rappresentato nella figura 1.1. Esso è costituito da una parte *hardware*, addetta al pilotaggio e dell'acquisizione delle grandezze caratteristiche del dispositivo da caratterizzare, e da una parte *software*, realizzata in LabVIEW™, che si occupa della gestione e del coordinamento di tutte le operazioni. Per interfacciare il *Source-Meter programmabile*, da qui in poi indicato con *S-M*, con il calcolatore si utilizza la scheda *DAQ NI USB-6009* della NATIONAL INSTRUMENTS™.

Il sistema realizzato consente all'utente di effettuare le seguenti operazioni:

1. il tracciamento della caratteristica  $V-I$ ;
2. il salvataggio su file dei valori delle grandezze caratteristiche.

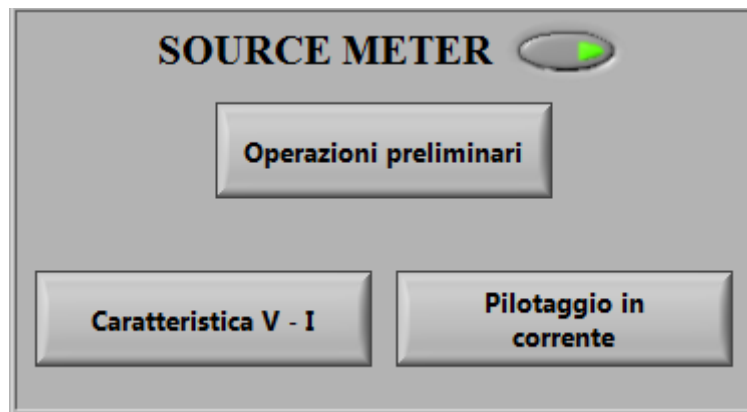


**Figura 1.1:** Schema del sistema di caratterizzazione

Attraverso il software è possibile configurare il tipo di pilotaggio (*tensione o corrente*) del dispositivo da caratterizzare. Nella modalità di pilotaggio in tensione il S-M genera una successione di gradini ad ampiezza crescente; la differenza di ampiezza tra un gradino e il successivo dipende dal numero di livelli e dal valore del fondo scala, selezionati dall'utente tramite l'interfaccia software, ed ha un valore minimo di 3.66 mV. Inoltre è possibile selezionare il range di corrente da analizzare (cfr. paragrafo 2.2 a pagina 20). Nel pilotaggio in corrente (cfr. paragrafo 2.3 a pagina 26) l'utente può scegliere se pilotare con una corrente costante o variabile. Alla fine dell'acquisizione, a prescindere dal tipo di pilotaggio scelto, è possibile salvare i valori delle grandezze caratteristiche acquisite ed opportunamente manipolate su un file di testo.

## 1.2 Operazioni preliminari

La prima operazione da effettuare per eseguire una caratterizzazione è il collegamento dei vari componenti del sistema. Si consiglia di collegare prima i terminali della scheda *NI USB-6009* ai relativi terminali presenti nel pannello frontale del *S-M* e successivamente collegare la scheda al computer attraverso il cavo USB. Il passo conclusivo è quello di inserire il dispositivo da analizzare, rispettando opportunamente la polarità indicata sui terminali del *S-M*. Dopo aver effettuato tutte le connessioni, aprire il software di controllo (figura 1.2).



**Figura 1.2:** Menu principale

Considerato che la scheda di acquisizione in dotazione può acquisire valori di tensione fino ad un massimo di 10 V (cfr. paragrafo 2.1 a pagina 15) e che il fondo scala per il pilotaggio in tensione è di 12 V, sono stati realizzati dei partitori resistivi per ridurre il valore di tensione massima agli ingressi analogici della scheda. Quest'ultima, inoltre, non è in grado di acquisire direttamente valori di corrente, quindi

per ottenere la corrente che scorre nel dispositivo da caratterizzare si è pensato di convertire a livello hardware la corrente in una tensione attraverso un convertitore  $I-V$ ; successive manipolazioni a livello software consentono di ricavare dalla tensione la corrente interessata. Al fine di poter eseguire il suddetto procedimento la conoscenza dei valori di determinate resistenze del circuito è fondamentale poiché necessari per la ricostruzione delle grandezze effettive. Dal menù principale del software, cliccando su *Operazioni preliminari* è possibile effettuare la taratura delle resistenze del  $S-M$ . Questo passo non è obbligatorio poiché sono stati memorizzati di default i valori delle resistenze al momento del montaggio (figura 1.3). Ai capi di

The screenshot shows a software window titled "Valori di default per le resistenze in kOhm". It contains the following fields and buttons:

- Resistenza serie:** Input field with value 0,1.
- Anodo - AI0:** Input field with value 1.
- Catodo - AI1:** Input field with value 1,8.
- AI2:** Input field with value 1,8.
- Resistenza misurazione corrente - AI2:** A group of three input fields:
  - R5: 0,1
  - R6: 1
  - R7: 10
  - R8: 100
  - R9: 1000
  - R10: 10000
- Buttons:** "Taratura" and "Torna al menù principale".

**Figura 1.3:** Valori di default per le resistenze

ogni resistenza da tarare, opportunamente indicata all'interno del  $S-M$ , sono stati posizionati dei ponticelli che consentono di disconnettere la resistenza in questione dal resto del circuito in modo tale da poterne misurare il valore con l'ausilio di un multimetro. Per modificare il valore di una resistenza all'interno del software cliccare sul tasto *Taratura* (figura 1.3) e inserire il nuovo valore nell'apposito campo (i valori di tutte le resistenze devono essere inseriti in  $k\Omega$ ). Alla fine della taratura è

necessario cliccare sul tasto *Salva* in modo tale che il software memorizzi i nuovi valori per le resistenze (figura 1.4). Dopo il salvataggio dei nuovi valori delle resistenze è sufficiente cliccare su *Torna al menù principale* per iniziare una caratterizzazione.

**Taratura Resistenze in kOhm**

Resistenza serie  
0,1

Anodo - AI0      Catodo - AI1      AI2

R1      R3      R11  
1      1      1

R2      R4      R12  
1,8      1,8      1,8

Resistenza misurazione corrente - AI2

R5      R6      R7  
0,1      1      10

R8      R9      R10  
100      1000      10000

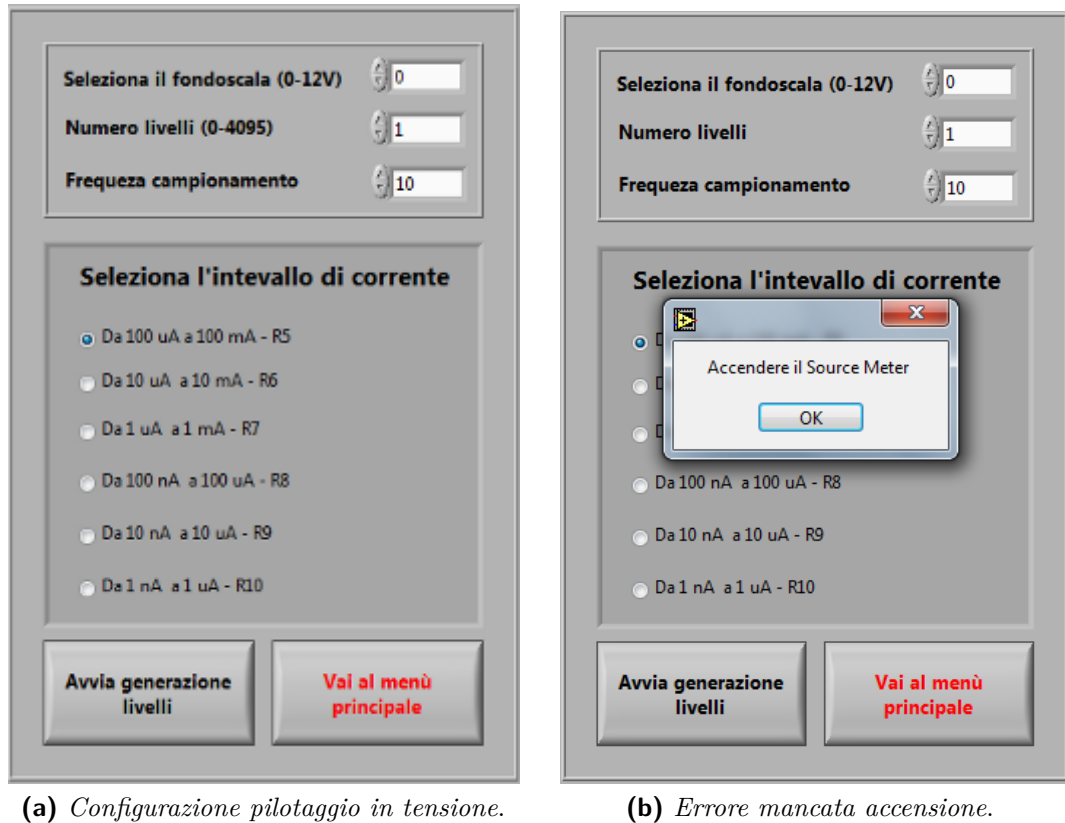
Salva

**Figura 1.4:** Taratura resistenze

### 1.3 Caratterizzazione elettrica $V-I$

Prima di avviare la fase di caratterizzazione è necessario accendere il *S-M*. A questo punto è possibile scegliere tra *Caratteristica  $V-I$* , che corrisponde al pilotaggio in tensione, o *Pilotaggio in corrente* (figura 1.2 a pagina 2). Questa distinzione è stata fatta poiché il pilotaggio in corrente non consente di esplorare la caratteristica per bassi valori di corrente. Cliccando su *Caratteristica  $V-I$* , automaticamente si apre un pannello per la configurazione della caratterizzazione (figura 1.5a). Il software, prima di iniziare una nuova fase di caratterizzazione, verificherà se il sistema è

pronto, indicando eventualmente attraverso un messaggio di errore di accendere il *S-M* (figura 1.5b). In questo caso si deve accendere il *S-M* e cliccare su *OK* per poter passare alla fase di configurazione (figura 1.5a). Come primo passo è



**Figura 1.5:** Configurazione pilotaggio in tensione (a) e verifica accensione *S-M* (b)

opportuno scegliere il fondo scala di pilotaggio del dispositivo, che può essere un valore compreso tra 0 e 12V. Successivamente si imposta il numero di livelli della gradinata di tensione, considerando che l'ampiezza  $A_l$  del singolo livello è data dalla seguente relazione:

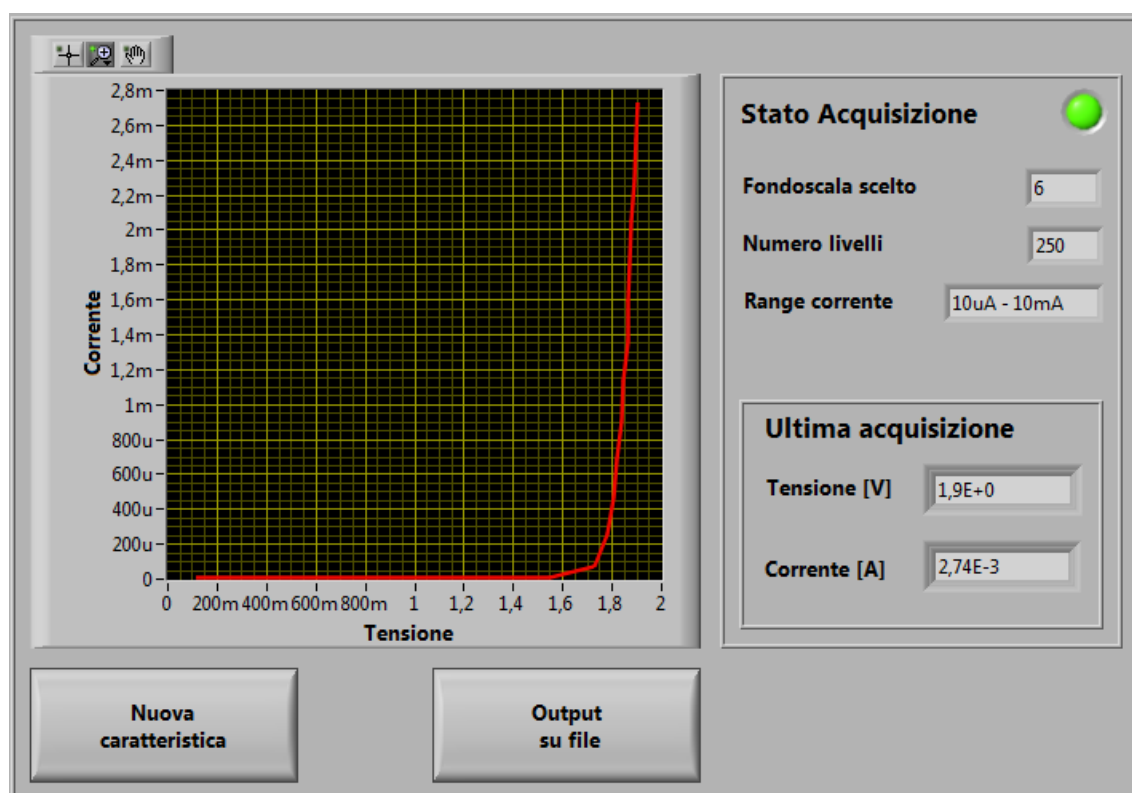
$$A_l = \frac{V_{fs}}{N_l}$$

dove si è indicato con  $V_{fs}$  il valore di fondo scala scelto e con  $N_l$  il numero di livelli. Si ricorda che la minima ampiezza del singolo gradino vale 3.66mV.

La frequenza di campionamento indica il numero di campioni che la scheda acquisisce in un secondo ed ha un valore di default pari a 10. Per esplorare con precisione una zona limitata della caratteristica è possibile selezionare uno dei seguenti range di corrente:

- 100  $\mu\text{A}$  - 100 mA
- 10  $\mu\text{A}$  - 10 mA
- 1  $\mu\text{A}$  - 1 mA
- 100 nA - 100  $\mu\text{A}$
- 10 nA - 10  $\mu\text{A}$
- 1 nA - 1  $\mu\text{A}$

Terminata la fase di configurazione basta cliccare su *Avvia generazione livelli* e automaticamente si aprirà la finestra rappresentata nella figura 1.6. A questo punto il *S-M* genera la gradinata di pilotaggio del dispositivo e contemporaneamente vengono acquisiti i valori che, opportunamente manipolati a livello software, consentono di ricostruire le grandezze caratteristiche.

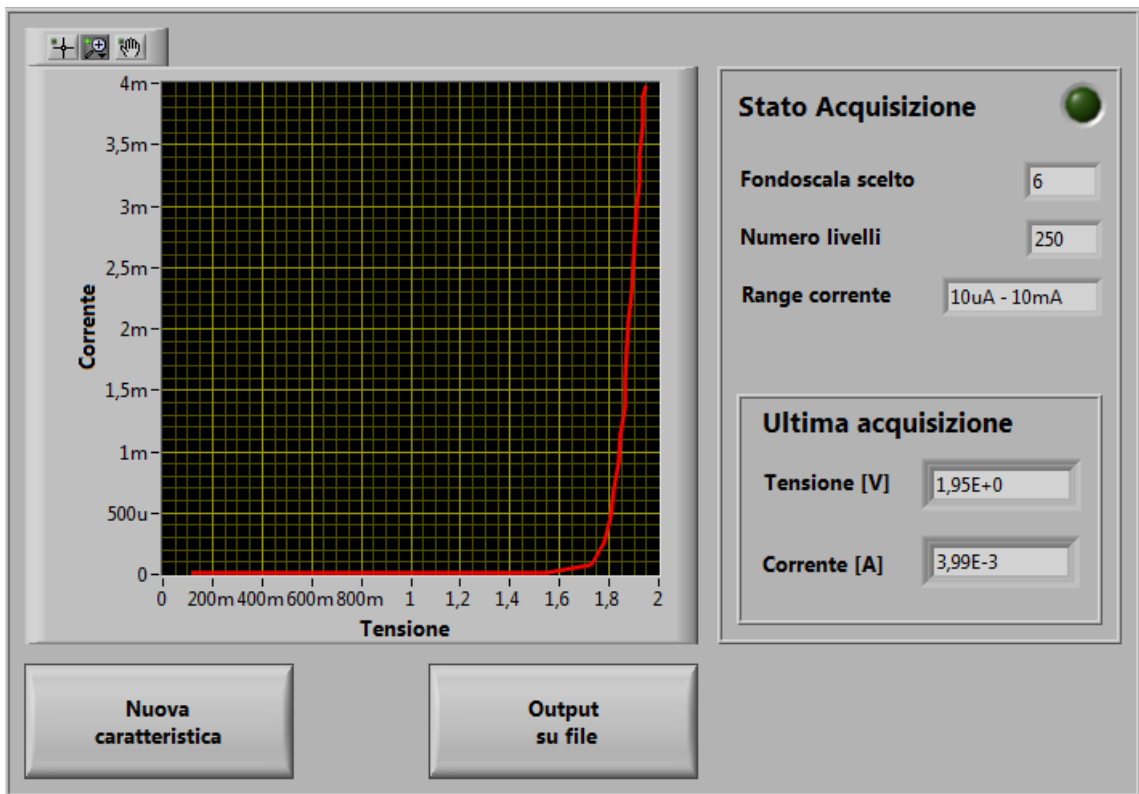


**Figura 1.6:** Tracciamento caratteristica e acquisizione

Nella parte sinistra della finestra è visibile la *Caratteristica tensione-corrente* del dispositivo, in cui la tensione ai capi del dispositivo da caratterizzare è rappresentata lungo l'asse delle ascisse mentre la corrente è rappresentata lungo l'asse delle ordinate. La scala di entrambi gli assi viene aggiornata automaticamente in base al valore corrente; in questo modo l'utente ha subito un'idea delle grandezze in gioco, specialmente nella parte iniziale della caratteristica. Nella parte destra della finestra una *spia* circolare (indicatrice dello "Stato di Acquisizione") segnala lo stato attuale

del sistema (figura 1.6). Quando è accesa significa che l'acquisizione è in corso e che quindi non si può eseguire alcuna operazione. Sotto la spia sono presenti delle caselle che riassumono la configurazione scelta. Nel riquadro *Ultima acquisizione* è possibile osservare il valore corrente delle grandezze caratteristiche.

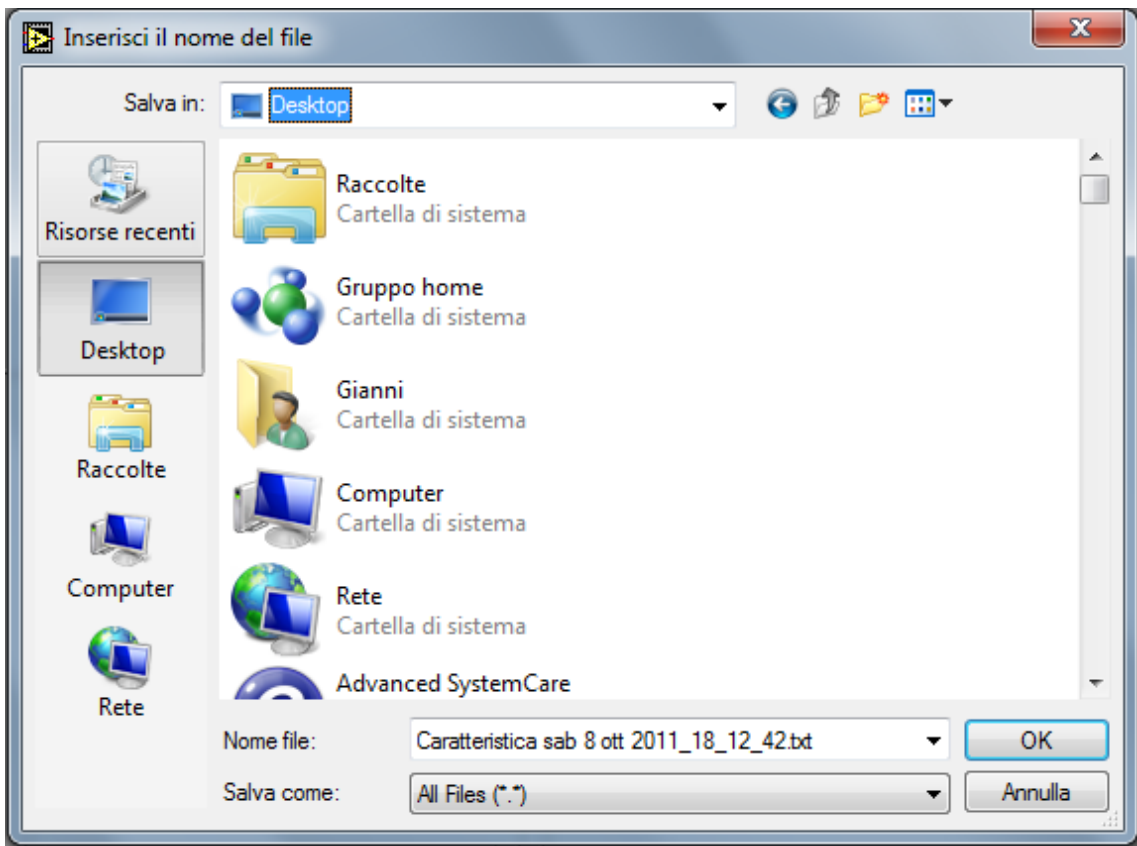
Una volta terminata la fase di acquisizione e tracciamento della caratteristica, segnalata dallo spegnimento della *spia* (figura 1.7), il sistema è pronto ad effettuare il salvataggio su file delle grandezze caratteristiche o ad effettuare una nuova caratterizzazione. Se si sceglie di cliccare sul tasto *Nuova caratteristica* il software chiude



**Figura 1.7:** Fine acquisizione

la finestra corrente e rimanda l'utente alla finestra di configurazione (figura 1.5 a pagina 5) che presenta gli stessi valori dell'ultima caratterizzazione salvati in memoria dal software. In questo caso i valori delle grandezze caratteristiche non potranno più essere recuperati. Se, viceversa, l'utente clicca sul tasto *Output su file* si aprirà una "finestra di dialogo" che consente all'utente di specificare nome e percorso di salvataggio del file contenente le grandezze caratteristiche (figura 1.8). Il sistema attribuisce al file un nome di default dinamico così composto:

**Caratteristica + data + ora.txt**



**Figura 1.8:** Salvataggio dati su file

in questo modo si evita di sovrascrivere i file relativi a caratterizzazioni precedenti. Dopo il salvataggio del file il software riporta l'utente alla finestra di configurazione del pilotaggio in tensione (figura 1.5a a pagina 5). A questo punto l'utente può scegliere se effettuare una nuova caratteristica o cliccare su *Vai al menù principale* (figura 1.2 a pagina 2).

## 1.4 Pilotaggio in corrente

Cliccando sul tasto *Pilotaggio in corrente* presente nel menù principale (figura 1.2 a pagina 2) il software verificherà se il sistema è pronto, indicando eventualmente attraverso un messaggio di errore di accendere il *S-M* (figura 1.9). Per proseguire è necessario accendere il *S-M* e successivamente cliccare su *OK*. Superata la verifica del sistema si aprirà il pannello di configurazione per il pilotaggio in corrente (figura 1.10). In questo pannello sono presenti due riquadri: *Pilotaggio con corrente costante* e *Pilotaggio con corrente variabile*. È possibile avviare un



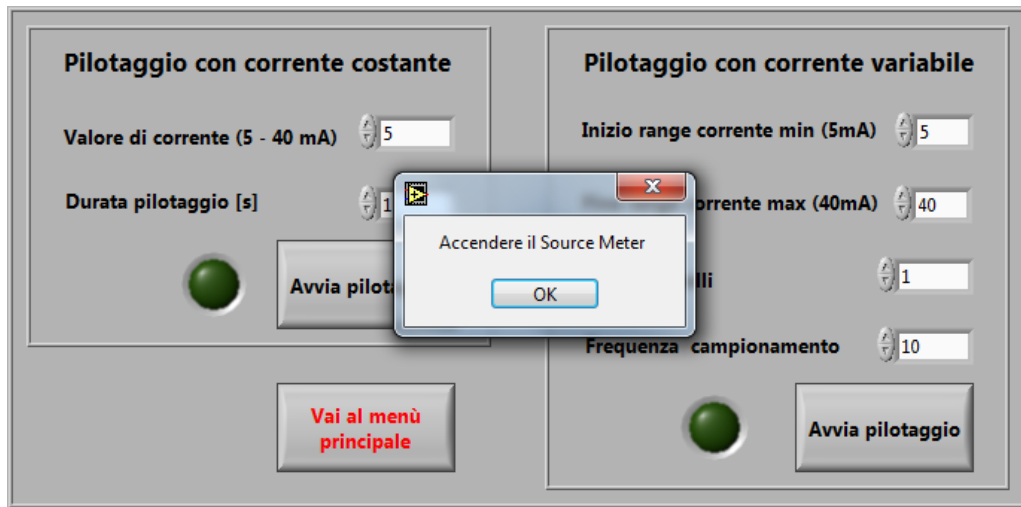


Figura 1.9: Errore mancata accensione



Figura 1.10: Configurazione pilotaggio in corrente

solo tipo di pilotaggio per volta. Le *spie* di segnalazione posizionate accanto ai tasti *Avvia pilotaggio* indicano se uno dei due pilotaggi è avviato. Nella figura 1.10 entrambe le *spie* di segnalazione sono spente; questo significa che è possibile avviare una delle due tipologie di pilotaggio in corrente. Nel riquadro relativo al pilotaggio con corrente costante è possibile configurare il valore di corrente di pilotaggio (valore compreso tra 5 e 40 mA) e la durata, espressa in secondi, del pilotaggio. Dopo la configurazione, cliccando su *Avvia pilotaggio* si accenderà la *spia* di segnalazione (figura 1.11) e automaticamente si aprirà la finestra di acquisizione (figura 1.12). Il *S-M* genera la corrente di pilotaggio scelta e contemporaneamente vengono acquisiti

i valori che, opportunamente manipolati a livello software, consentono di ricostruire le grandezze caratteristiche.

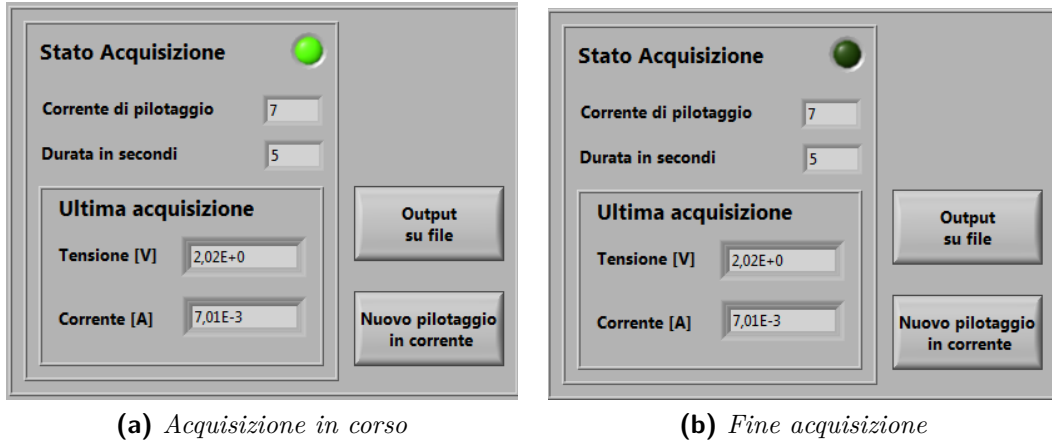


**Figura 1.11:** Pilotaggio con corrente costante avviato

Nella parte sinistra della finestra di acquisizione una *spia* di segnalazione, come visto già nel caso del pilotaggio in tensione (cfr. paragrafo 1.3 a pagina 6), segnala lo stato attuale del sistema: quando è accesa significa che l'acquisizione è in corso e che, quindi, non si può eseguire alcuna operazione. Sotto la spia sono presenti delle caselle che riassumono la configurazione scelta. Nel riquadro *Ultima acquisizione* è possibile osservare il valore corrente delle grandezze caratteristiche. Terminata la fase di acquisizione, segnalata dallo spegnimento della spia, il sistema è pronto ad effettuare il salvataggio su file delle grandezze caratteristiche o ad effettuare un nuovo pilotaggio in corrente.

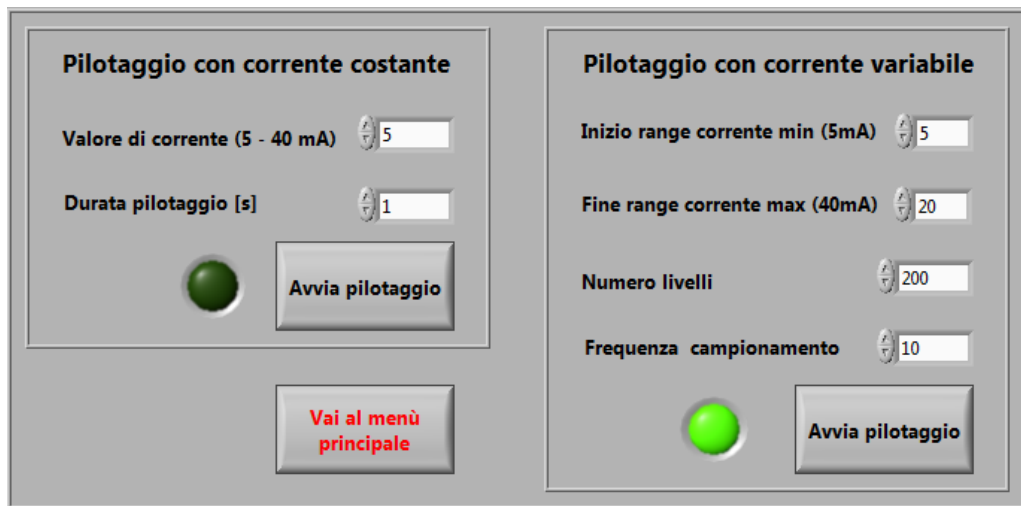
Se si sceglie di cliccare sul tasto *Nuovo pilotaggio in corrente* il software rimanda l'utente (chiudendo la finestra corrente) alla finestra di configurazione (figura 1.10) che presenta gli stessi valori dell'ultimo pilotaggio salvati in memoria dal software. In questo caso i valori delle grandezze caratteristiche non potranno più essere recuperati. Se, viceversa, l'utente clicca sul tasto *Output su file* si aprirà una "finestra di dialogo" che consente all'utente di specificare nome e percorso di salvataggio del file contenente le grandezze caratteristiche, come già discusso nel paragrafo 1.3 a pagina 7.

Tramite la finestra relativa al pilotaggio con corrente variabile (figura 1.10) è possibile configurare il range di corrente di pilotaggio inserendo i valori desiderati nelle caselle *inizio range corrente* e *fine range corrente*. La finestra consente anche di scegliere il numero di livelli, ossia il numero di valori di corrente che il *S-M* genera per coprire l'intero range, numero vincolato dal fatto che l'ampiezza minima teorica



**Figura 1.12:** Stato acquisizione pilotaggio a corrente costante

del singolo passo è di  $12.2 \mu\text{A}$ , e infine la frequenza di campionamento. Una volta terminata la configurazione, cliccando su *Avvia pilotaggio* si accenderà la *spia* di segnalazione (figura 1.13) e automaticamente si aprirà la finestra di acquisizione (figura 1.14). A questo punto il *S-M* genera la gradinata di livelli di corrente e contemporaneamente vengono acquisiti i valori che, opportunamente manipolati a livello software, consentono di ricostruire le grandezze caratteristiche.

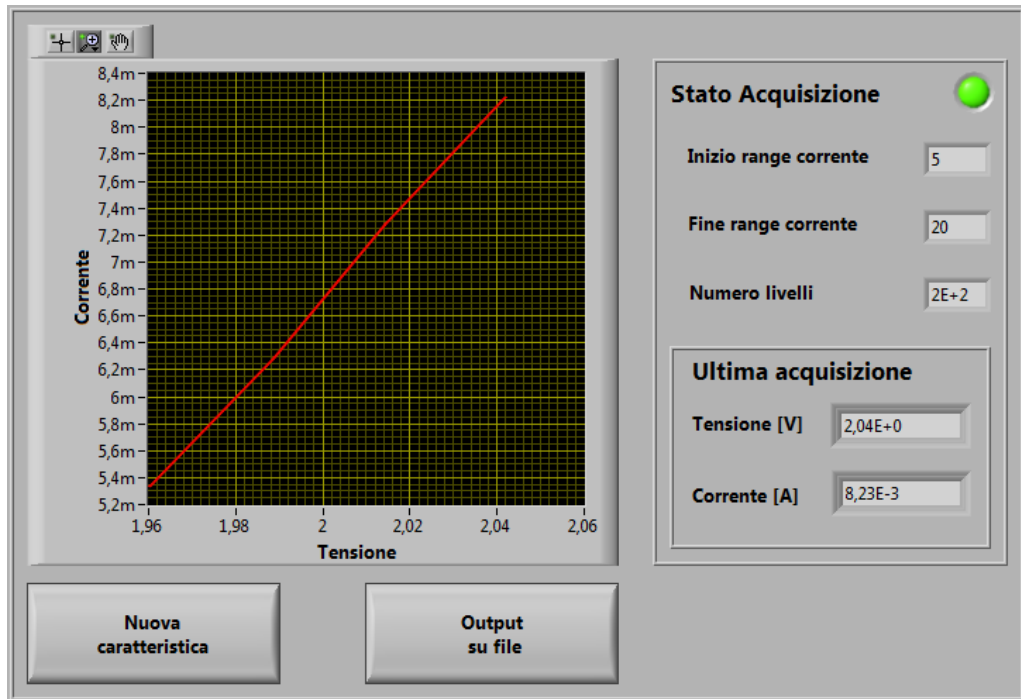


**Figura 1.13:** Pilotaggio con corrente variabile avviato

Questa finestra è molto simile a quella già illustrata nel paragrafo 1.3 a pagina 7, l'unica differenza sta nel riepilogo sulla configurazione utilizzata. Anche in questo caso, prima di poter effettuare una nuova fase di pilotaggio o salvare le grandezze

caratteristiche su file, è necessario attendere la fine dell'acquisizione, segnalata dallo spegnimento della *spia* posizionata accanto a *Stato Acquisizione*.

La caratteristica di figura 1.14 è di un *LED rosso* che presenta una tensione di soglia di circa 1,7V. Con la configurazione utilizzata il *LED* pilotato si trova già in fase di conduzione: la caratteristica di figura 1.14, infatti, rappresenta il classico tratto (quasi rettilineo) della caratteristica dei *LED* la cui tensione ai capi è maggiore della tensione di soglia.



**Figura 1.14:** Acquisizione pilotaggio con corrente variabile

## 1.5 Struttura dei file

Nei precedenti paragrafi è stata illustrata la procedura per il salvataggio su file delle grandezze caratteristiche del dispositivo che si intende caratterizzare. In questo paragrafo verranno illustrate le differenze dei file di testo in base al tipo di pilotaggio scelto. Il contenuto dei file può essere diviso in due parti, nello specifico:

1. riepilogo configurazione;
2. valori delle grandezze caratteristiche.

Il riepilogo della configurazione è utile per comprendere al meglio i valori ricavati da una caratterizzazione, considerato che la consultazione del file può avvenire a distanza di tempo dal momento della misurazione. Le informazioni sulla configurazione vengono automaticamente inserite nel file dal software realizzato e in maniera dinamica in base al tipo di configurazione scelta (cfr. paragrafo 3.8 a pagina 56). La prima riga contiene la sola stringa “Configurazione:” e segnala l’inizio del riepilogo della configurazione. Questa riga è comune per tutti i file. La seconda riga indica il tipo di pilotaggio scelto. In base al tipo di pilotaggio scelto, le righe comprese tra la terza e la quinta contengono informazioni sul tipo di configurazione utilizzata relativa al pilotaggio scelto.

Nel caso di pilotaggio in tensione (figura 1.15) queste righe indicano, rispettivamente, i seguenti parametri di configurazione:

- valore del fondo scala;
- numero di livelli;
- range di corrente scelto.

```

1 Configurazione:
2 Pilotaggio in tensione
3 Fondoscala 6,0V
4 Numero livelli: 250
5 Range corrente scelto: 10uA - 10mA
6
7 Acquisizione
8 V (Volt)      I (Ampere)    P (Watt)
9 0,000E+0      0,000E+0      0,000E+0
10 3,340E-1      9,698E-6      3,239E-6
11 5,790E-1      1,089E-5      6,304E-6
12 8,137E-1      1,168E-5      9,506E-6
13 1,056E+0      1,129E-5      1,191E-5

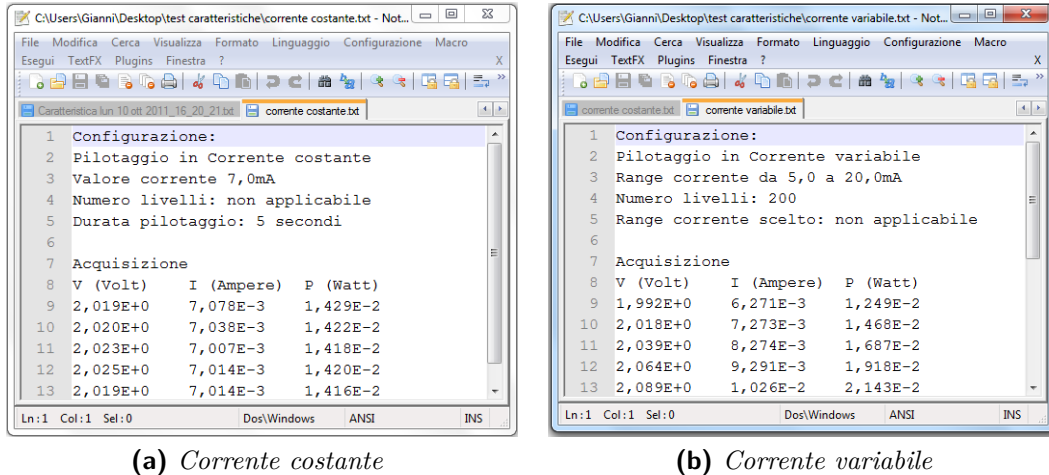
```

**Figura 1.15:** File per il pilotaggio in tensione

Nel caso, invece, di pilotaggio con corrente costante (figura 1.16a) le righe da 3 a 5 indicano, rispettivamente, i seguenti parametri di configurazione:

- valore corrente di pilotaggio;
- numero di livelli (non applicabile in questo caso);

- durata pilotaggio.



**Figura 1.16:** File per i pilotaggi in corrente

Nel caso, infine, di pilotaggio con corrente variabile (figura 1.16b) le suddette righe indicano, rispettivamente, i seguenti parametri di configurazione:

- range corrente di pilotaggio;
- numero di livelli;
- range di corrente scelto (non applicabile in questo caso).

La riga *Acquisizione*, comune a tutti i file, segnala l'inizio della seconda parte del file che contiene i valori, acquisiti e manipolati a livello software, relativi alle grandezze caratteristiche del dispositivo. Questi valori sono disposti su tre colonne che rappresentano rispettivamente:

1. la tensione ai capi del dispositivo;
2. la corrente che scorre attraverso;
3. la potenza elettrica assorbita dal dispositivo.

Per la lettura dei file è stato utilizzato l'editor Notepad++ rilasciato sotto licenza *GPL* e scaricabile dal sito <http://notepad-plus-plus.org/>. È comunque possibile leggere i file di testo con qualsiasi editor di testo, come il *Blocco Note* presente nei sistemi operativi *Microsoft*.

# Capitolo 2

## L'hardware

In questo capitolo viene descritto il sistema di misura da un punto di vista *hardware* che, come vedremo, è legato al software di controllo realizzato e alle caratteristiche della scheda di interfacciamento *NI USB-6009*. Inizialmente, quindi, si descriveranno brevemente le caratteristiche della scheda per passare poi alla descrizione del circuito realizzato, con riferimento alle funzioni da svolgere (pilotaggio in tensione o in corrente). Sarà illustrato, infine, il circuito completo del *S-M*.

### 2.1 Scheda di acquisizione *NI USB-6009*

La scheda *DAQ NI USB-6009* [1] della NATIONAL INSTRUMENTS<sup>TM</sup> è un sistema di acquisizione e condizionamento di segnali versatile e a basso costo. In particolare sono disponibili:

- 8 canali di ingresso analogico (*AI*);
- 2 canali di uscita analogica (*AO*);
- 12 canali di ingresso/uscita digitale (*DIO*);
- 1 contatore a 32 bit (*PFI0*);
- 2 riferimenti di tensione (+2.5 V, +5 V).

La scheda è mostrata in figura 2.1. Sono visibili i morsetti per il collegamento dei cavi ai vari canali e l'ingresso per il cavo di alimentazione *USB*. A fianco di quest'ultimo è visibile un *LED* di stato di colore verde che, quando lampeggiante, segnala che la scheda è alimentata.

In figura 2.2 è riportato lo schema a blocchi della scheda *DAQ*. La programmazione del *microcontrollore*, che gestisce tutte le operazioni di input/output, viene



Figura 2.1: Scheda DAQ NI USB-6009

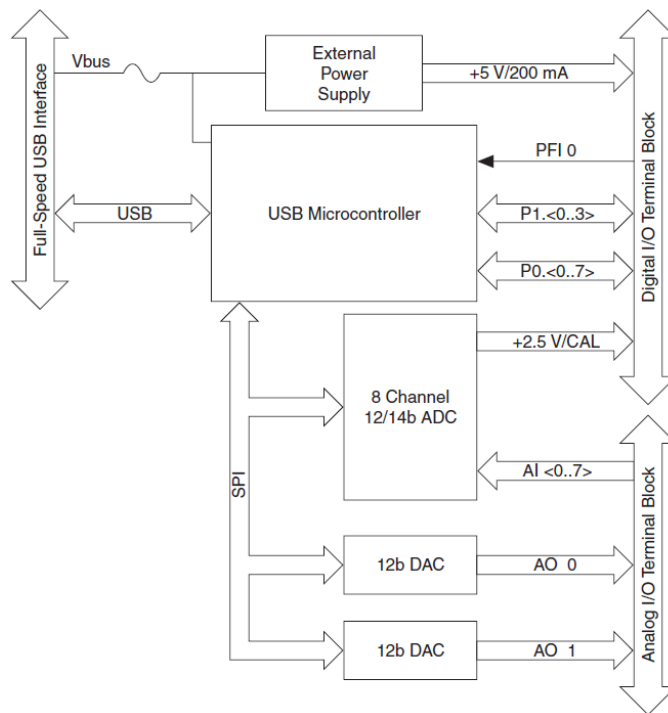


Figura 2.2: Schema a blocchi DAQ NI USB-6009

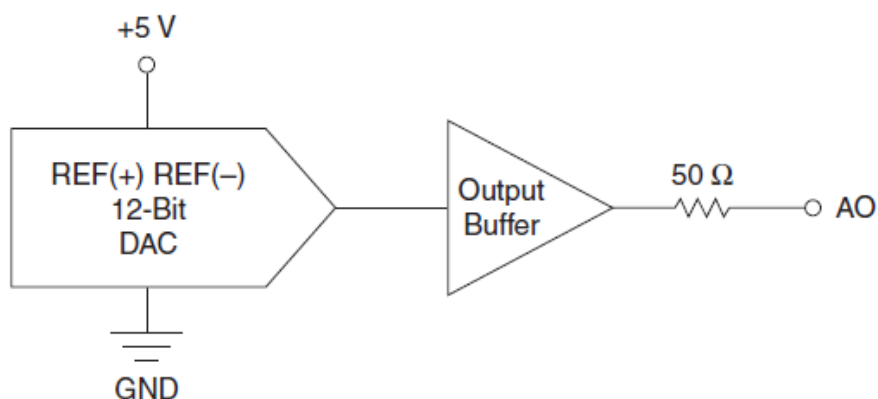


effettuata da calcolatore tramite *l'ambiente di sviluppo integrato* LabVIEW<sup>TM</sup>. Per una breve introduzione a LabVIEW<sup>TM</sup> si consulti il paragrafo 3.1 a pagina 32. Nello schema a blocchi sono presenti due convertitori *digitale-analogico* (*DAC*) per i due canali di uscita analogica ed un convertitore *analogico-digitale* (*ADC*) per i canali di ingresso analogico. Nella figura 2.3 è possibile osservare i terminali esterni per la connessione. I terminali per i segnali analogici sono disposti lungo il lato sinistro della scheda mentre quelli digitali sono disposti sul lato destro.

GND	AI0	AI4	GND	AI1	AI5	GND	AI2	AI6	GND	AI3	AI7	GND	AO0	AO1	GND
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ANALOG ↑								↓ DIGITAL							
32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17
GND	+5V	+2.5V	PF10	P1.3	P1.2	P1.1	P1.0	P0.7	P0.6	P0.5	P0.4	P0.3	P0.2	P0.1	P0.0

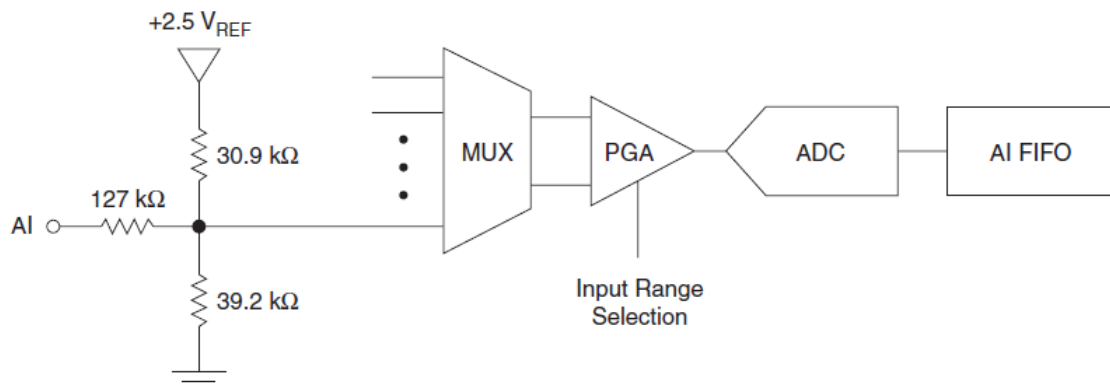
**Figura 2.3:** Terminali *DAQ NI USB-6009*

Le due uscite analogiche indicate con *AO0* e *AO1* sono in grado di generare singolarmente segnali di tensione nel range  $[0,5\text{V}]$  in riferimento alla massa del sistema e di erogare una corrente massima di 5 mA. Ogni singolo canale è formato da un *DAC* a 12 bit e da un buffer di uscita per l'adattamento delle impedenze, che presenta un'impedenza di uscita di  $50\ \Omega$  (figura 2.4). La risoluzione teorica della singola uscita analogica della scheda vale 1.22 mV; il costruttore, inoltre, indica un'accuratezza tipica di 7 mV. Da misure effettuate si è notato che l'accuratezza dello strumento varia in funzione del valore di tensione che si intende generare. Per valori considerevoli di tensione, dell'ordine del volt, si è osservato che l'errore di generazione si ripete in maniera "costante". Si è pensato quindi di correggere questo errore a livello software.



**Figura 2.4:** Circuiteria della singola uscita analogica

Gli otto canali di ingresso analogico indicati con  $\langle AI0 \dots AI7 \rangle$  possono essere configurati in modo da effettuare misure differenziali tra due canali o misure riferite a massa (*RSE - Reference Single Ended*). In entrambi i casi la massima tensione applicabile per ogni canale rispetto alla massa è di  $\pm 10$  V. A differenza delle uscite



**Figura 2.5:** Circuiteria ingressi analogici

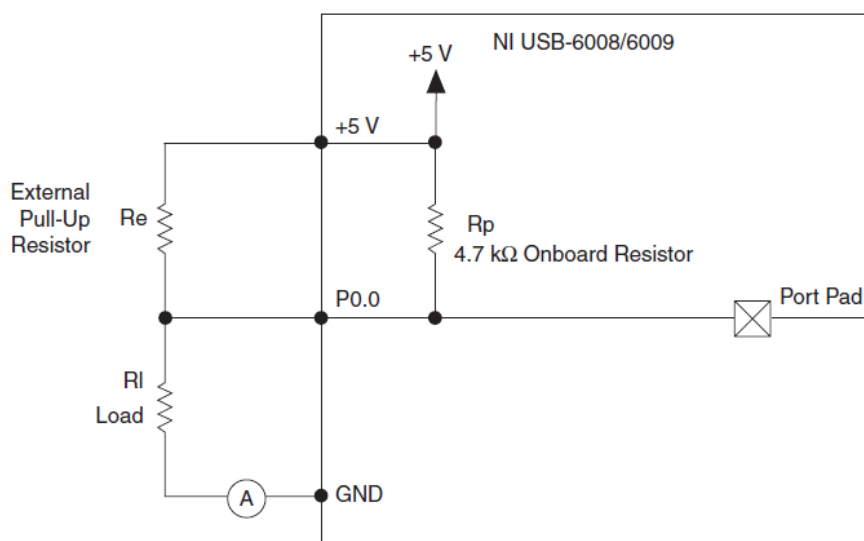
analogiche che hanno un *DAC* dedicato per ogni canale, gli ingressi analogici hanno un unico *ADC* condiviso per tutti i canali. Ogni canale di ingresso è munito di protezione da sovratensione, fino ad un massimo di 35 V. Il *MUX* determina di volta in volta quale ingresso trasferire al blocco successivo (figura 2.5). Il terzo blocco, *PGA*, è un amplificatore a guadagno programmabile. Il fattore di amplificazione viene determinato automaticamente in base al range di variazione del segnale di ingresso (impostato via software); nel caso di misure riferite a massa (come quelle effettuate in questo lavoro di tesi), il fattore è sempre unitario. La risoluzione del convertitore *analogico-digitale* vale 14 bit nel caso di misure differenziali e 13 bit nel caso di misure riferite a massa. In questo lavoro di tesi sono state effettuate acquisizioni riferite a massa e con range 0 – 10 V; con queste impostazioni si ha una risoluzione teorica di 1.22 mV  $[10/(2^{13} - 1)]$ . Il blocco *AI FIFO* è incaricato alla memorizzazione dei dati durante l'acquisizione, adotta una politica di tipo *first in first out* e ha una capacità di 512 byte.

La scheda mette a disposizione 12 canali digitali programmabili singolarmente come ingresso o uscita e con livelli logici *TTL*. La figura 2.6 mostra i terminali riservati ai canali digitali. Come si può osservare i canali digitali sono distribuiti su due

32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17
GND	+5V	+2.5V	PF.10	P1.3	P1.2	P1.1	P1.0	P0.7	P0.6	P0.5	P0.4	P0.3	P0.2	P0.1	P0.0

**Figura 2.6:** Terminali ingressi/uscite digitali *DAQ NI USB-6009*

porte  $P0 <0...7>$  e  $P1 <0...3>$ . Questa separazione può essere utile in quanto è possibile programmare a livello software l'intera porta interessata ottenendo un *byte* per la porta  $P0$  e un *nibble* per la porta  $P1$ . Esistono due tipi di programmazione per le uscite digitali: *push-pull* e *open-drain*. In entrambi i casi la massima corrente che ogni singola linea può sopportare senza danneggiarsi è  $\pm 8.5$  mA. Quindi nel caso di uscita di tipo *push-pull* è possibile pilotare direttamente un carico a patto che la corrente massima sia inferiore a 8.5 mA. Nel caso di uscita *open-drain* la resistenza di *pull-up* interna alla scheda di valore  $4.7\text{ k}\Omega$  (figura 2.7) limita la corrente di pilotaggio di un eventuale carico a 1.06 mA. Se il carico dovesse richiedere un assor-



**Figura 2.7:** Uscita *open-drain* con resistenza di *pull-up* esterna

bimento di corrente maggiore di 1.06 mA allora è necessario ricorrere ad uno schema di collegamento come quello indicato in figura 2.7, dove si inserisce una opportuna resistenza di *pull-up* esterna per aumentare la corrente di pilotaggio. Si ricorda che la scelta di  $R_e$  è critica, poiché la massima corrente che la linea può sopportare senza danneggiarsi vale sempre  $\pm 8.5$  mA.

Quando il cavo di connessione del terminale di un canale digitale programmato per essere utilizzato come ingresso è lasciato flottante, il livello logico letto da un'eventuale acquisizione è alto.

Quando si collega la scheda al calcolatore, o la si resetta per qualche motivo, tutti i canali digitali sono configurati come ingressi ad alta impedenza. In questo stato è comunque presente una debole corrente dovuta al circuito di *pull-up* interno della scheda. Questo comportamento può risultare innocuo in alcune applicazioni ma non trascurabile in altre.

## 2.2 Pilotaggio in tensione

In figura 2.8 è rappresentato lo schema circuitale per il pilotaggio in tensione. È possibile separare l'analisi del circuito in una parte analogica e una digitale. La parte analogica si occupa del pilotaggio del *LED* e dell'adattamento o conversione dei segnali relativi alle grandezze caratteristiche che si intendono misurare. La parte digitale si occupa invece di gestire la selezione del range di corrente da esplorare (cfr. paragrafo 1.3 a pagina 5).

La tensione di pilotaggio è ottenuta dall'uscita analogica *AO1* della scheda *NI USB-6009*. Poiché la tensione di fondo scala è pari a 12 V e che l'uscita analogica può generare fino a 5 V, è necessario l'utilizzo di un amplificatore di tensione. Inoltre la massima corrente erogabile dall'uscita analogica in tensione della scheda (cfr. paragrafo 2.1) vale 5 mA. Quindi in caso di pilotaggio diretto tale valore non sarebbe sufficiente a far accendere un *LED*, ottenendo una limitata esplorazione della caratteristica.

L'amplificatore operazionale *IC1*, utilizzato per amplificare la tensione di uscita della scheda, deve essere in grado di fornire almeno 12 V di tensione in uscita ed un adeguato valore di corrente, dell'ordine delle decine di mA. Per questo scopo è stato scelto l'amplificatore operazionale *MC33076P1* della *Motorola*<sup>1</sup>. Quest'ultimo è un operazionale bipolare con alimentazione duale (massimo  $\pm 18$  V), la cui corrente di uscita può arrivare fino a 250 mA. L'amplificatore di tensione realizzato è in configurazione non invertente con guadagno dato dalla seguente relazione [2]:

$$\frac{V_{out}}{V_s} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.1)$$

dove si è indicato con  $V_{out}$  e con  $V_s$  le tensioni rispettivamente, di uscita e ai capi dell'ingresso non invertente dell'operazionale. Per ottenere un fondo scala di pilotaggio di 12 V è stato scelto come guadagno dell'amplificatore un valore pari a 3, scelta che unita alla relazione 2.1 fissa il rapporto  $R_2/R_1$  pari a 2. La gestione del pilotaggio è affidata al software di controllo realizzato (cfr. paragrafo 3.4 a pagina 44).

Come già discusso nel paragrafo 2.1, la massima tensione applicabile ad un ingresso analogico della scheda non può superare in modulo 10 V; è quindi necessario, visto che il fondo scala è stato fissato 12 V, adattare i segnali da acquisire per evitare di distruggere la scheda. Ai capi del *LED* (figura 2.8) sono stati collegati dei buffer, *IC2* e *IC3*, che prelevano la tensione ai capi del dispositivo senza caricare il circuito. All'uscita di ogni buffer è stato inserito un opportuno partitore resistivo che riduce la tensione che arriva ai canali analogici *AI0* e *AI1*.

---

<sup>1</sup>Le caratteristiche tecniche di questo componente e dei prossimi a cui si farà riferimento sono riportate nell'appendice A a pagina 74.

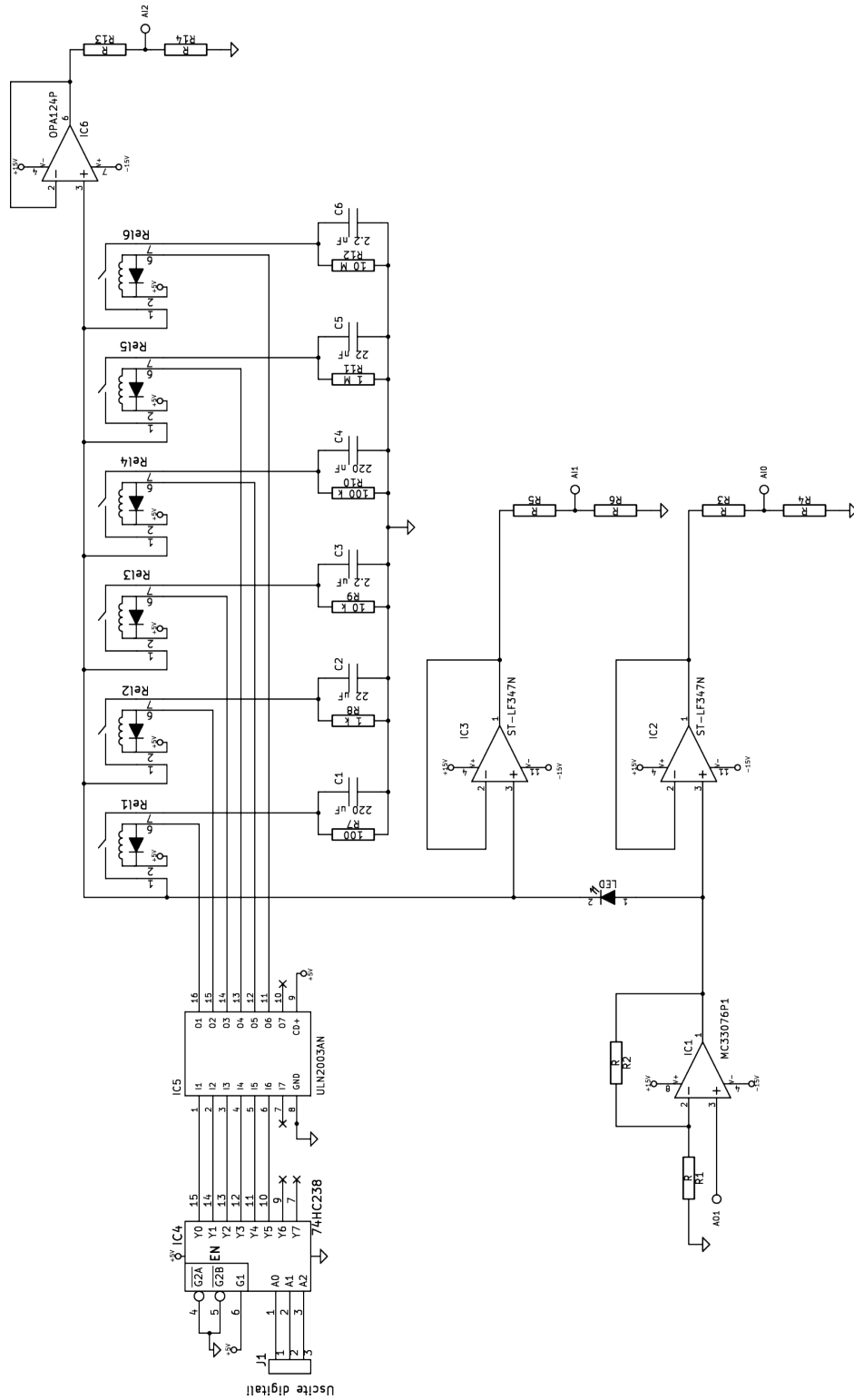
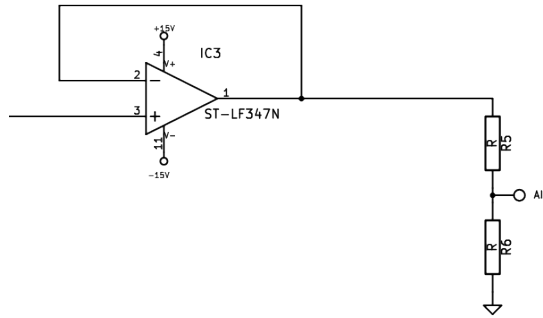


Figura 2.8: Schema elettrico del circuito di pilotaggio in tensione



**Figura 2.9:** Protezione ingressi analogici scheda *NI USB-6009*

La tensione ai capi del terminale *AI0* (figura 2.9) è data dalla seguente relazione:

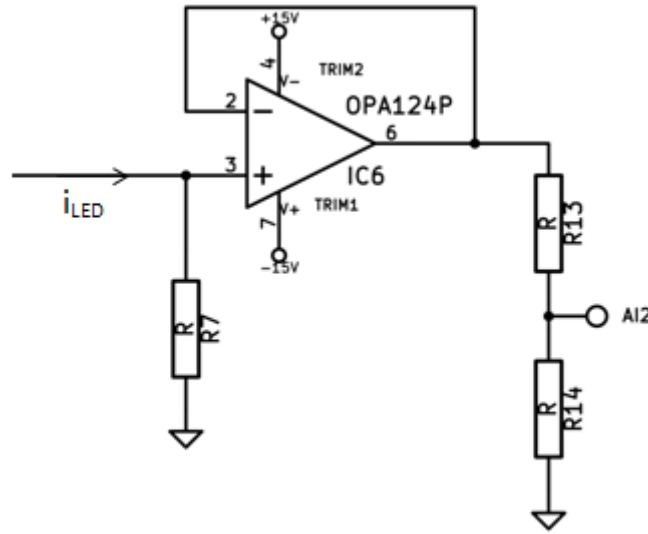
$$V_{AI0} = V_{outB} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (2.2)$$

dove si è indicato con  $V_{outB}$  la tensione di uscita del *buffer*. La tensione  $V_{AI0}$ , nel nostro caso, è una tensione nota e corrisponde al valore letto dal software durante una generica acquisizione. Anche i valori delle resistenze  $R_3$  e  $R_4$  sono noti. A questo punto siamo in grado di ricostruire a livello software il valore di  $V_{outB}$  che corrisponde alla tensione di ingresso visto che il *buffer* ha guadagno unitario:

$$V_{outB} = V_{AI0} \frac{R_3 + R_4}{R_4} \quad (2.3)$$

Le resistenze utilizzate sono resistenze di precisione i cui valori, a causa degli effetti termici, possono variare nel tempo. Considerato che i partitori sono realizzati con resistenze dello stesso tipo, le variazioni termiche incidono in maniera simile su tutte le resistenze non variando quindi il rapporto di partizione. La conoscenza del valore “esatto” delle resistenze, quindi, diminuisce l’errore della misura. É per questo motivo che ai capi di ogni resistenza sono stati posizionati dei ponticelli che consentono di disconnettere la resistenza in questione dal resto del circuito e di misurarne il valore con l’ausilio di un multimetro. Il valore letto sarà inserito all’interno del software di controllo (figura 1.4 a pagina 4) ed utilizzato per la ricostruzione del segnale effettivo. Le stesse considerazioni valgono per i partitori relativi ai canali *AI1* e *AI2* del circuito di figura 2.8. Gli amplificatori operazionali usati come *buffer* sono del tipo *LF347N* della *STMicroelectronics* con ingresso a *JFET*, caratterizzati da un’elevata impedenza d’ingresso ( $10^{12} \Omega$ ) e bassa corrente di *bias* (20 pA).

Visto che la scheda *DAQ* in dotazione non consente di acquisire direttamente segnali di corrente non è possibile acquisire la corrente che attraversa il dispositivo. Si è pensato di realizzare un convertitore *corrente-tensione* ad operazionale. Dall’acquisizione di questa tensione, dopo opportune manipolazioni software, si ricostruisce



**Figura 2.10:** Convertitore corrente-tensione

il valore della corrente che attraversa il *LED*. Prima di esaminare il funzionamento del convertitore corrente tensione dello schema di figura 2.8, che è dotato di una parte analogica di conversione e di una parte digitale che si occupa delle selezioni della resistenza relativa al range di corrente interessato, si illustrerà il funzionamento di un circuito di base per la conversione della corrente in tensione (figura 2.10). Poiché gli ingressi dell'operazionale non assorbono corrente, la corrente d'ingresso  $i_{LED}$  scorre tutta, a meno della corrente di *bias* dell'operazionale, sulla resistenza  $R_7$ . Tenendo conto che i due ingressi dell'amplificatore sono equipotenziali vale la seguente relazione:

$$V_o = V_- = V_+ = R_7 i_{LED} \Rightarrow V_o = R_7 i_{LED} \quad (2.4)$$

dove con  $V_o$ ,  $V_-$  e  $V_+$  si indicano rispettivamente, l'uscita, l'ingresso invertente e l'ingresso non invertente dell'amplificatore operazionale. Quindi, fissato il valore di  $R_7$ , la tensione di uscita  $V_o$  dipende linearmente dalla corrente  $i_{LED}$ . Tale relazione è valida fino a quando il valore della tensione di uscita  $V_o$  non va in saturazione, ovvero finché il circuito funziona in modo lineare. La tensione di uscita del convertitore corrente-tensione, scalata attraverso il partitore resistivo, viene acquisita dal canale analogico di ingresso *AI2*. A questo punto il software, attraverso diverse manipolazioni (cfr. paragrafo 3.6 a pagina 50), è in grado di risalire al valore della corrente che attraversa il *LED* secondo la relazione:

$$V_o = V_{AI2} P_{AI2} \Rightarrow i_{LED} = \frac{V_o}{R_7} \quad (2.5)$$

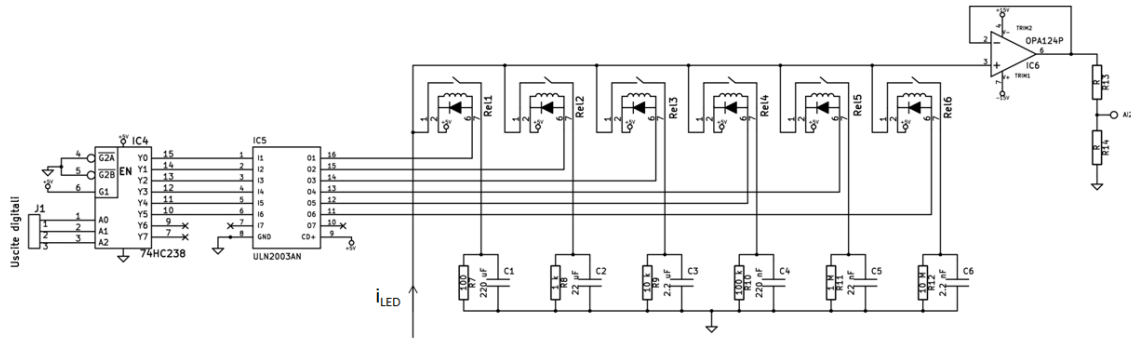


Figura 2.11: Selezione range corrente

dove  $P_{AI2}$  indica il rapporto di partizione per l'ingresso analogico AI2 e vale  $P_{AI2} = (R_{13} + R_{14}) / R_{14}$ . Anche in questo caso la conoscenza del valore delle resistenze riduce l'errore della misura. É possibile, infatti, tarare le resistenze per la conversione corrente-tensione (cfr. paragrafo 1.2 a pagina 2). L'operazionale IC6 è un OPA124 della STMicroelectronics ed è particolarmente indicato per la bassa tensione di offset ( $250 \mu\text{V}$ ) e la bassa corrente di bias ( $1 \text{ pA}$ ), requisiti fondamentali nel caso si vogliono misurare, come si vedrà, correnti dell'ordine dei nA.

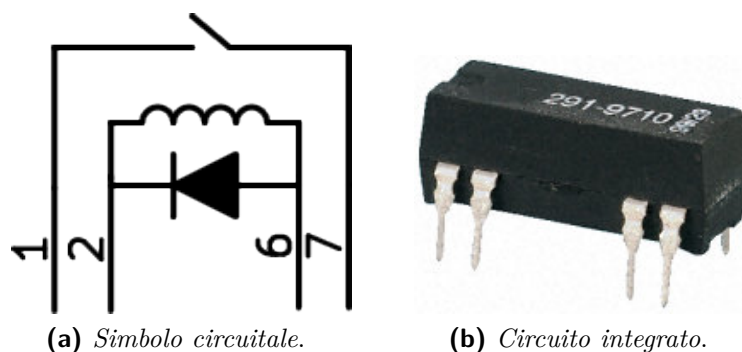
Il sistema, come già discusso, permette di misurare correnti molto basse (dell'ordine del nA), tramite la selezione, via software, della resistenza da collegare al morsetto non invertente del convertitore corrente-tensione (IC6). É infatti possibile scegliere una delle sei resistenze  $\langle R_7 \dots R_{12} \rangle$  (figura 2.11) per selezionare uno dei seguenti range di corrente:

- $100 \mu\text{A} - 100 \text{ mA} \rightarrow R_7$
- $10 \mu\text{A} - 10 \text{ mA} \rightarrow R_8$
- $1 \mu\text{A} - 1 \text{ mA} \rightarrow R_9$
- $100 \text{ nA} - 100 \mu\text{A} \rightarrow R_{10}$
- $10 \text{ nA} - 10 \mu\text{A} \rightarrow R_{11}$
- $1 \text{ nA} - 1 \mu\text{A} \rightarrow R_{12}$

In realtà possono essere misurati valori più bassi di corrente di quelli indicati, considerato che: la risoluzione degli ingressi analogici, scegliendo come range di acquisizione  $0 - 10 \text{ V}$ , vale  $1.22 \text{ mV}$ . Si è comunque preferito assumere  $10 \text{ mV}$  come valore minimo di acquisizione, per evitare, o comunque diminuire, l'errore della misura dovuto ad eventuale rumore presente nel circuito. Diverse sono le possibili fonti di rumore che influenzano la misura: le tensioni di offset e le correnti di bias degli operazionali utilizzati, la lunghezza dei collegamenti e la non perfetta schermatura degli stessi, le oscillazioni dovute all'alimentazione del circuito e il rumore termico. Il sistema digitale che consente la selezione del range di corrente è composto da un decoder IC4, da sei relè reed  $\langle Rel1 \dots Rel6 \rangle$  e da un driver per relè (IC5). La scelta



di un range di corrente da parte dell'utente viene decodificata dal sistema che non fa altro che chiudere il contatto (normalmente aperto) del relè relativo alla scelta, consentendo il passaggio della corrente  $i_{LED}$  sulla resistenza associata a quel relè. Gli ingressi di selezione del decoder  $A0$ ,  $A1$  e  $A2$  sono collegati rispettivamente alle linee digitali della scheda  $P1.0$ ,  $P1.1$  e  $P1.2$  programmate come uscite. La selezione del range di corrente effettuata dall'utente viene trasformata in una parola di controllo di 3 bit, che applicata agli ingressi del decoder attiva una ed una sola delle uscite dello stesso. Ogni uscita del decoder è collegata ad un ingresso del driver per relè che svolge la funzione logica di una porta  $NOT$ . Nella figura 2.12a è rappresen-



**Figura 2.12:** Relè *reed* SPST

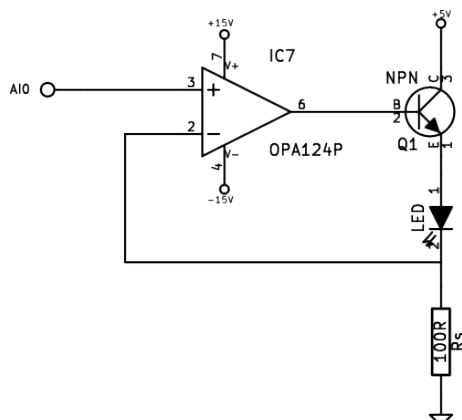
tato il simbolo circuitale dei relè utilizzati. A differenza dei relè elettromeccanici questo tipo di relè ha all'interno un contatto di tipo *reed*. Nella forma più semplice un contatto *reed* è costituito da due lamine, realizzate con materiale ferromagnetico, parzialmente sovrapposte e separate tra loro di qualche decimo di millimetro, sigillate all'interno di un piccolo contenitore di vetro riempito di gas inerte. I relè costruiti con questo tipo di contatto non necessitano di azioni meccaniche per l'attivazione: il contatto è avvolto dalla bobina di eccitazione e, al passaggio della corrente sulla bobina, viene generato un campo magnetico che fa commutare il contatto. È stato scelto questo tipo di relè principalmente per la bassa *resistenza di contatto*. I relè utilizzati del tipo *291-9710* della *MEDER electronics* hanno una resistenza di contatto di  $150\text{ m}\Omega$ . La resistenza di contatto del relè, quando attivo, va a sommarsi alla resistenza scelta dall'utente falsando la ricostruzione della corrente. In questo caso non è possibile effettuare una taratura a livello software della resistenza poiché è una resistenza che si manifesta solo quando il relè è attivo (quindi non separabile dal resto del circuito). Considerati i valori delle resistenze  $\langle R_7 \dots R_{12} \rangle$  ( $R_7 = 100\ \Omega$ ,  $R_8 = 1\text{ k}\ \Omega$ ,  $R_9 = 10\text{ k}\ \Omega$ ,  $R_{10} = 100\text{ k}\ \Omega$ ,  $R_{11} = 1\text{ M}\ \Omega$ ,  $R_{12} = 10\text{ M}\ \Omega$ ) l'errore sulla misura introdotto dalla resistenza di contatto è stato ritenuto accettabile. Altro punto a favore è la ridotta dimensione dell'integrato (figura 2.12b). L'unico svantaggio nell'utilizzo di questi relè sta nel fatto che non possono essere pilotati direttamente dalla scheda in dotazione. Nonostante siano a disposizione della scheda

ben 12 linee digitali, programmabili come uscite, la corrente di eccitazione richiesta dai relè è di 10 mA. Come discusso nel paragrafo 2.1 la massima corrente disponibile per le linee digitali vale 8.5 mA, quindi un'uscita digitale non è in grado di eccitare la bobina di un relè. Per questo motivo è stata scelta l'accoppiata decoder e driver. Con il primo si utilizzano soltanto tre uscite digitali della scheda piuttosto che sei, mentre il secondo è in grado di pilotare carichi fino ad un massimo di 500 mA, ben al di sopra del valore richiesto per i relè utilizzati. Il decoder utilizzato è il 74HCT238 della TEXAS INSTRUMENTS. Il driver è l'integrato *ULN2003AN* della *STMicroelectronics*, che contiene al suo interno 7 transistori darlington con uscita *open-collector*. I terminali 1 e 7 del relè (figura 2.12a) sono i terminali di ingresso e uscita del segnale che si vuole far transitare; i terminali 2 e 6 si utilizzano per l'eccitazione della bobina; il terminale 2 è connesso a +5 V mentre il terminale 6 è connesso all'uscita del driver. Inoltre il relè è dotato di diodo di protezione.

Con le capacità  $\langle C_1 \dots C_6 \rangle$  in parallelo alle resistenze (figura 2.11) si realizzano dei filtri passa basso che hanno il compito di filtrare le oscillazioni a 50 Hz dovute all'alimentazione. La frequenza di taglio di questi filtri è data da  $f_T = 1/(2\pi RC)$ . Il filtro, oltre ad attenuare le oscillazioni, rallenta il sistema. Per non rallentare eccessivamente il sistema si è scelta una frequenza di taglio  $f_T = 7.2$  Hz a cui corrisponde una costante di tempo  $\tau = RC = 22$  ms, il tempo affinché la risposta ad un gradino unitario si porti a regime sarà circa 100 ms.

## 2.3 Pilotaggio in corrente

Il pilotaggio in corrente, sebbene non permetta un'analisi approfondita della caratteristica a basse correnti, può permettere di studiare comportamenti interessanti dei *LED*. Nello specifico si è pensato a due modalità di pilotaggio: con corrente costante e con corrente variabile. Attraverso il pilotaggio con corrente costante, in cui la corrente di pilotaggio può assumere un valore compreso tra 5 mA e 40 mA, si può studiare se il *LED* analizzato presenta sintomi di invecchiamento precoce (riscontrabile di più nei "*LED organici (OLED)*") o comunque analizzare come variano la corrente (variabile indipendente) e la tensione ai suoi capi nel tempo. In questa modalità di pilotaggio è infatti possibile selezionare la durata del pilotaggio stesso (cfr. paragrafo 1.4 a pagina 8). Nel pilotaggio con corrente variabile l'utente può selezionare il range di corrente di pilotaggio, da un minimo di 5 mA ad un massimo di 40 mA. Entrambi gli estremi del range sono scelti a discrezione dell'utente. Considerato che la scheda in dotazione non è dotata di uscita analogica in corrente, non è stato possibile pilotare direttamente il *LED*. È stato progettato, quindi, un convertitore *tensione-corrente* in grado di fornire, a partire dalla tensione di uscita della scheda, una corrente che non dipenda dal carico pilotato. Si è di fatto realizzato un generatore di corrente controllato in tensione [3], il cui schema circuitale

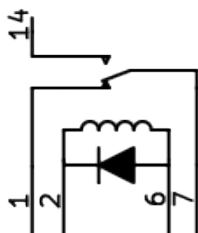


**Figura 2.13:** Convertitore tensione-corrente

è rappresentato in figura 2.13. Esistono due tipi di convertitori tensione-corrente: con carico collegato a massa e con carico flottante. La scelta della configurazione con carico flottante sarà discussa nel prossimo paragrafo. La corrente sul carico in questo circuito vale  $V_{AI0}/R_s$ , dove con  $V_{AI0}$  si è indicata la tensione dell'uscita analogica della scheda che viene applicata all'ingresso non invertente dell'amplificatore operazionale. Il terminale invertente dell'amplificatore operazionale, equipotenziale al terminale non invertente, riporta la tensione dell'uscita analogica della scheda ai capi di  $R_s$  sulla quale scorre, a meno della corrente di *bias* dell'operazionale, la stessa corrente che scorre sul carico. L'uscita dell'operazionale incrementa il suo valore per compensare la  $V_{BE}$  del transistor che di fatto eroga la corrente sul carico. La bontà di questo circuito dipende dalla qualità dell'amplificatore operazionale utilizzato. Per questo motivo si è utilizzato un *OPA124* della *STMicroelectronics*, particolarmente indicato per la bassa tensione di *offset* ( $250\ \mu\text{V}$ ) e la bassa corrente di *bias* ( $1\ \text{pA}$ ). Il transistor utilizzato è un *2N2222A* della *Philips Semiconductors*. La resistenza  $R_s$  vale  $100\ \Omega$  e, anche in questo caso, la conoscenza di tale valore è importante per la ricostruzione delle grandezze caratteristiche. In figura 1.4 a pagina 4 la resistenza  $R_s$  è indicata con "Resistenza serie".

## 2.4 Circuito completo

Nella figura 2.15 è rappresentato il circuito completo del *S-M*. La commutazione dal pilotaggio in tensione al pilotaggio in corrente è stata affidata a dei relè di tipo *reed*. I relè utilizzati sono del tipo *291-9704* della *MEDER electronics* che, a parte i contatti interni, hanno le stesse caratteristiche dei relè illustrati nel paragrafo 2.2. A differenza dei relè visti precedentemente, che hanno contatti di tipo *SPST* (**S**ingle **P**ole, **S**ingle **T**hrow), i relè utilizzati per la commutazione (figura 2.14) da pilotaggio



**Figura 2.14:** Relè reed SPDT

in tensione a pilotaggio in corrente hanno dei contatti di tipo *SPDT* (**S**ingle **P**ole, **D**ouble **T**hrow). Mentre il contatto di tipo *SPST* è un interruttore *ON-OFF* i contatti di tipo *SPDT* sono dei deviatori con un terminale in comune (7) collegabile al terminale 1 o 14. Sono stati utilizzati tre relè di “scambio”: uno per connettere il canale di uscita analogica della scheda all’amplificatore di tensione (per il pilotaggio in tensione) o al convertitore tensione-corrente (per il pilotaggio in corrente; altri due sono stati connessi ai capi del *LED*. In questo modo si riescono ad utilizzare i due buffer per la lettura della tensione ai capi del *LED* sia per il pilotaggio in tensione sia per il pilotaggio in corrente, per questo motivo il convertitore tensione-corrente è stato realizzato con carico flottante. Quando la bobina del relè non è eccitata il terminale comune è connesso al terminale 1: in questo caso è attivato il pilotaggio in tensione. La commutazione del tipo di pilotaggio è gestita in modo digitale sfruttando una delle due uscite inutilizzate del decoder (*IC4*). Quando si sceglie il pilotaggio in corrente avviene la commutazione dei tre relè disconnettendo il *LED* dal circuito relativo al pilotaggio in tensione e connettendolo alla parte di circuito relativo al pilotaggio in corrente.

Per alimentare i circuiti integrati del circuito è stato realizzato un alimentatore con uscite  $\pm 15\text{V}$  e  $+5\text{V}$ , il cui schema circuitale è rappresentato in figura 2.16 a pagina 30. Il circuito è stato montato e testato su delle basette sperimentali (figura 2.17 a pagina 31).

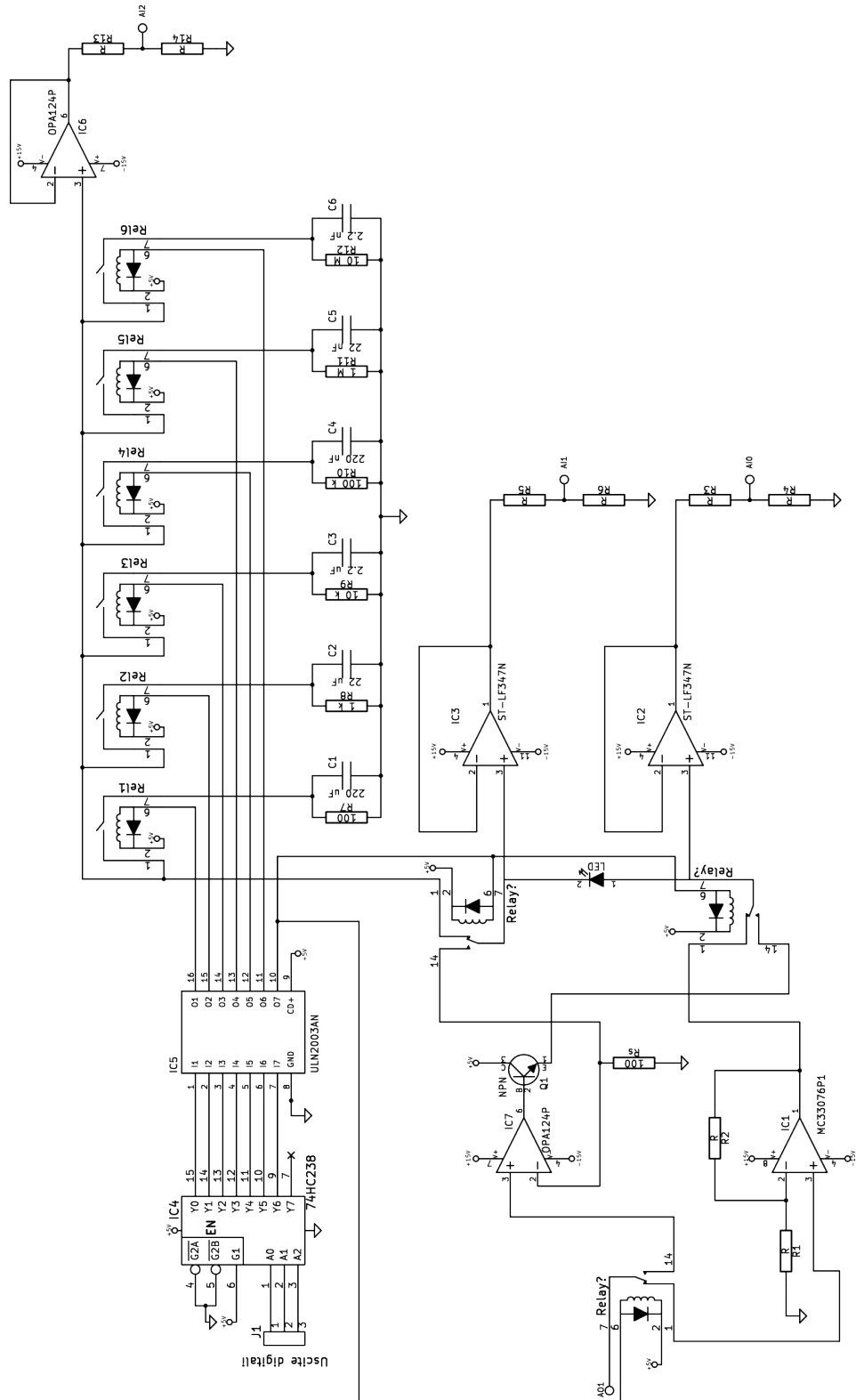


Figura 2.15: Schema elettrico del circuito completo

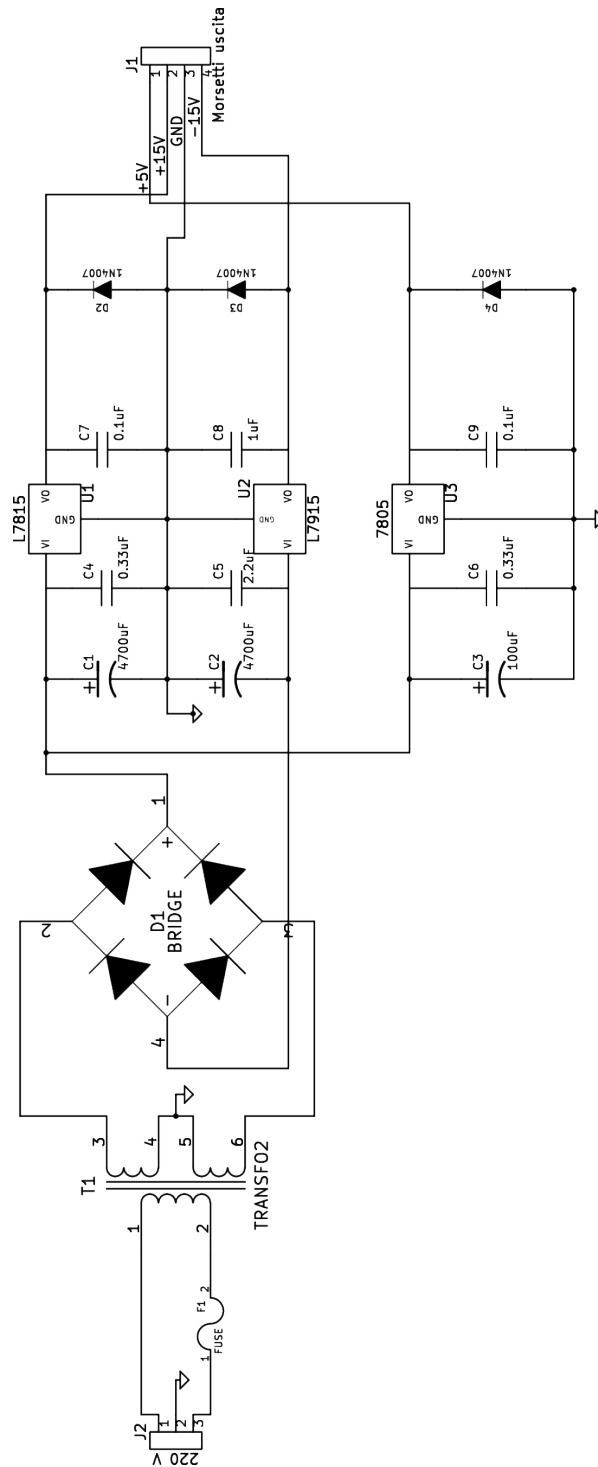
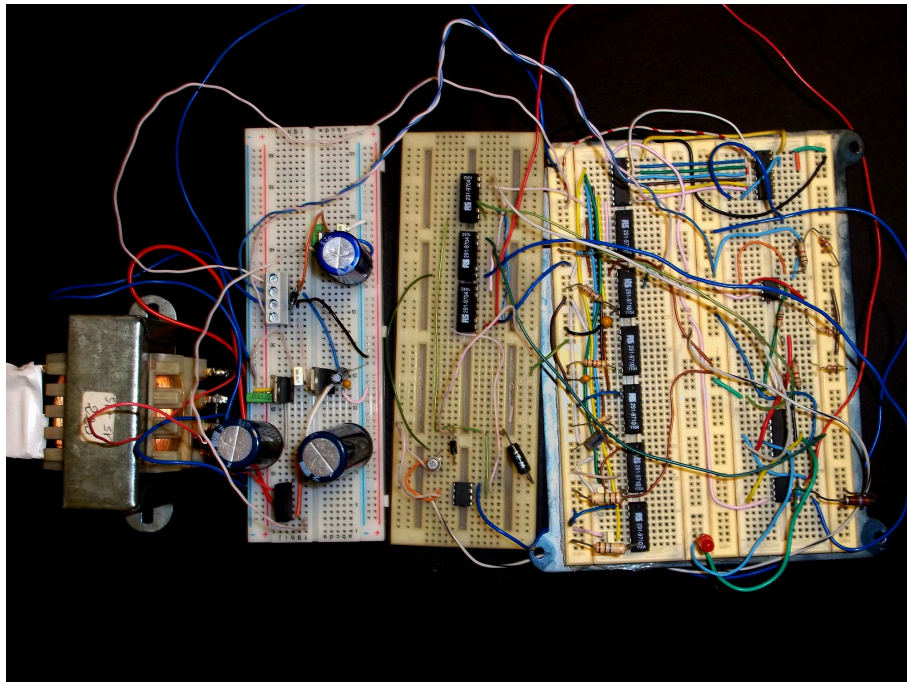
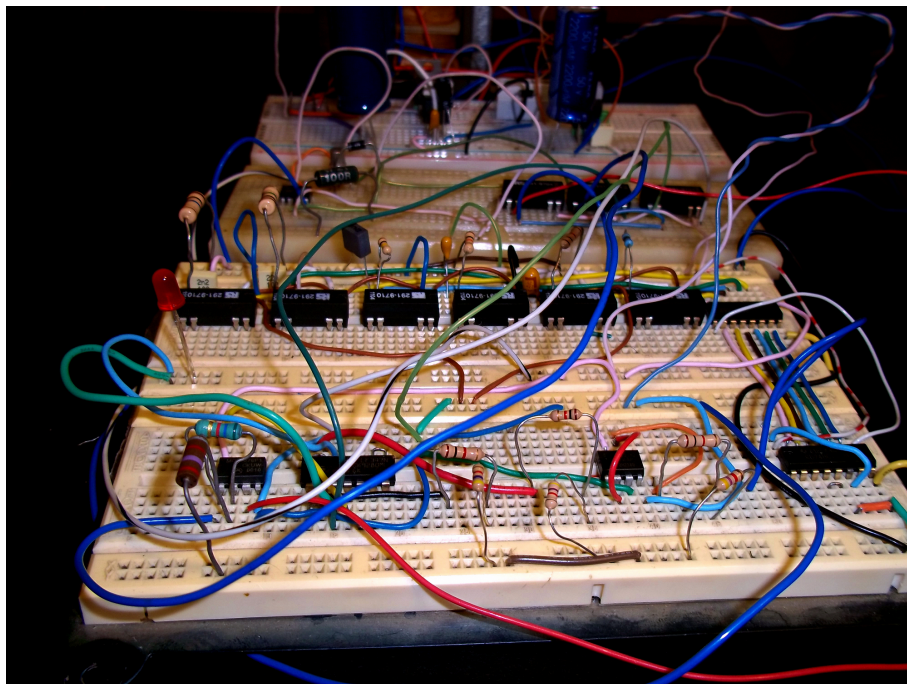


Figura 2.16: Alimentatore  $\pm 15\text{ V}$ ,  $+5\text{ V}$



(a) *Vista dall'alto.*



(b) *Vista frontale.*

**Figura 2.17:** Circuito realizzato su basette sperimentali

# Capitolo 3

## Il software

Il software per il controllo del *Source-Meter* e per il tracciamento della caratteristica  $V-I$  è stato realizzato in LabVIEW<sup>TM</sup> (**L**aboratory **V**irtual **I**nstrumentation **E**ngineering **W**orkbench) che utilizza un linguaggio di programmazione grafico. La versione di LabVIEW<sup>TM</sup> utilizzata in questo lavoro di tesi è la 7.1. In questo capitolo, dopo una breve introduzione a LabVIEW<sup>TM</sup>, si esamineranno le parti fondamentali del software realizzato.

### 3.1 Introduzione a LabVIEW<sup>TM</sup>

LabVIEW<sup>TM</sup> è un ambiente di sviluppo integrato (“IDE”, *Integrated Development Environment*), ossia un software che aiuta i programmatori nello sviluppo del codice di un nuovo programma. Il linguaggio di programmazione grafico denominato  $G$  o linguaggio  $G$ , permette di realizzare programmi come connessione di *blocchetti* che raffigurano un’immagine descrittiva dell’operazione compiuta. Dati, costanti, variabili ed altri oggetti sono connessi a questi *blocchetti* attraverso dei fili di collegamento, ed assumono un colore diverso in base al tipo di *informazione* che transita su di essi (figura 3.1). Un programma o sottoprogramma scritto in linguaggio  $G$  non













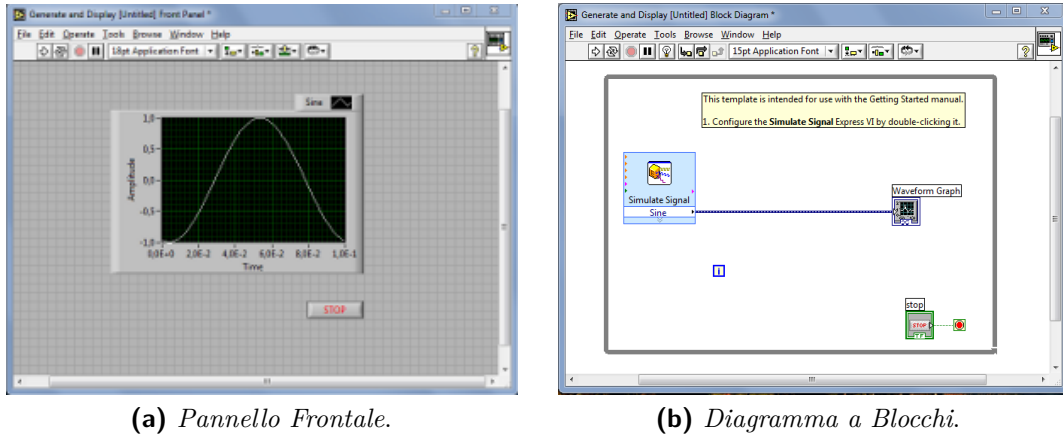
Tipo di collegamento	Scalare	Array 1D	Array 2D	Colore
Numerico	 	 	 	Arancione (virgola mobile), Blu (intero)
Booleano				Verde
Stringa				Rosa

Figura 3.1: Tipi di collegamento





**Figura 3.2:** Il Pannello Frontale (a) e il Diagramma a Blocchi (b) del tutorial “Generate and Display” presente nella libreria standard di LabVIEW<sup>TM</sup>

esiste sotto forma di *testo* come nel caso dei linguaggi di programmazione *tradizionali* (C, C++, Pascal, ecc. . .). Un programma scritto in LabVIEW<sup>TM</sup> prende il nome di *VI (Virtual Instrument)* e un qualunque sottoprogramma prende il nome di *sub VI*, questi ultimi consentono di affrontare la programmazione con l’approccio *divide et impera (dividi e domina)*. Questo approccio consente la costruzione di un programma principale (*VI*) contenente al suo interno tanti sottoprogrammi (*sub VI*) che si occupano di determinate *funzioni o operazioni* del software che si sta realizzando, che avrà in questo modo una struttura più snella e facilmente modificabile.

Nell’ambiente di sviluppo ogni *VI* è composto da due parti fondamentali:

- il pannello frontale (*Front Panel*)
- il diagramma a blocchi (*Block Diagram*)

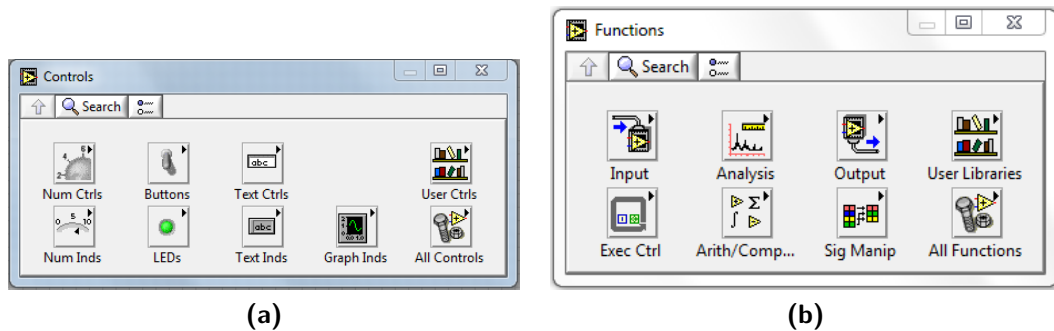
Il pannello frontale (figura 3.2a) è l’interfaccia utente del *VI* in cui vengono inseriti i *controlli* (manopole, interruttori, pulsanti, campi numerici, ecc. . .) o gli *indicatori* (led, grafici, tabelle, termometri, ecc. . .) che costituiscono rispettivamente i terminali interattivi di ingresso e di uscita.

Il diagramma a blocchi (figura 3.2b) costituisce il vero e proprio *codice* dell’applicazione da realizzare e non è visibile all’utilizzatore. Gli oggetti dello schema a blocchi comprendono essenzialmente:

- terminali
- strutture
- funzioni

- costanti
- fili di collegamento
- caselle di testo

Per inserire gli oggetti nel pannello frontale o nel diagramma a blocchi si utilizzano due tavole denominate rispettivamente *Controls Palette* e *Functions Palette* (figura 3.3). In LabVIEW<sup>TM</sup> l'ordine di esecuzione di un VI segue un modello a flusso



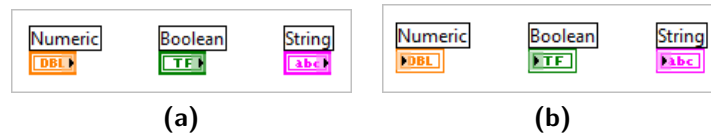
**Figura 3.3:** Controls Palette (a) e Functions Palette (b)

di dati (*dataflow*), che è basato sul concetto di descrivere la computazione come una rete di nodi, componenti e blocchi di elaborazione collegati tra di loro da un certo numero di canali di comunicazione. Un nodo del diagramma a blocchi entra in esecuzione quando tutti i suoi ingressi sono stati definiti. Quando un nodo entra in esecuzione, esso produce dei dati di uscita e li passa al nodo successivo lungo il percorso del flusso di dati. Il movimento dei dati attraverso i nodi determina quindi l'ordine di esecuzione del VI.

Per rendere più chiaro possibile il programma realizzato verranno descritti brevemente gli oggetti maggiormente utilizzati nel suddetto programma[4]. Ogni oggetto del pannello frontale di un VI ha un corrispondente terminale sul diagramma a blocchi. Come detto precedentemente, gli oggetti del pannello frontale possono essere controlli o indicatori che corrispondono rispettivamente a terminali di ingresso nel diagramma a blocchi e di uscita dal diagramma a blocchi. È possibile osservare nella figura 3.4a (a sinistra) che il controllo possiede due frecce che consentono di modificarne il valore (un ingresso per il diagramma a blocchi) mentre l'indicatore (figura 3.4a destra) non è modificabile (un'uscita dal diagramma a blocchi). Gli oggetti usati nell'esempio precedente sono entrambi di tipo *numerico* e con rappresentazione a doppia precisione (*double*). In base al colore delle icone si hanno informazioni sul tipo di controllo o indicatore utilizzato (numerico, booleano, alfanumerico, ecc ...) e con quale rappresentazione se si tratta di controllo o indicatore numerico (figura 4.1).

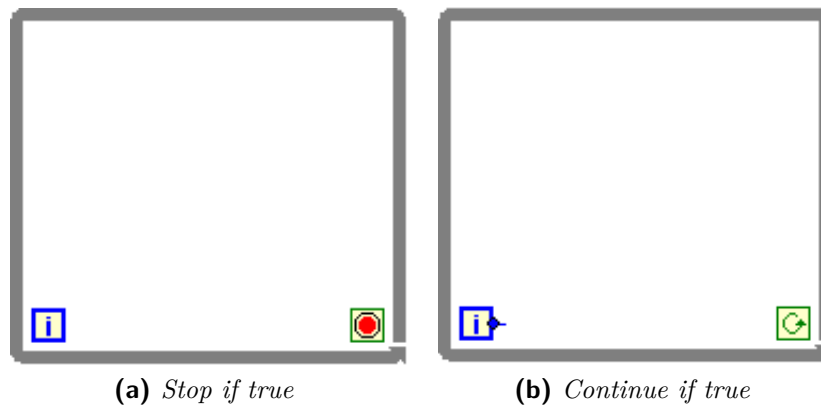


**Figura 3.4:** Controlli, indicatori e relativi terminali



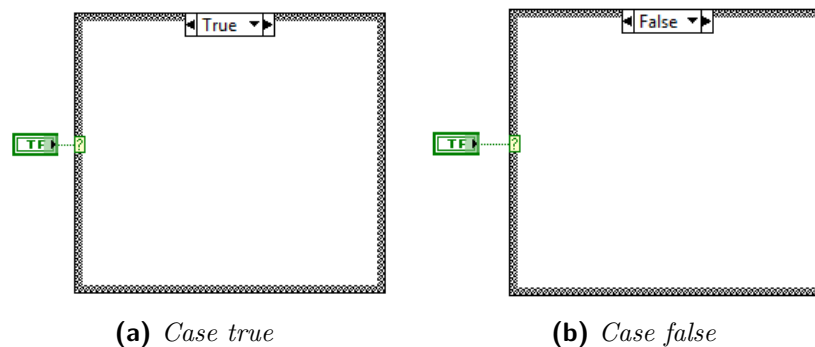
**Figura 3.5:** Controlli (a) e indicatori (b) maggiormente utilizzati

La gestione del flusso dei dati durante l'esecuzione di un *VI* può essere controllata attraverso particolari oggetti inseriti nel diagramma a blocchi, che prendono il nome di *strutture*. Nella figura 3.6 è rappresentata la struttura *while loop* che esegue il programma contenuto al suo interno fino a quando il terminale condizionale non riceve uno specifico valore booleano. Un valore booleano *true* in ingresso al terminale condizionale *Stop if true* (figura 3.6a) arresta l'esecuzione del programma contenuto all'interno del *while loop*. Nel caso di terminale condizionale *Continue if true* (figura 3.6b) l'esecuzione del ciclo viene interrotta quando riceve in ingresso un valore booleano *false*. Il terminale di iterazione, rappresentato in figura 3.6 dal quadrato in blu con dentro una "i", è un terminale di uscita che restituisce il numero di iterazioni effettuate dal *while loop*, il conteggio delle iterazioni parte sempre da zero.

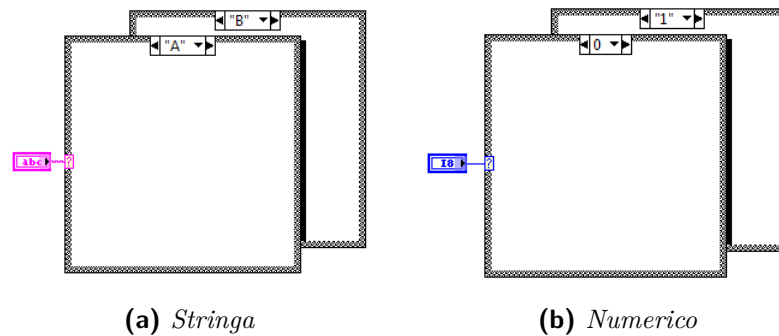


**Figura 3.6:** Struttura *while loop*

Nella figura 3.7 è rappresentata la struttura *case default* di LabVIEW™. In questa struttura viene eseguito un solo “*caso*” che viene selezionato attraverso il terminale di selezione della struttura (il punto interrogativo a sinistra). Se il valore del controllo booleano collegato al terminale di selezione è *true* viene eseguito il sottoprogramma contenuto nel caso *true*, viceversa se il valore del controllo booleano collegato al terminale di selezione è *false* viene eseguito il sottoprogramma contenuto nel *case false*. Le condizioni (*casi*) possono essere di tipo booleano, numerico o stringa. I vari *casi* sono impilati come un mazzo di carte e vengono selezionati attraverso un controllo di tipo booleano, numerico o stringa collegato al terminale di selezione (figura 3.8).

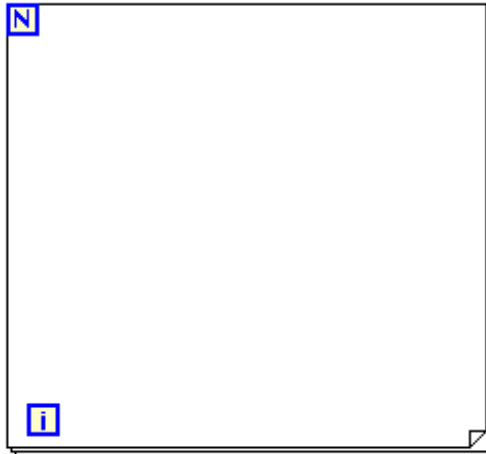


**Figura 3.7:** Struttura *case*

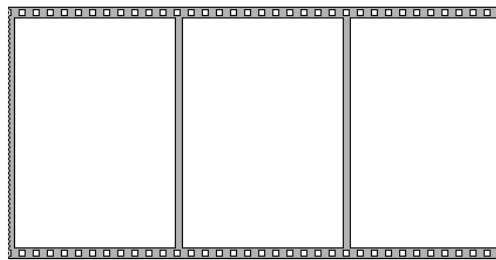


**Figura 3.8:** Tipi di condizioni nelle strutture *case*

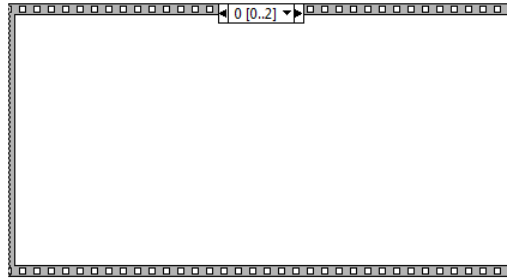
La struttura *for* (figura 3.9) esegue  $N$  volte il programma contenuto al suo interno. Il funzionamento della struttura *for* è analoga ai *cicli for* utilizzati in molti linguaggi di programmazione (*for i=0 to N-1*). Le informazioni elaborate durante l’esecuzione di questa struttura sono disponibili in uscita al termine del ciclo, ossia quando il terminale di iterazione “*i*” raggiunge il valore  $N-1$ .

**Figura 3.9:** Struttura *for*

In figura 3.10 è rappresentata la struttura *flat sequence* che consente l'esecuzione sequenziale di un programma. Ogni sequenza viene chiamata *frame*, la struttura di figura 3.10 è composta da tre frame: l'esecuzione della struttura comincia dal primo frame fino all'ultimo. È possibile scambiare dati tra le varie sequenze della

**Figura 3.10:** Struttura *flat sequence*

struttura, prestando attenzione al fatto che un dato è disponibile per altre sequenze solo quando la sequenza che contiene il programma incaricato nella produzione del dato stesso è stata eseguita completamente. Questa struttura interagisce con il resto del programma al termine dell'esecuzione di tutte le sue sequenze, quindi se, per esempio, si volesse condividere all'esterno della struttura un dato generato nel primo frame, si dovrebbe attendere l'esecuzione di tutti i frame della struttura. L'utilizzo improprio di questa struttura può fare allungare notevolmente i tempi di esecuzione dell'intero programma realizzato. In figura 3.11 è rappresentata la struttura *stacked sequence*, sostanzialmente uguale alla struttura *flat sequence*; in questa struttura è visibile un solo frame per volta selezionabile attraverso le frecce in alto.



**Figura 3.11:** Struttura *stacked sequence*

Durante la programmazione può essere utile interagire con i vari oggetti del pannello frontale da qualsiasi locazione del diagramma a blocchi; gli oggetti che consentono questo tipo di operazione sono le *variabili locali*. Una variabile locale può essere utilizzata in scrittura *write local* o in lettura *read local*. Di default LabVIEW<sup>TM</sup> imposta una nuova variabile locale per ricevere dati *write local*. Quando una variabile locale viene letta o scritta automaticamente si aggiorna lo stato dell'oggetto ad essa associato. Sullo schema a blocchi è possibile distinguere visivamente i due tipi di variabili come indicato in figura 3.12 (a). Così come per i controlli o gli indicatori, anche le variabili possono essere di tipo booleano, stringa o numerico. Le variabili locali possono essere utilizzate solo all'interno del *VI* che



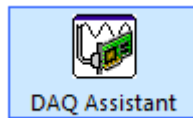
(a) Variabili locali

(b) Variabili globali

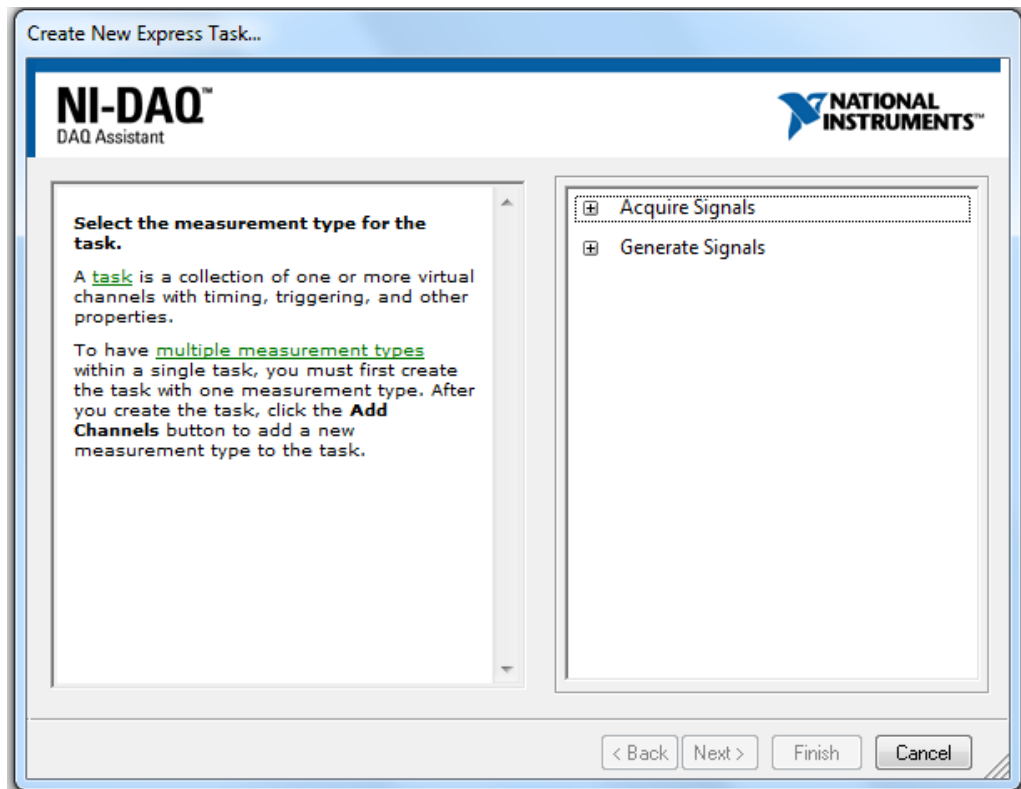
**Figura 3.12:** Variabili locali e globali

contiene il pannello frontale da cui sono state ricavate. Per poter utilizzare una variabile all'interno di qualsiasi *VI* o *subVI* si deve ricorrere all'utilizzo delle *variabili globali*. Le variabili globali sono definite sotto forma di controlli o indicatori su un *VI* dotato del solo pannello frontale. L'utilizzo delle variabili globali è di fondamentale importanza se l'applicazione che si sta realizzando ha una struttura modulare e contiene molti *subVI* con cui scambiare informazioni. L'icona delle variabili globali contiene al suo interno un piccolo *globo* (figura 3.12 (b)).

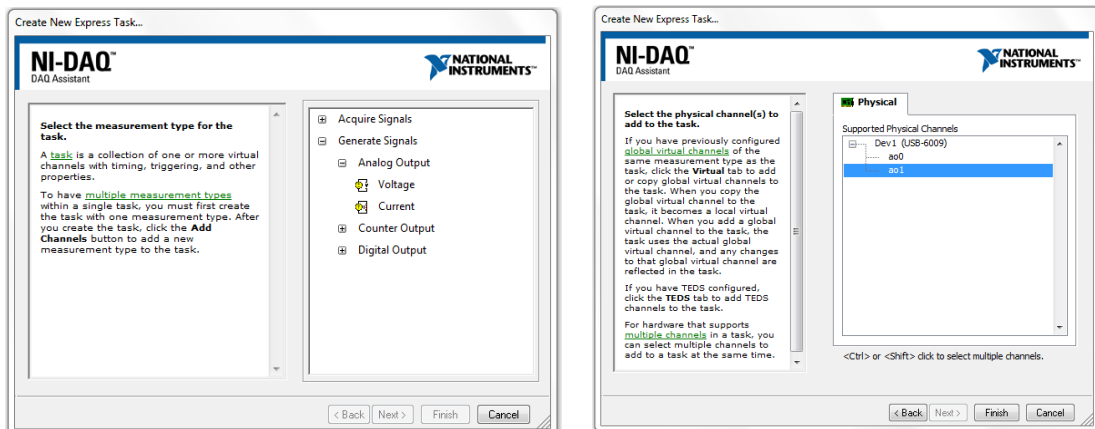
I driver *DAQmx* [5] sviluppati da NATIONAL INSTRUMENTS<sup>TM</sup> permettono di configurare le schede di acquisizione di tipo *DAQ* utilizzando specifici *VI* chiamati *Express VI*, ossia degli strumenti personalizzabili che aiutano passo passo l'utente in fase di programmazione. L'*Express VI* maggiormente utilizzato in questo lavoro di tesi è il *DAQ Assistant* (figura 3.13). Questo *Express VI*, raggiungibile nella *Functions Palette* seguendo il percorso All Functions → Ni Measurement → DAQmx-Data

**Figura 3.13:** DAQ Assistant

Acquisition consente la configurazione di tutti i canali della scheda di acquisizione *DAQ*. Una volta selezionato *l'express VI* e posizionato sul diagramma a blocchi, LabVIEW™ apre automaticamente un *wizard* (figura 3.14). A titolo di esempio,

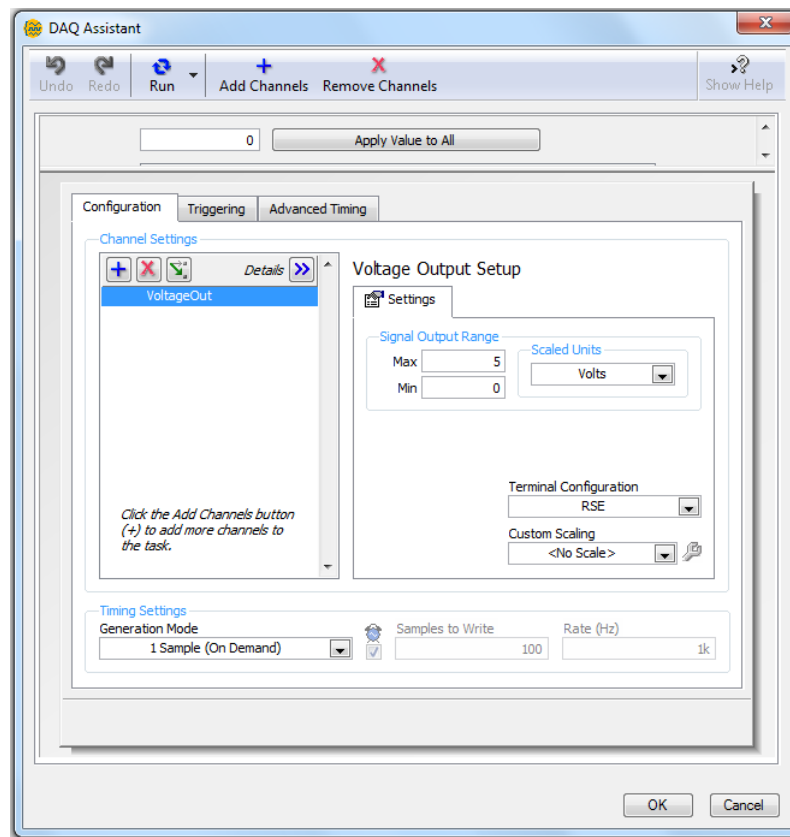
**Figura 3.14:** DAQ Assistant wizard

nella figura 3.15 vengono rappresentati i passi necessari per la generazione di un segnale di tensione analogico di uscita sul canale *AO1* della scheda *NI USB-6009*.



(a) Scelta generazione segnale analogico di tensione

(b) Scelta canale analogico della scheda



(c) Scelta range di tensione e timing

**Figura 3.15:** Generazione di un segnale analogico con l'utilizzo del *Daq Assistant*



## 3.2 Pannello principale

Il VI associato al menù principale, il cui pannello frontale è rappresentato in figura 1.2 a pagina 2, è denominato *menu.vi*. Nella figura 3.16 è rappresentato il suo diagramma a blocchi. Il programma relativo al pannello è racchiuso all'interno di un ciclo *while* che rimane attivo (in pausa o in esecuzione) fino a quando il terminale relativo al controllo “*on-off generale*” assume valore booleano *true*. La commutazione del controllo da *true* a *false* avviene quando l'utente clicca sul relativo controllo del pannello frontale. È possibile separare la struttura del VI in due parti fondamentali: la prima è addetta all'inizializzazione delle variabili globali, mentre la seconda, formata da tre strutture di tipo *case*, interpreta quale tasto del pannello frontale (*Operazioni preliminari*, *Caratteristica V-I*, *Pilotaggio in corrente*) è stato selezionato dall'utente. L'esecuzione del VI rimane in pausa fino a quando la funzione *Wait For Front Panel Activity* non rileva un'azione effettuata dall'utente sul pannello frontale. La struttura di questo VI consente l'utilizzo di questa funzione poiché le operazioni svolte dal software in mancanza di un'azione da parte dell'utente sono: l'inizializzazione delle variabili globali e la verifica del valore dei terminali di abilitazione delle strutture *case*. In ragione di

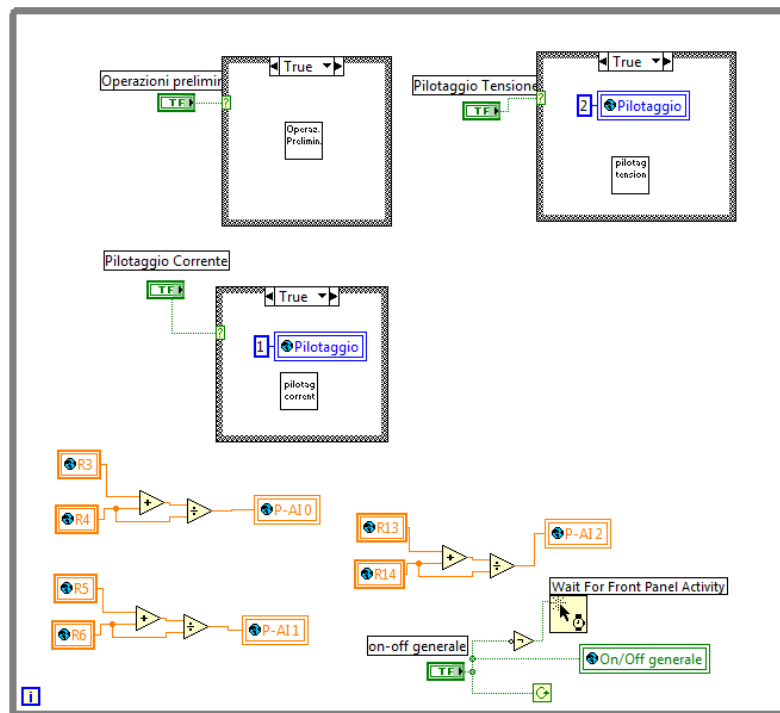


Figura 3.16: Diagramma a blocchi del *menu.vi*

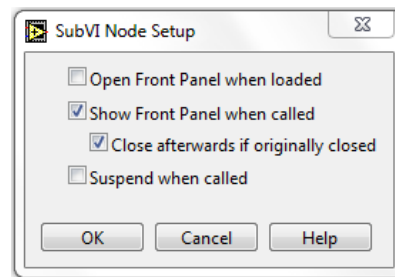
ciò è chiaro che se non si effettua alcuna selezione è inutile impiegare le risorse del calcolatore.

Tutte le variabili globali si trovano nel *VI parametri globali.vi*. Quest'ultimo contiene le variabili utili alla ricostruzione dei segnali effettivi (i valori delle varie resistenze) e determinate variabili utilizzate per memorizzare, ad esempio, la scelta del pilotaggio effettuato o lo stato attuale del sistema. Le variabili relative alle resistenze permettono di calcolare i diversi rapporti di partizione secondo la tabella 3.1.

Canale analogico	Variabile globale	Espressione	Valore di default
AI0	P-AI0	$\frac{R_3+R_4}{R_4}$	1.22
AI1	P-AI1	$\frac{R_5+R_6}{R_6}$	1.22
AI2	P-AI2	$\frac{R_{13}+R_{14}}{R_{14}}$	1.22

**Tabella 3.1:** Rapporti di partizione

Se si sceglie di cliccare sul tasto *Operazioni preliminari* il valore del corrispondente terminale assumerà valore *true* attivando la relativa struttura *case* che avvierà il *subVI operazioni preliminari.vi*. Quando viene richiamato un *subVI*, scegliendo le opzioni *Show Front Panel when called* e *Close afterwards if originally closed* (figura 3.17) dalla voce *SubVI Node Setup*, richiamabile con un click destro sull'icona del *subVI*, è possibile programmare l'apertura del suo pannello frontale, che sarà automaticamente chiuso quando il *subVI* termina la sua esecuzione, ritornando così al *VI* o *subVI* chiamante. I *subVI* del software di controllo realizzato vengono richiamati con queste modalità, ad eccezione del *subVI scrivi file.vi*



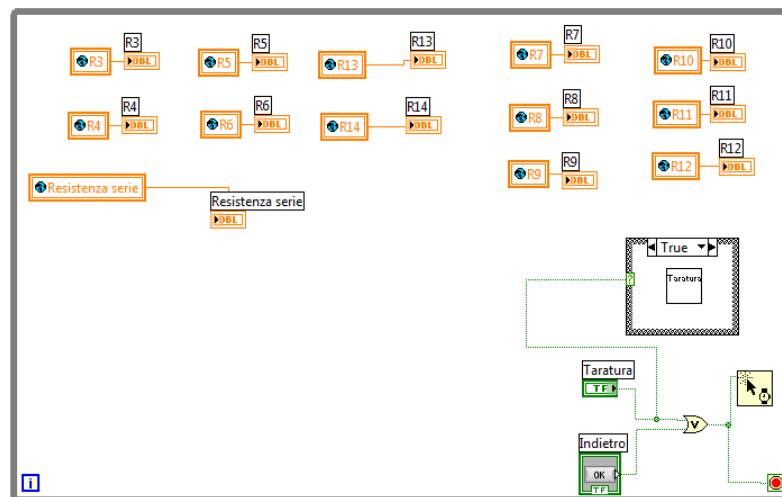
**Figura 3.17:** *SubVI Node Setup*

Allo stesso modo se si sceglie di cliccare su *Caratteristica V-I* o su *Pilotaggio in corrente* sarà eseguito, rispettivamente, il *subVI pilotaggio tensione.vi* o il *subVI*

*pitotaggio corrente.vi*. In base alla scelta effettuata la variabile globale *Pilotaggio* verrà inizializzata con il valore 1 (pilotaggio in corrente) o 2 (pilotaggio in tensione), questo valore sarà utilizzato per la composizione del file di testo all'interno del *subVI scrivi file.vi* (cfr. paragrafo 3.8). La variabile globale *On/Off generale* memorizza il valore booleano del tasto *on-off generale*.

### 3.3 Operazioni preliminari e taratura

Il *subVI operazioni preliminari.vi* (figura 3.18), il cui pannello frontale è rappresentato in figura 1.3 a pagina 3, permette di verificare il valore di default delle resistenze utilizzate per la ricostruzione delle grandezze caratteristiche. Il programma relativo a questo *subVI* è contenuto all'interno di un ciclo *while* che termina la sua esecuzione se il valore booleano in uscita dalla porta *OR* assume valore *true*, ossia quando uno dei due ingressi assume il valore *true*. I terminali di ingresso della porta *OR* sono associati rispettivamente ai tasti *Taratura* e *Torna al menù principale*. In questo *subVI* vengono letti i valori delle resistenze memorizzati nelle rispettive variabili globali e vengono mostrate all'utente attraverso degli indicatori di tipo numerico. A questo punto l'utente può scegliere se tornare al menù principale o effettuare un'operazione di taratura, in quest'ultimo caso verrà richiamato il *subVI taratura.vi* (figura 3.19). Il *subVI taratura.vi* (figura 1.4 a pagina 4) è molto simile al *subVI operazioni preliminari.vi*, la differenza sta nel fatto che i valori delle resistenze vengono memorizzate sulle relative variabili globali piuttosto che lette. La commutazione del terminale *salva* termina l'esecuzione del *subVI* riportando l'utente al *menù principale*.



**Figura 3.18:** Diagramma a blocchi *operazioni preliminari.vi*

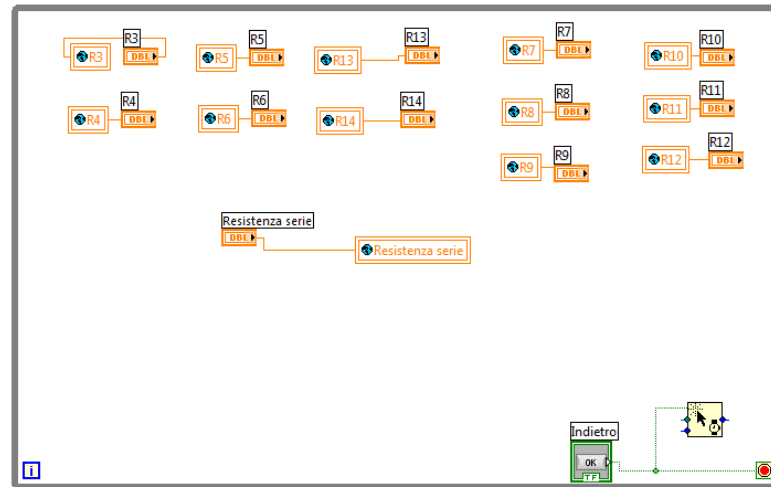


Figura 3.19: Diagramma a blocchi *taratura.vi*

### 3.4 Configurazione pilotaggio in tensione

Nel diagramma a blocchi del *subVI pilotaggio tensione.vi* (pannello frontale in figura 1.5 a pagina 5) è presente una struttura *sequence* composta da due *frame*. Nel *frame0* (figura 3.20) è presente un ciclo *while*, al cui interno è posizionato un *DAQ Assistant* programmato per acquisire un segnale digitale sulla linea *P1.3* della scheda che verifica se il *S-M* è acceso o spento. L'uscita *data* del *DAQ Assistant* è un vettore monodimensionale che ha per elementi i campioni acquisiti (un campione per ogni ripetizione del ciclo *while*). Per leggere l'ultimo campione acquisito (elemento di posizione 0) si utilizza la funzione *Index Array*, che estrapola da un array l'elemento all'indice indicato dalla costante intera. Se il segnale letto è di livello logico *basso* (*S-M* spento) si attiva il *case false* (figura 3.20a) che contiene al suo interno la

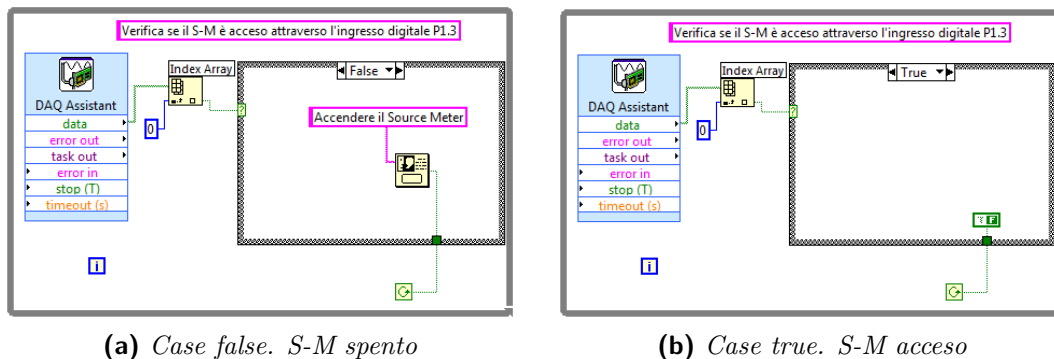


Figura 3.20: Frame0 *pilotaggio tensione.vi*

funzione *One button Dialog* che informa l'utente con il messaggio "Accendere il *Source Meter*". In questo momento il software mette in pausa il ciclo *while* e rimane in attesa dell'attivazione (attraverso un click dell'utente) del tasto *OK* mostrato nella finestra di dialogo. Se l'utente a questo punto clicca su *OK* la funzione invia un valore booleano *true* al terminale condizionale del ciclo *while* che ripete la scansione del canale digitale. Se il segnale letto è di livello logico *alto* (S-M acceso) viene attivato il sottoprogramma presente nel *case true* (figura 3.20b) che, attraverso la costante booleana *false* collegata al terminale condizionale, termina il ciclo *while* passando al *frame1*. Se il segnale letto, invece, è di livello logico basso viene ripetuta la procedura sopra esposta.

Nel *frame1* (figura 3.21) si provvede alla generazione della gradinata di pilotaggio ed alla gestione della selezione del range di corrente. All'interno del ciclo *while* esterno sono presenti due strutture *case*: quella comandata dal terminale *On/Off generazione* avvia la generazione della gradinata di livelli di tensione, mentre l'altra struttura, comandata da un selettore, gestisce la selezione del range di corrente. Il *DAQ Assistant2* è utilizzato per generare la tensione di uscita al canale analogico *AO1*, il cui valore è controllato dal suo ingresso *data*. Tale valore dipende dalla scelta del fondo scala e dal numero di livelli scelti dall'utente nella fase di configurazione del pilotaggio. Il fondo scala scelto e opportunamente manipolato, come vedremo tra poco, viene diviso per il numero di livelli scelti, ottenendo così l'ampiezza del singolo livello. Questo valore moltiplicato per il numero di iterazioni del ciclo viene applicato all'ingresso *data* del *Daq Assistant2* che traduce questo dato in un valore di tensione alla sua uscita analogica. La durata di un'iterazione è pari a 100 ms ed è controllata dalla funzione *Wait Until Next ms Multiple*. L'ampiezza dell'*i*-esimo livello  $A_i$  vale  $A_i = i(V_{fs}/N_l)$ . Il ciclo incaricato alla generazione dei livelli viene terminato quando il valore da applicare all'ingresso *data* è maggiore o uguale al valore del fondo scala opportunamente manipolato. Le manipolazioni a cui si è fatto riferimento riguardano, la divisione del fondo scala per il guadagno dell'amplificatore di tensione visto nel paragrafo 2.2 a pagina 20 e la correzione dell'errore di generazione della scheda (cfr. paragrafo 2.1 a pagina 15). Si è osservato che l'uscita analogica della scheda presenta un errore, pari a 73 mV, che si ripete in maniera "costante" per ogni volt generato. Si è pensato allora di aumentare il valore da generare considerando questo errore. La maggiorazione è lecita poiché pesata in funzione del numero di livelli. La variabile globale *Tgen* contiene il tempo necessario, espresso in ms, a generare tutti i livelli di pilotaggio. L'operatore "[ ]" *Round To Neatest* approssima questo valore al numero intero "z" più vicino. Quando il ciclo *while* addetto alla generazione della gradinata viene arrestato sulla variabile globale *Fine Generazione* verrà memorizzato il valore booleano *true*. Le variabili globali *Fondoscala* e *N livelli* saranno utilizzate nei *subVI acquisizione corrente.vi* e *scivi file.vi* per ricapitolare la configurazione scelta.

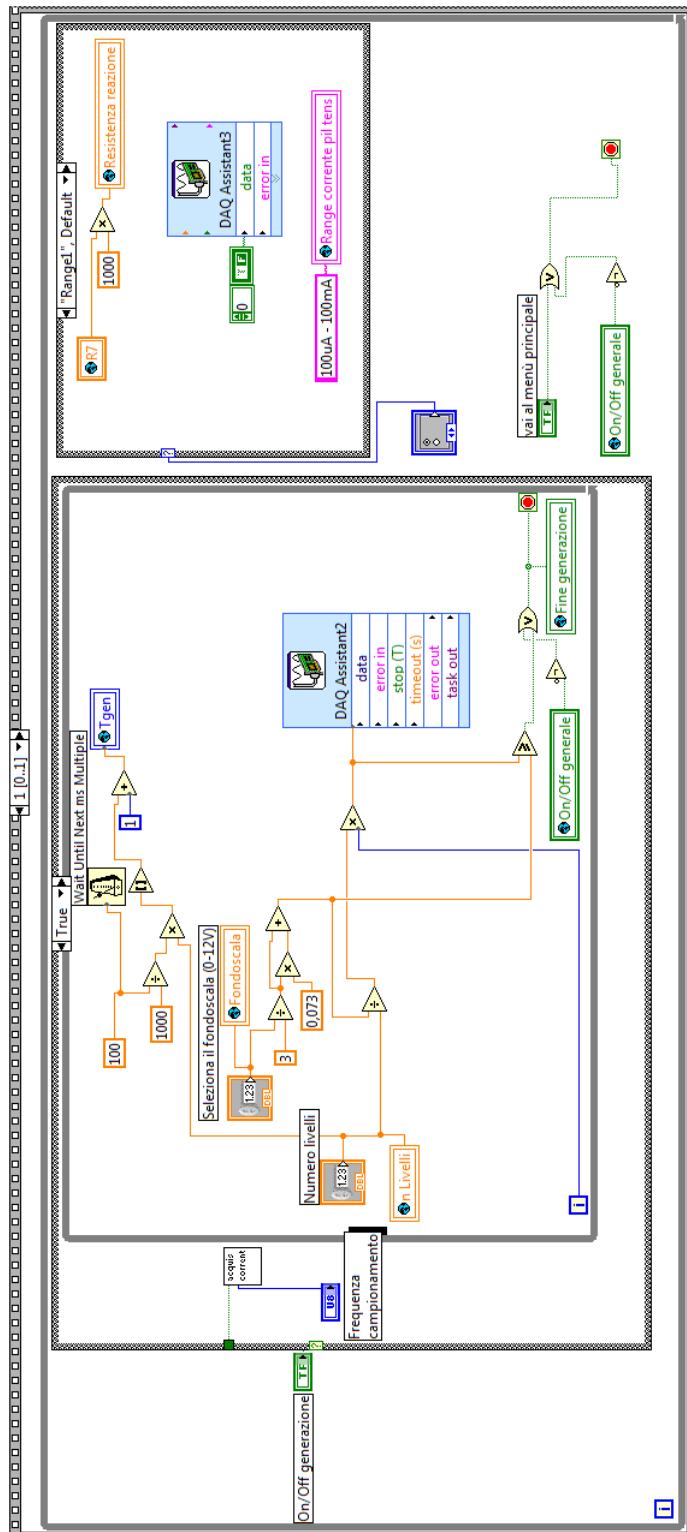


Figura 3.21: Diagramma a blocchi *pilotaggio tensione.vi*

La scelta del range di controllo è affidata ad un selettore presente nel pannello frontale che richiama, in base al valore selezionato, una delle sei strutture *case* (figura 3.22). All'interno di ogni struttura è stato inserito un *DAQ Assistant* che in base al valore della *parola di controllo* di tre bit applicata al suo ingresso *data* genera degli opportuni livelli logici alle uscite digitali P1.0, P1.1, P1.2 della scheda. Le parole di controllo, ossia il valore logico delle uscite digitali, sono riassunte nello schema sotto riportato. In ogni *case* si provvede ad inizializzare la variabile globale *Resistenza reazione* che sarà utilizzata per il calcolo della corrente. Il valore da scrivere nella variabile globale è il valore della resistenza corrispondente al range selezionato moltiplicato per 1000, moltiplicazione necessaria considerato che le resistenze  $< R_7 \dots R_{12} >$  memorizzate nel software sono espresse in  $k\Omega$ . Viene inoltre inizializzata la variabile globale di tipo stringa *Range corrente pilotaggio tensione*, alla quale viene associato il valore del range selezionato.

- Range1 → Parola di controllo 000
- Range2 → Parola di controllo 100
- Range3 → Parola di controllo 010
- Range4 → Parola di controllo 110
- Range5 → Parola di controllo 001
- Range6 → Parola di controllo 101

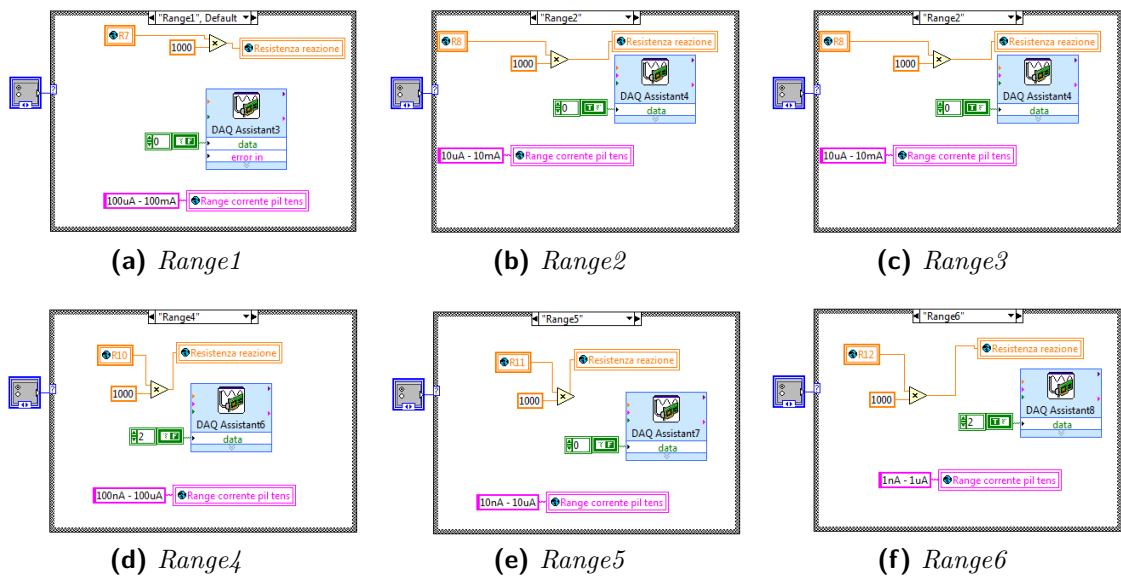


Figura 3.22: Scelta range corrente *pilotaggio tensione.vi*

### 3.5 Configurazione pilotaggio in corrente

Il diagramma a blocchi del *subVI pilotaggio corrente.vi* figura 3.23, il cui pannello frontale è rappresentato nella figura 1.10 a pagina 9, è molto simile al *subVI pilotaggio in tensione.vi*. In questo paragrafo si metteranno in evidenza le differenze tra i due *subVI*. Per quanto riguarda il pilotaggio con corrente costante, l'esecuzione del sottoprogramma (struttura *case* a sinistra) relativo alla gestione viene avviata dalla commutazione del terminale corrispondente al tasto di *Avvio* del pannello frontale. La *spia* del pannello frontale (corrispondente al terminale *led costante* o *led variabile* in base al tipo di pilotaggio scelto) che segnala se c'è una generazione in corso rimane accesa fino a quando l'uscita della porta *OR* rimane a livello logico basso. Il *DAQ Assistant* esterno al ciclo *while* viene utilizzato per far commutare i relè di scambio che disconnettono il *LED* dal circuito relativo al pilotaggio in tensione connettendolo al circuito relativo al pilotaggio in corrente. Come visto nel paragrafo 2.3 a pagina 26 la corrente di pilotaggio è data da  $V_{AIO}/R_s$  dove con  $V_{AIO}$  si indica la tensione dell'uscita analogica della scheda; la  $R_s$  vale  $R_s = 100 \Omega$ . Il valore di corrente inserito dall'utente viene diviso per 10 in modo tale che, per esempio, ad una corrente scelta di 10 mA corrisponda una tensione generata di 1 V. Anche in questo caso è stata effettuata la maggiorazione dell'ingresso *data* del *DAQ Assistant* considerando l'errore della scheda. La durata della generazione dipende dal valore scelto dall'utente, mediante l'apposito controllo nel pannello frontale a cui corrisponde il terminale *Durata pilotaggio in secondi*, che viene confrontato con la durata delle generazioni fatte (una ogni 100 ms). Quando questi termini coincidono l'uscita della porta *OR* commuta al livello logico alto, arrestando così il ciclo *while* relativo alla generazione. La variabile globale *cost/var* viene inizializzata al valore 0, se il pilotaggio scelto è con corrente costante, o al valore 1, se il pilotaggio è con corrente variabile; il contenuto di questa variabile sarà utilizzato nel *subVI scrivi file.vi*.

Nella variabile globale *corrente costante* viene scritto il valore della corrente di pilotaggio scelto dall'utente, questa variabile viene utilizzata dal software sia nella scrittura del file che nella finestra di acquisizione per ricapitolare la configurazione scelta. La variabile globale *campioni pilotaggio corrente costante* viene inizializzata con il valore della durata scelta (un campione per ogni secondo scelto). Il sottoprogramma relativo alla generazione della corrente di pilotaggio variabile (struttura *case* a destra nella figura 3.23) è molto simile alla generazione vista per il pilotaggio in tensione. La differenza sta nella manipolazione della configurazione inserita dall'utente e dal fatto che nel pilotaggio in tensione il valore dell'ingresso *data* parte da zero mentre nel pilotaggio con corrente variabile l'inizio della generazione è vincolata dalla scelta *Inizio range corrente* fatta dall'utente. Nelle variabili globali *Start range corrente* e *End range corrente* vengono memorizzati, rispettivamente, il valori di inizio e fine range scelti dall'utente.



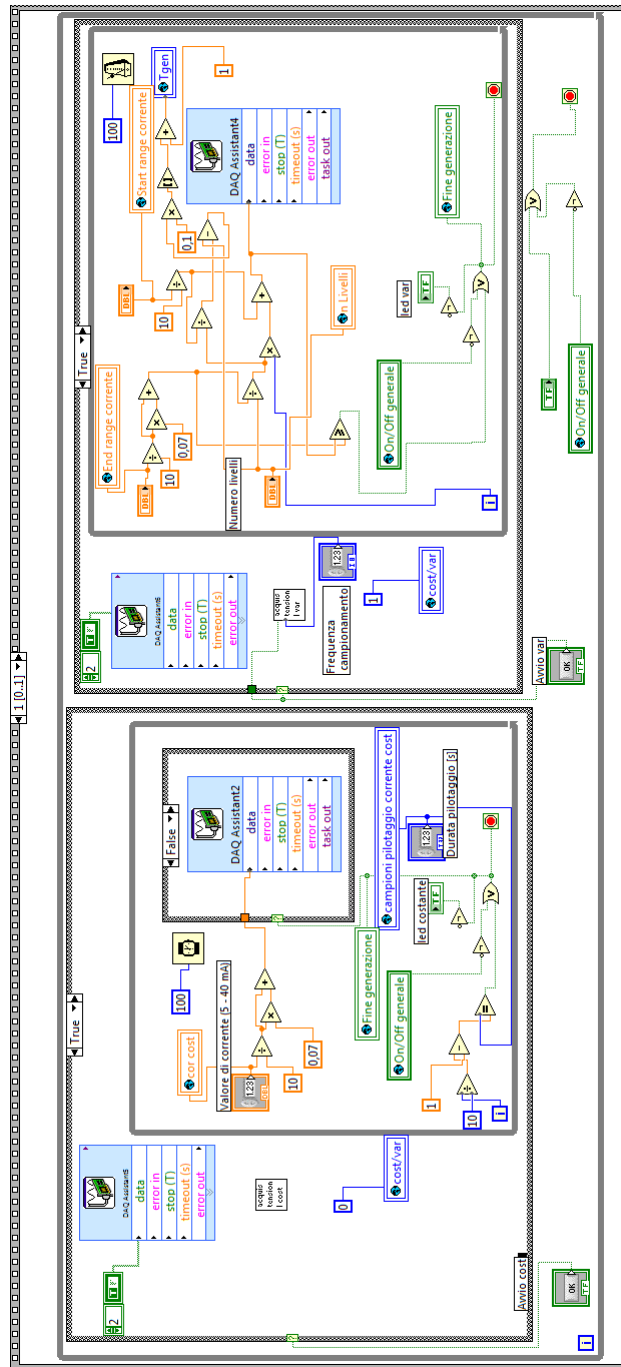


Figura 3.23: Diagramma a blocchi *pilotaggio corrente.vi*

## 3.6 Acquisizione

Il diagramma a blocchi del *subVI acquisizione corrente.vi* (figura 3.24), il cui pannello frontale è rappresentato nella figura 1.6 a pagina 6, si occupa della gestione della fase di acquisizione e ricostruzione delle grandezze caratteristiche. Inoltre provvede al tracciamento della caratteristica e alla memorizzazione, su opportune variabili globali di supporto, dei dati della caratterizzazione utilizzati successivamente per la composizione del file. Il ciclo *while* più esterno è utilizzato per mantenere aperto il *subVI* dopo la fine dell’acquisizione dei dati, per consentire all’utente di scegliere se salvare i dati della caratterizzazione su file o se eseguire una nuova caratteristica. L’avvio di questo *subVI* avviene contestualmente alla generazione della grandezza pilotante. Quando il terminale di iterazione “i” del ciclo *while* è uguale a zero (prima iterazione), viene attivata, oltre alla *spia* di segnalazione, la struttura *case* che contiene al suo interno un altro ciclo *while*, quest’ultimo termina la sua esecuzione quando il terminale associato alla variabile globale *Fine generazione* commuta dal valore booleano *false* (generazione in corso) al valore booleano *true* (fine della generazione). Come visto nel paragrafo 3.4 questa variabile locale contiene informazioni sullo stato della generazione della grandezza pilotante. All’interno della struttura *while* vengono inviati ai relativi indicatori presenti nel pannello frontale il contenuto delle variabili globali *Fondoscala*, *N Livelli* e *Range corrente pilotaggio in tensione*. Questi indicatori riassumo all’utente la configurazione scelta per la caratterizzazione in corso. La parte di programma che si occupa dell’acquisizione e dell’archiviazione dei dati è contenuta all’interno della struttura *sequence*, composta da due *frame*. Nel *frame0* si provvede ad acquisire e manipolare i dati dai canali analogici di ingresso della scheda AI0, AI1, e AI2 che sono collegati, attraverso il circuito *buffer-partitore* visto nella figura 2.9 a pagina 22, rispettivamente all’anodo del *LED*, al catodo e all’uscita del convertitore *I-V*. Nel *frame1* si provvede alla costruzione del grafico della caratteristica e alla memorizzazione dei dati. Nel *frame0* un ciclo *for...loop* viene eseguito un numero di volte pari alla frequenza di campionamento scelta dall’utente, ogni ciclo ha una durata pari *t*, con *t* dato da:

$$t = \frac{1000}{f. \text{campionamento}} [ms] \quad (3.1)$$

Se, ad esempio, si mantiene per la frequenza di campionamento il valore di default (10), ogni ciclo avrà la durata di 100 ms e si ripeterà per 10 volte al secondo. La temporizzazione del ciclo è affidata alla funzione *Wait ms*. Durante ogni ciclo si provvede ad acquisire i valori dai canali analogici suddetti. Si è scelto di utilizzare un unico *DAQ Assistant* per non rallentare l’esecuzione del ciclo. I dati dinamici in uscita dal terminale *data* del *DAQ Assistant* vengono convertiti in un vettore di dati di tipo numerico. I primi tre indici di questo vettore  $\langle v_0, v_1, v_2 \rangle$  contengono rispettivamente l’ultimo valore acquisito dai canali  $\langle \text{AI0}, \text{AI1}, \text{AI2} \rangle$ . Attraverso

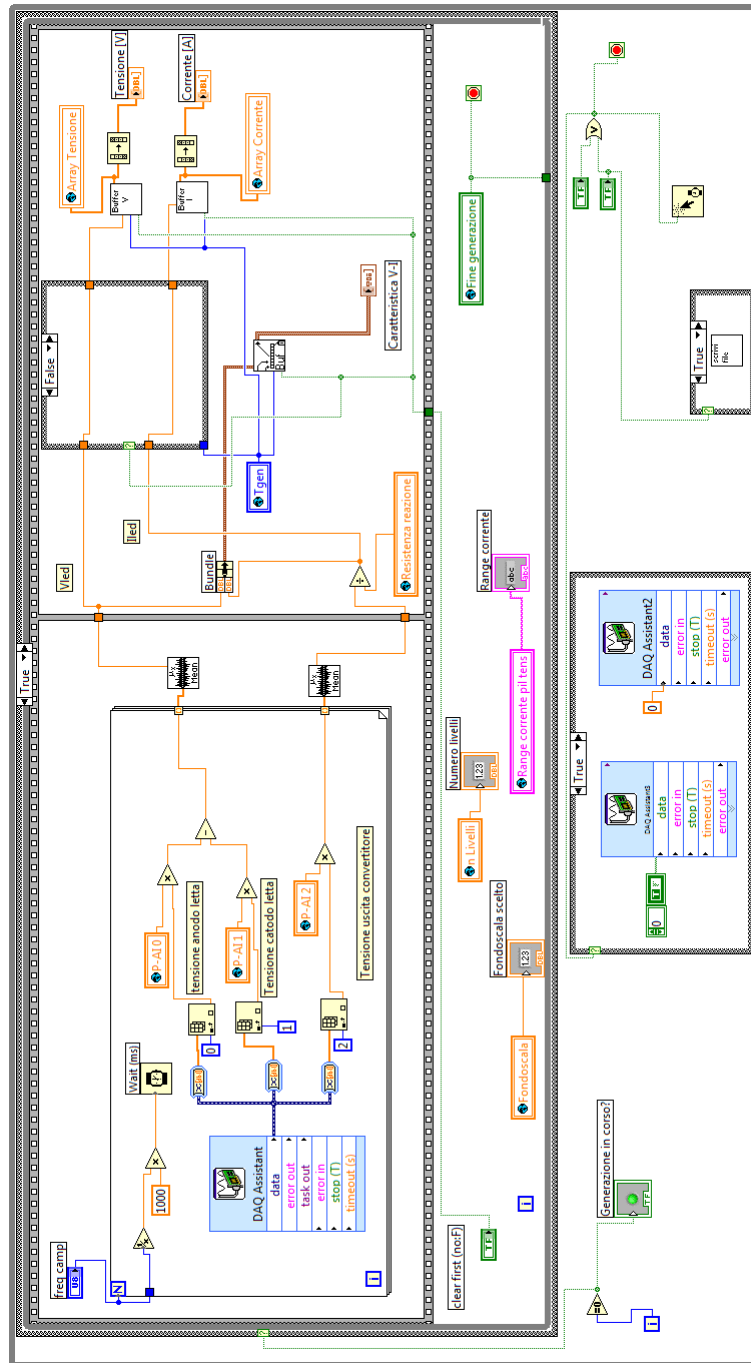


Figura 3.24: Diagramma a blocchi *acquisizione corrente.vi*

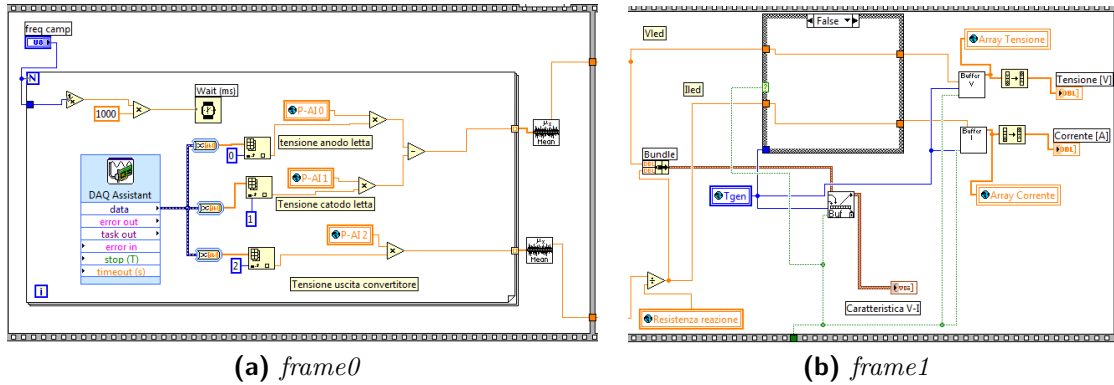


Figura 3.25: Struttura *sequence acquisizione corrente.vi*

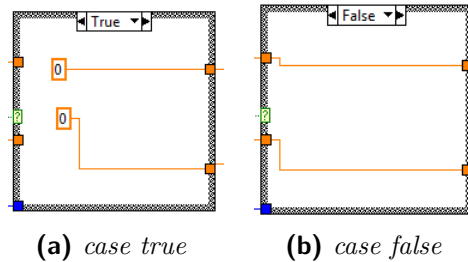
l'utilizzo di tre *index array* viene estrapolato dal vettore l'ultimo dato acquisito da ogni canale che viene opportunamente ricostruito attraverso la moltiplicazione per il corrispondente rapporto di partizione. Si provvede inoltre a calcolare la tensione ai capi del *LED* come  $V_{LED} = V_{AI0} - V_{AI1}$  con  $V_{AI0}$  e  $V_{AI1}$  si indicano la tensione ai capi del *LED* effettiva. Considerando di aver scelto come frequenza di campionamento il valore di default, al termine del ciclo *for* avremo 10 valori acquisiti al secondo; questi valori vengono mediati all'uscita del ciclo *for* mediante la funzione *Mean* secondo la seguente formula:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i \quad (3.2)$$

con  $\mu$  valore medio,  $n$  numero di campioni e  $x_i$  campione in ingresso.

Nel *frame1* viene calcolata la corrente che attraversa il dispositivo dividendo il valore della tensione del convertitore *I-V*, opportunamente manipolato, per il valore contenuto all'interno della variabile globale *Resistenza reazione*. I valori di tensione e corrente calcolati vengono assemblati, attraverso la funzione *Bundle*, in un *cluster* che è una struttura che ingloba al suo interno più dati. Questa struttura è molto simile ai *record* utilizzati in *Pascal* o alle *struct* in *C*. Il *cluster* è connesso al *subVI XY Chart Buffer*, appartenente alla libreria di LabVIEW™. Questo *subVI* non è altro che un registro dove vengono memorizzate le coppie di valori calcolate, la cui uscita (sempre di tipo *cluster*) è connessa al terminale *Caratteristica V-I* che corrisponde all'indicatore grafico del pannello frontale dove viene tracciata la caratteristica. Inoltre le coppie di valori vengono inviate singolarmente a due *subVI*, *BufferV* e *BufferI* (figura 3.26b), che generano rispettivamente due vettori contenenti i valori delle grandezze caratteristiche memorizzati su due variabili globali, *Array tensione* e *Array corrente* che saranno utilizzati nel *subVI scrivi file.vi*. Tutti i *subVI Buffer* vengono inizializzati all'inizio dell'acquisizione, ossia quando si ha una commutazione del terminale *clear first*, che corrisponde all'avvio della generazione

della grandezza pilotante. Durante l’inizializzazione si provvede a creare un *registro* di dimensione pari al valore della variabile globale *Tgen*. Tutti gli elementi dei registri vengono inizializzati, attraverso una struttura *case*, con il valore numerico “0” (figura 3.26a).



**Figura 3.26:** Inizializzazione elementi registri *acquisizione corrente.vi*

Al termine dell’acquisizione, che come detto corrisponde con il termine della generazione della grandezza pilotante, il software ritorna al ciclo *while* esterno, il suo terminale di iterazione commuta da 0 a 1 (seconda iterazione) spegnendo la *spia* di segnalazione. In questo momento il software rimane in attesa di un’azione da parte dell’utente sul pannello frontale. Se l’utente sceglie di cliccare sul tasto *Nuova Caratteristica* viene terminato il *subVI acquisizione corrente.vi* mentre se si sceglie di cliccare sul tasto *Output su file* viene eseguito il *subVI scrivi file*. Qualunque sia la scelta dell’utente attraverso una struttura *case* viene azzerata l’uscita analogica della scheda e contemporaneamente si associa alla parola di controllo la sequenza “111”, che abilita un’uscita del decoder non connessa al resto del circuito tornando così alla configurazione di default.

I diagrammi a blocchi relativi all’acquisizione della tensione nel caso di pilotaggio con corrente costante (*acquisizione tensione.vi*) e nel caso di pilotaggio con corrente variabile (*acquisizione tensione corrente variabile.vi*) sono molto simili al caso appena esaminato. Qualche differenza si può notare nella ricostruzione delle grandezze caratteristiche e nel nome delle variabili globali, ma nella sostanza il funzionamento è uguale. Nella figura 3.27 è rappresentato il diagramma a blocchi del *subVI acquisizione tensione corrente variabile.vi*. In questo caso viene effettuata la lettura dei soli canali di ingresso relativi ai terminali del *LED*. La corrente che attraversa il dispositivo è ottenuta secondo la seguente relazione:

$$i_{LED} = \frac{V_{catodo}}{1000 R_s} \quad (3.3)$$

Il valore della resistenza  $R_s$  viene moltiplicato per 1000 poiché all’interno del software è stato scelto di esprimere tutti i valori delle resistenze in  $k\Omega$ .

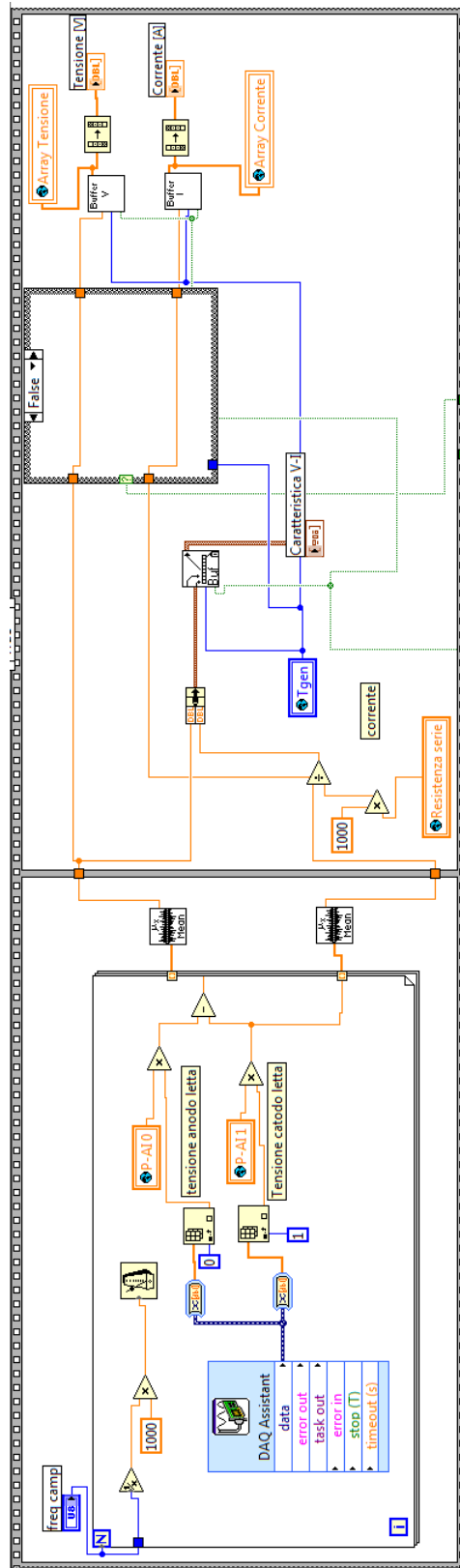


Figura 3.27: Diagramma a blocchi *acquisizione tensione corrente variabile.vi*

## 3.7 Buffer

I *subVI BufferV* e *BufferI* sono identici dal punto di vista funzionale. Permettono di memorizzare i dati delle grandezze caratteristiche in locazioni di memoria diverse per ogni grandezza. Sono stati realizzati due diversi *buffer* per evitare di dover rielaborare il contenuto di un unico *buffer* contenente entrambe le grandezze caratteristiche, o per evitare qualsiasi tipo di conflitto si potesse creare nella gestione contemporanea delle grandezze.

Entrambi i *subVI* sono ottenuti modificando il *subVI XY Chart Buffer* (figura 3.28) della libreria di LabVIEW™ che nativamente gestisce in ingresso e uscita dei cluster. Le modifiche apportate (figura 3.29) hanno consentito di usare la stessa logica considerando in ingresso e uscita, rispettivamente, valori e array numerici.

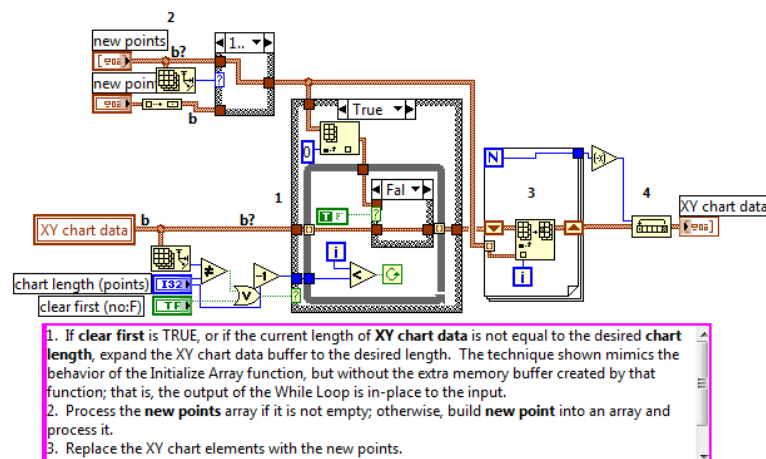


Figura 3.28: Diagramma a blocchi *XY Chart Buffer.vi*

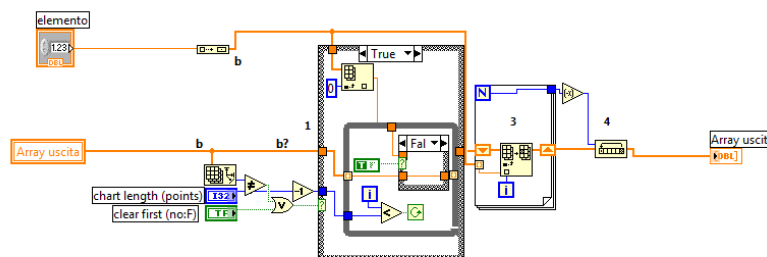


Figura 3.29: Diagramma a blocchi *BufferV.vi*

## 3.8 Scrivi file

Il *subVI scrivi file.vi* permette di creare un file la cui struttura è stata analizzata nel paragrafo 1.5 a pagina 12. Il diagramma a blocchi è rappresentato in figura 3.30. All'esterno del ciclo *while* il *subVI Open/Create/Replace File.vi* (libreria LabVIEW™) provvede a creare un nuovo file. Il nome di default del file è ottenuto concatenando diverse stringhe attraverso la funzione *Concatenate strings*. Questa funzione ha come ingressi  $n$  stringhe e restituisce un'unica stringa formata dagli  $n$  ingressi, nell'ordine in cui sono stati inseriti. Ricordiamo che la struttura del nome di default è la seguente:

**Caratteristica + data + ora.txt**

Per ottenere la data e l'ora della misura si utilizza la funzione *Get Date/Time String* che fornisce automaticamente queste informazioni. Per evitare eventuali errori durante la fase di salvataggio è stato sostituito il simbolo ":" con il simbolo "\_" attraverso la funzione *Search and Replace String*. Questa funzione ricerca il carattere ":" all'interno della stringa *data/ora* e, ad ogni occorrenza, lo sostituisce con il carattere "\_". All'interno del ciclo *while* più esterno si provvede a creare, in base a qualsiasi configurazione scelta, le righe del file che riassumono la configurazione scelta dall'utente. Le informazioni sulla configurazione sono memorizzate nelle variabili globali esaminate nei paragrafi precedenti. Mentre nel ciclo *while* interno si provvede ad inserire i valori delle grandezze caratteristiche. Le possibili configurazioni scelte dall'utente sono riassunte nel seguente schema:

- Pilotaggio in tensione
  - Fondo scala
  - Numero di livelli
  - Range corrente
  
- Pilotaggio in Corrente
  - Costante
    - \* Valore corrente
    - \* Durata pilotaggio
  - Variabile
    - \* Range corrente
    - \* Numero livelli



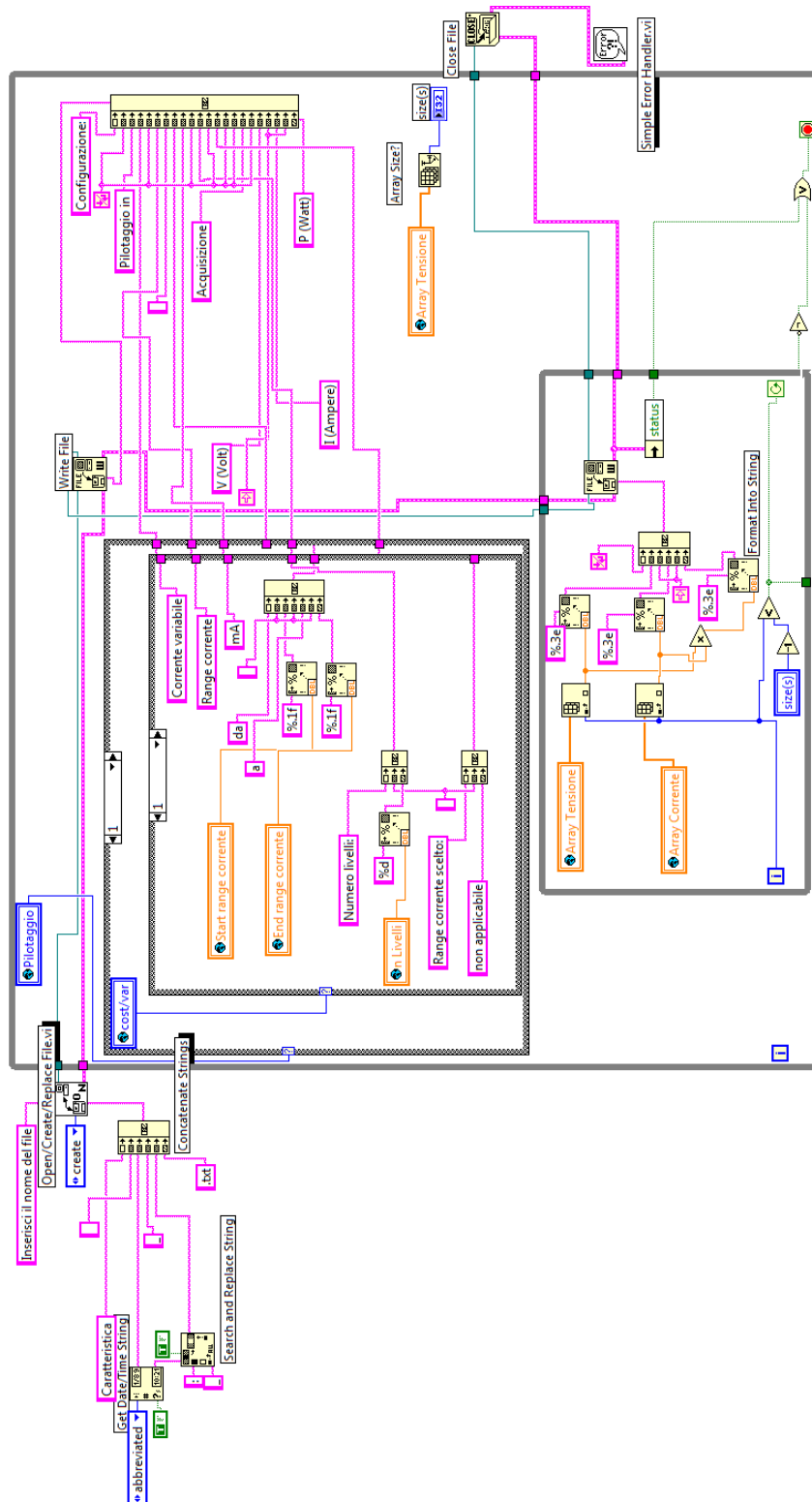
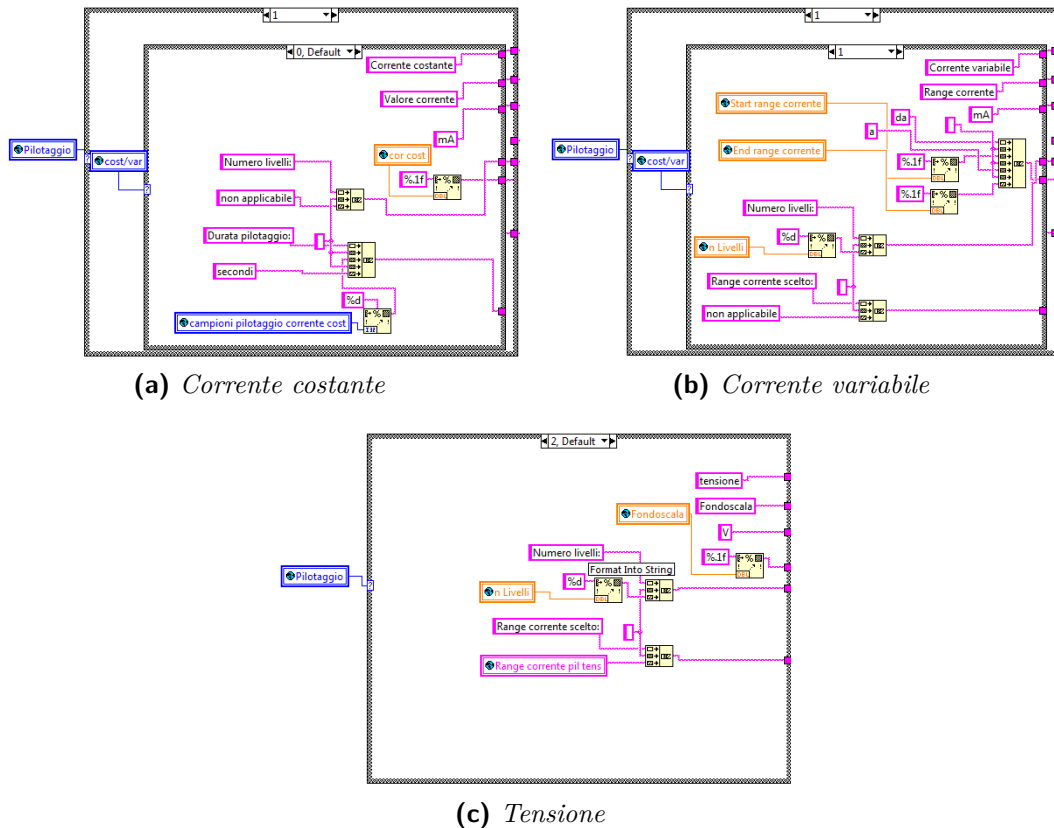







Figura 3.30: Diagramma a blocchi *scrivi file.vi*

La composizione delle righe di configurazione è realizzata attraverso la funzione *Concatenate strings*, i cui ingressi sono determinati da un sistema di strutture *case* attivate dalle variabili globali *Pilotaggio* che discrimina il tipo di pilotaggio scelto (tensione in figura 3.31c) e *cost/var* (costante/variabile) nel caso di pilotaggio in corrente (figura 3.31a e figura 3.31b). L'uscita della funzione *Concatenate strings* è collegata al *subVI Write file* che provvede a scrivere le prime righe nel file.

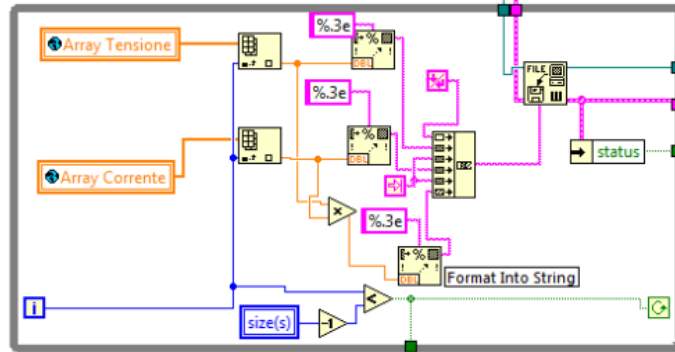


**Figura 3.31:** Composizione configurazione in funzione del pilotaggio

I comandi   , applicati agli ingressi della funzione *Concatenate strings*, inseriscono, rispettivamente, una nuova riga, uno spazio di tabulazione e uno spazio semplice. Per convertire i dati numerici in stringhe si utilizza la funzione *Format into Strings*; le stringhe   applicate al suo ingresso *format* personalizzano il formato della stringa derivante dalla conversione; nello specifico la prima formatta la stringa in formato scientifico con tre cifre significative, mentre la seconda formatta la stringa come decimale con due cifre significative.

Nel ciclo *while* interno vengono inseriti nel file i valori delle grandezze caratteristiche contenute all'interno delle variabili globali *Array tensione* e *Array corrente*.

L'estrapolazione degli elementi dai vettori avviene con degli *Index Array* (figura 3.32) il cui indice è determinato dal numero di iterazioni del ciclo. L'esecuzione del ciclo si interrompe quando il numero di iterazioni è pari alla profondità del *Array tensione*, calcolata attraverso la funzione *Size* che restituisce il numero di elementi di un vettore. Alla fine della scrittura il ciclo *while* esterno viene terminato e contemporaneamente il software chiude il file appena realizzato.



**Figura 3.32:** Inserimento valori grandezze caratteristiche

## Capitolo 4

# Caratterizzazione *LED* e altre misure

Nel primo paragrafo di questo capitolo si verificherà la linearità del convertitore  $V-I$  utilizzato nel pilotaggio in corrente (figura 2.11 a pagina 24) e del convertitore  $I-V$  utilizzato nel *pilotaggio in corrente*; successivamente si illustreranno i risultati ottenuti dalle misure effettuate su dei *LED*.

### 4.1 Linearità del sistema

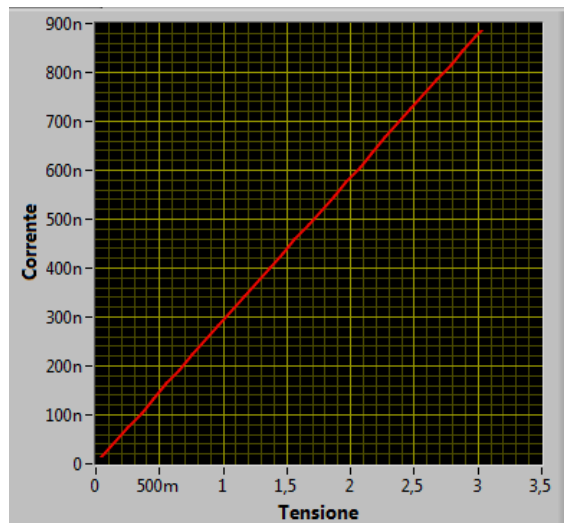
Per verificare la linearità del convertitore  $V-I$  (figura 2.11 a pagina 24), ovvero per verificare se la risposta è lineare all'ingresso, è stato sostituito il *LED* con una resistenza. Il valore di quest'ultima dipende, oltre che dal range di corrente che si intende esplorare, ossia dalla resistenza collegata al terminale invertente, anche dal fondo scala e dal numero di livelli scelto. Nello specifico si ricorda che anche se il sistema è in grado di misurare correnti più basse del nA (cfr. paragrafo 2.2 a pagina 20), è opportuno scegliere come minima ampiezza del singolo gradino di pilotaggio un valore maggiore del minimo valore acquisibile dalla scheda, che vale 10 mV. La misura che verrà mostrata è relativa al range di corrente  $1 \text{ nA} - 1 \mu\text{A} \rightarrow R_{12}$ , dove si è sostituito al *LED* una resistenza da  $3.3M\Omega \pm 5\%$ . La configurazione impostata è visibile in tabella 4.1a, mentre nella figura 4.2a è rappresentata la caratteristica  $V-I$  della resistenza. Ci si rende conto anche visivamente della linearità del circuito, poiché la caratteristica  $V-I$  che ci si aspetta è una retta. La verifica della linearità del convertitore è stata effettuata per tutti i range di corrente selezionabili. Nella tabella 4.2a sono riportati i valori delle grandezze caratteristiche. Per quanto riguarda la linearità del convertitore  $I-V$  si è sostituito il *LED* con un potenziometro. Anche in questo caso la verifica della linearità dipende dalla configurazione scelta dall'utente. La misura effettuata si riferisce al massimo valore di resistenza applicabile

Pilotaggio	F. scala	Livelli	Range corrente	Pilotaggio	Range corrente	Livelli
tensione	12V	300	1 nA - 1 $\mu$ A	corrente	5 mA-40 mA	150

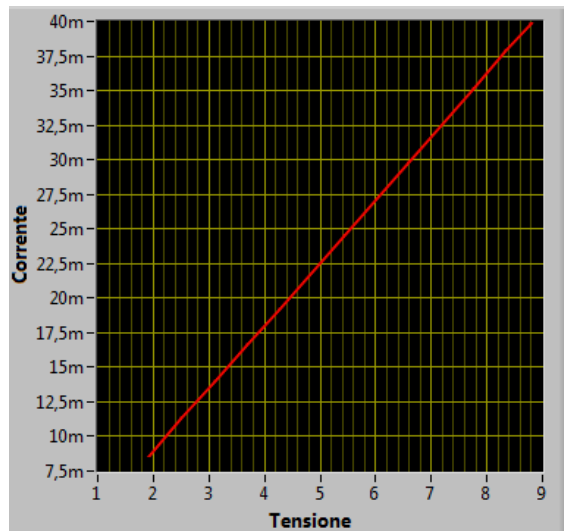
(a) Convertitore V-I

(b) Convertitore I-V

**Tabella 4.1:** Configurazione verifica linearità



(a) Convertitore V-I. Resistenza  $3.3M \Omega \pm 5\%$



(b) Convertitore I-V. Resistenza  $220 \Omega$

**Figura 4.1:** Caratteristiche V-I resistenze

(quando la corrente di pilotaggio vale 40 mA). La configurazione impostata è visibile in tabella 4.1b. Nel caso del convertitore  $I-V$ , oltre agli effetti di carico, si deve tener conto anche del massimo valore di tensione acquisibile dalla scheda, ovvero la massima tensione al singolo terminale del dispositivo connesso. Nel paragrafo 2.4 a pagina 27 si è visto che il sistema di adattamento del segnale da acquisire è gestito, per entrambi i pilotaggi, dallo stesso sistema *buffer-partitore* che è stato progettato per un segnale di ingresso massimo di 12 volt. Quindi la massima tensione a cui può portarsi il singolo terminale non può superare tale valore, pena la possibile distruzione della scheda di acquisizione. In ragione di ciò, il valore massimo della resistenza inserita al posto del *LED* non deve superare 300  $\Omega$ .

$$R_{max} < \frac{V_{max}}{I_{max}} \quad (4.1)$$

Attraverso successive variazioni del valore del potenziometro (fissato inizialmente a 250  $\Omega$ ) si è verificato il comportamento lineare del circuito su una resistenza massima di 220  $\Omega$ . Nella tabella 4.2b sono riportati i valori delle grandezze caratteristiche.

Tensione (V)	Corrente (A)	Potenza (W)		Tensione (V)	Corrente (A)	Potenza (W)
1,52E-01	4,49E-08	6,80E-09				
2,53E-01	7,48E-08	1,89E-08				
3,56E-01	1,04E-07	3,70E-08				
4,57E-01	1,34E-07	6,11E-08				
5,51E-01	1,64E-07	9,01E-08				
6,54E-01	1,92E-07	1,26E-07				
7,57E-01	2,22E-07	1,68E-07				
8,62E-01	2,53E-07	2,18E-07				
9,57E-01	2,82E-07	2,70E-07				
1,06E+00	3,12E-07	3,32E-07		1,93E+00	8,59E-03	1,66E-02
1,16E+00	3,42E-07	3,97E-07		2,52E+00	1,13E-02	2,84E-02
1,27E+00	3,71E-07	4,70E-07		3,10E+00	1,40E-02	4,33E-02
1,37E+00	4,01E-07	5,47E-07		3,68E+00	1,66E-02	6,12E-02
1,46E+00	4,30E-07	6,29E-07		4,27E+00	1,92E-02	8,19E-02
1,56E+00	4,60E-07	7,19E-07		4,86E+00	2,19E-02	1,06E-01
1,67E+00	4,89E-07	8,15E-07		5,44E+00	2,45E-02	1,34E-01
1,77E+00	5,19E-07	9,16E-07		6,01E+00	2,71E-02	1,63E-01
1,88E+00	5,48E-07	1,03E-06		6,60E+00	2,98E-02	1,96E-01
1,97E+00	5,78E-07	1,14E-06		7,18E+00	3,25E-02	2,33E-01
2,08E+00	6,07E-07	1,26E-06		7,76E+00	3,51E-02	2,73E-01
2,17E+00	6,37E-07	1,38E-06		8,35E+00	3,78E-02	3,16E-01
2,27E+00	6,66E-07	1,51E-06		8,79E+00	3,98E-02	3,50E-01
2,37E+00	6,96E-07	1,65E-06		8,82E+00	4,00E-02	3,53E-01
2,48E+00	7,25E-07	1,80E-06				
2,58E+00	7,55E-07	1,95E-06				
2,67E+00	7,85E-07	2,10E-06				
2,79E+00	8,15E-07	2,27E-06				
2,87E+00	8,45E-07	2,43E-06				
2,98E+00	8,74E-07	2,61E-06				
3,04E+00	8,89E-07	2,70E-06				

**(a)** Convertitore V-I

**(b)** Convertitore I-V

Tabella 4.2: Grandezze caratteristiche verifica linearità

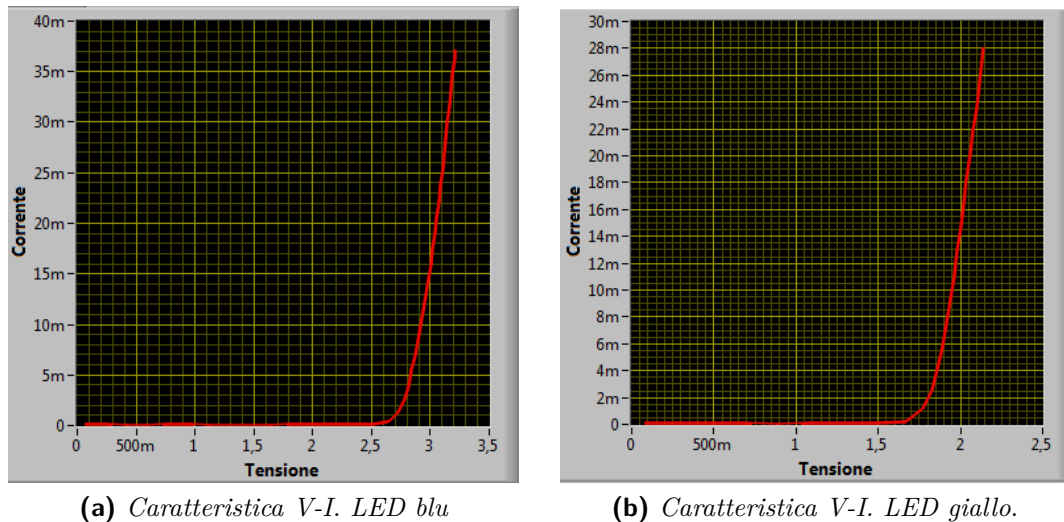
## 4.2 Caratterizzazione *LED*

Nella prima parte del paragrafo verranno paragonate le misure effettuate un *LED* che emette nel “giallo” con un *LED* che emette nel “blu”. Sono state scelte configurazioni di caratterizzazione diverse (tabella 4.3) per mettere in evidenza le diverse caratteristiche dei due *LED*.

Pilotaggio	F. scala	Livelli	Range corrente	Pilotaggio	F. scala	Livelli	Range corrente
tensione	7	400	100 $\mu$ A - 100 $\mu$ A	tensione	5	250	100 $\mu$ A-100 $\mu$ A

(a) *LED blu* (b) *LED giallo*

**Tabella 4.3:** Configurazione caratteristica *LED* blu e giallo



**Figura 4.2:** Caratteristiche V-I. *LED* blu e giallo

La configurazione scelta per entrambi i *LED* consente di ottenere considerevoli valori di corrente, per il *LED* blu si hanno 37.2mA di corrente mentre per il giallo 28.2mA (figura4.2). Come ci si aspettava la tensione di soglia del *LED* blu è maggiore della tensione di soglia del *LED* giallo. Nella tabella 4.4 sono riportati i valori delle grandezze caratteristiche.



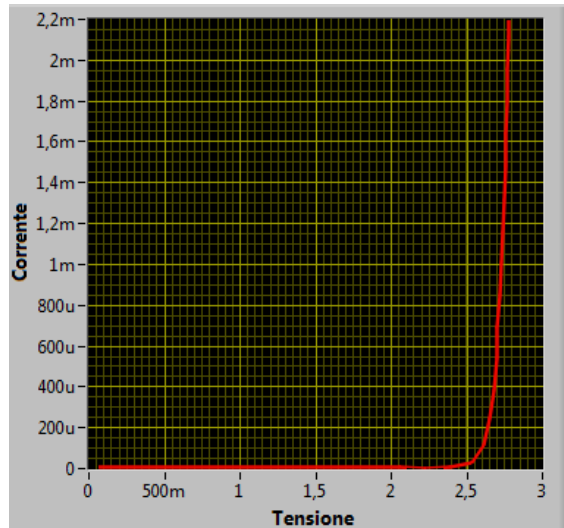
Tensione (V)	Corrente (A)	Potenza (W)		Tensione (V)	Corrente (A)	Potenza (W)
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2,46E-01	7,28E-05	1,79E-05		2,86E-01	6,97E-05	1,99E-05
4,23E-01	6,04E-05	2,55E-05		4,85E-01	1,10E-04	5,34E-05
5,97E-01	5,42E-05	3,24E-05		6,81E-01	6,35E-05	4,32E-05
7,74E-01	7,28E-05	5,63E-05		8,87E-01	4,80E-05	4,25E-05
9,50E-01	8,52E-05	8,10E-05		1,09E+00	6,35E-05	6,89E-05
1,12E+00	5,73E-05	6,43E-05		1,28E+00	6,97E-05	8,95E-05
1,30E+00	5,73E-05	7,46E-05		1,49E+00	5,73E-05	8,51E-05
1,47E+00	4,80E-05	7,04E-05		1,67E+00	2,19E-04	3,65E-04
1,65E+00	6,35E-05	1,05E-04		1,77E+00	1,15E-03	2,04E-03
1,82E+00	8,83E-05	1,61E-04		1,83E+00	2,57E-03	4,69E-03
1,99E+00	7,90E-05	1,57E-04		1,86E+00	4,14E-03	7,70E-03
2,17E+00	7,28E-05	1,58E-04		1,89E+00	5,81E-03	1,10E-02
2,34E+00	8,21E-05	1,92E-04		1,91E+00	7,54E-03	1,44E-02
2,51E+00	1,01E-04	2,53E-04		1,94E+00	9,30E-03	1,80E-02
2,65E+00	4,36E-04	1,15E-03		1,96E+00	1,11E-02	2,17E-02
2,73E+00	1,37E-03	3,73E-03		1,98E+00	1,29E-02	2,56E-02
2,78E+00	2,64E-03	7,33E-03		2,00E+00	1,47E-02	2,94E-02
2,81E+00	3,98E-03	1,12E-02		2,02E+00	1,64E-02	3,32E-02
2,84E+00	5,47E-03	1,55E-02		2,04E+00	1,82E-02	3,71E-02
2,87E+00	6,96E-03	2,00E-02		2,06E+00	2,01E-02	4,13E-02
2,90E+00	8,40E-03	2,43E-02		2,08E+00	2,19E-02	4,54E-02
2,92E+00	9,91E-03	2,90E-02		2,10E+00	2,35E-02	4,93E-02
2,94E+00	1,14E-02	3,36E-02		2,11E+00	2,54E-02	5,37E-02
2,97E+00	1,30E-02	3,84E-02		2,13E+00	2,72E-02	5,80E-02
2,98E+00	1,45E-02	4,31E-02		2,14E+00	2,82E-02	6,02E-02
3,00E+00	1,60E-02	4,81E-02				
3,02E+00	1,76E-02	5,30E-02				
3,04E+00	1,91E-02	5,79E-02				
3,05E+00	2,06E-02	6,28E-02				
3,08E+00	2,21E-02	6,81E-02				
3,08E+00	2,37E-02	7,32E-02				
3,10E+00	2,53E-02	7,86E-02				
3,12E+00	2,69E-02	8,38E-02				
3,13E+00	2,84E-02	8,89E-02				
3,15E+00	3,00E-02	9,43E-02				
3,16E+00	3,16E-02	1,00E-01				
3,18E+00	3,32E-02	1,05E-01				
3,19E+00	3,47E-02	1,11E-01				
3,20E+00	3,64E-02	1,17E-01				
3,21E+00	3,72E-02	1,20E-01				

(a) LED blu

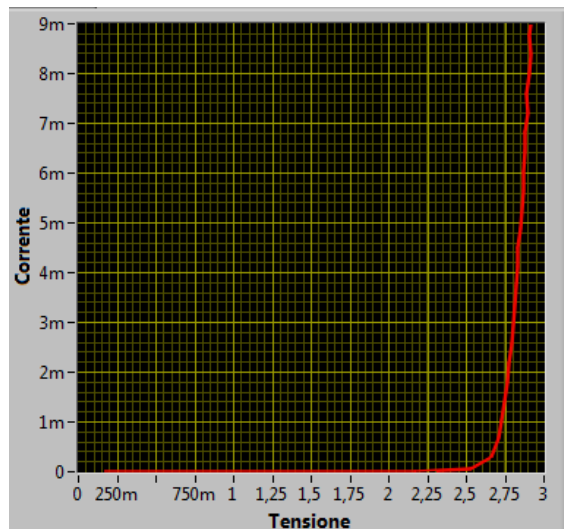
(b) LED giallo

Tabella 4.4: Grandezze caratteristiche LED blu e giallo

Nelle pagine seguenti sono riportati i risultati delle misure effettuate per il solo *LED* blu con range di corrente  $10\ \mu\text{A}$ - $10\ \text{mA}$  e  $1\ \text{nA}$ - $1\ \mu\text{A}$ . In corrispondenza al range  $1\ \text{nA}$ - $1\ \mu\text{A}$  si può osservare che il minimo valore di corrente rilevato dal *S-M* vale circa  $0.5\ \text{nA}$ . Questo valore è stato ottenuto scegliendo una configurazione che associa al primo livello acquisito un valore minore di  $10\ \text{mV}$  che equivale al minimo valore che si è imposto nel calcolo dei possibili intervalli di corrente.



(a) Fondo scala 5 V. 300 Livelli



(b) Fondo scala 12 V. 300 Livelli

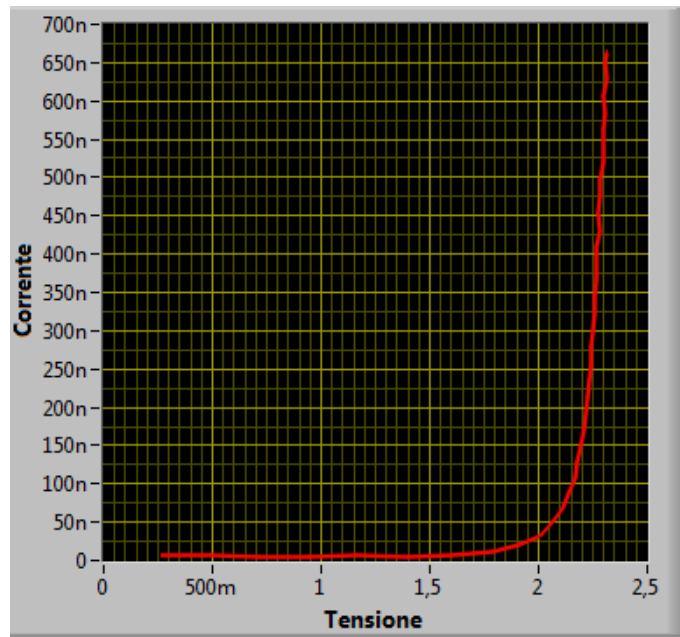
**Figura 4.3:** Caratteristiche V-I. Range corrente  $10\ \mu\text{A}$ - $10\ \text{mA}$

Tensione (V)	Corrente (A)	Potenza (W)	Tensione (V)	Corrente (A)	Potenza (W)
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2,32E-01	5,73E-06	1,33E-06	5,72E-01	2,93E-06	1,68E-06
4,01E-01	8,21E-06	3,30E-06	9,72E-01	4,80E-06	4,66E-06
5,65E-01	4,48E-06	2,54E-06	1,38E+00	7,28E-06	1,00E-05
7,36E-01	4,17E-06	3,07E-06	1,77E+00	7,28E-06	1,29E-05
9,02E-01	6,04E-06	5,45E-06	2,17E+00	5,11E-06	1,11E-05
1,07E+00	6,97E-06	7,47E-06	2,53E+00	4,70E-05	1,19E-04
1,23E+00	9,14E-06	1,13E-05	2,66E+00	3,05E-04	8,09E-04
1,40E+00	8,21E-06	1,15E-05	2,71E+00	6,68E-04	1,81E-03
1,57E+00	6,35E-06	9,97E-06	2,73E+00	1,04E-03	2,85E-03
1,73E+00	6,35E-06	1,10E-05	2,74E+00	1,42E-03	3,90E-03
1,90E+00	8,21E-06	1,56E-05	2,77E+00	1,80E-03	4,99E-03
2,06E+00	8,21E-06	1,69E-05	2,78E+00	2,18E-03	6,05E-03
2,22E+00	2,00E-06	4,45E-06	2,79E+00	2,56E-03	7,15E-03
2,39E+00	9,14E-06	2,19E-05	2,80E+00	2,95E-03	8,28E-03
2,53E+00	2,93E-05	7,42E-05	2,81E+00	3,33E-03	9,37E-03
2,61E+00	1,16E-04	3,02E-04	2,82E+00	3,72E-03	1,05E-02
2,65E+00	2,46E-04	6,53E-04	2,83E+00	4,11E-03	1,16E-02
2,68E+00	3,84E-04	1,03E-03	2,83E+00	4,49E-03	1,27E-02
2,70E+00	5,38E-04	1,45E-03	2,85E+00	4,88E-03	1,39E-02
2,70E+00	6,92E-04	1,87E-03	2,86E+00	5,27E-03	1,50E-02
2,72E+00	8,48E-04	2,31E-03	2,86E+00	5,65E-03	1,62E-02
2,73E+00	1,00E-03	2,74E-03	2,87E+00	6,04E-03	1,73E-02
2,74E+00	1,16E-03	3,17E-03	2,88E+00	6,43E-03	1,85E-02
2,75E+00	1,32E-03	3,63E-03	2,88E+00	6,82E-03	1,97E-02
2,76E+00	1,48E-03	4,07E-03	2,90E+00	7,21E-03	2,09E-02
2,76E+00	1,64E-03	4,51E-03	2,89E+00	7,60E-03	2,20E-02
2,77E+00	1,80E-03	4,97E-03	2,90E+00	8,00E-03	2,32E-02
2,77E+00	1,95E-03	5,40E-03	2,92E+00	8,39E-03	2,45E-02
2,78E+00	2,11E-03	5,86E-03	2,91E+00	8,78E-03	2,55E-02
2,78E+00	2,20E-03	6,11E-03	2,92E+00	8,99E-03	2,62E-02

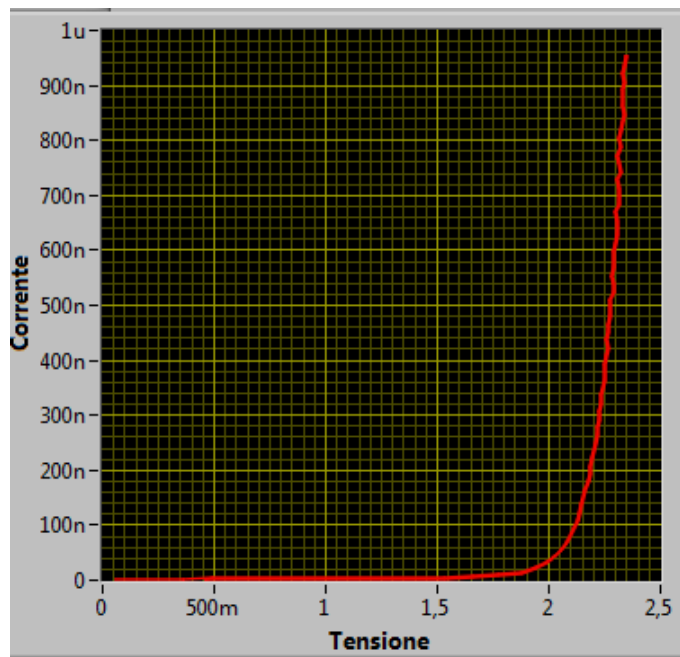
(a) LED blu

(b) LED giallo

Tabella 4.5: Grandezze caratteristiche. Range corrente 10  $\mu$ A-10 mA



(a) Fondo scala 9 V. 400 Livelli



(b) Caratteristica V-I. Fondo scala 12 V. 800 Livelli

Figura 4.4: Caratteristiche V-I. Range corrente 1 nA-10 μA

Tensione (V)	Corrente (A)	Potenza (W)	Tensione (V)	Corrente (A)	Potenza (W)
2,66E-01	6,32E-09	1,68E-09	2,15E-01	5,42E-10	1,17E-10
4,92E-01	5,73E-09	2,82E-09	3,61E-01	6,97E-10	2,51E-10
7,20E-01	5,67E-09	4,08E-09	4,95E-01	2,41E-09	1,19E-09
9,45E-01	5,60E-09	5,30E-09	6,44E-01	2,31E-09	1,49E-09
1,17E+00	5,76E-09	6,71E-09	7,94E-01	2,75E-09	2,18E-09
1,40E+00	5,64E-09	7,87E-09	9,32E-01	3,40E-09	3,17E-09
1,61E+00	6,19E-09	9,96E-09	1,09E+00	3,55E-09	3,86E-09
1,79E+00	1,05E-08	1,87E-08	1,23E+00	3,77E-09	4,64E-09
1,92E+00	1,98E-08	3,79E-08	1,38E+00	3,99E-09	5,49E-09
2,01E+00	3,32E-08	6,66E-08	1,53E+00	3,77E-09	5,77E-09
2,07E+00	4,96E-08	1,03E-07	1,66E+00	5,45E-09	9,04E-09
2,11E+00	6,77E-08	1,43E-07	1,77E+00	8,68E-09	1,54E-08
2,14E+00	8,69E-08	1,86E-07	1,88E+00	1,34E-08	2,51E-08
2,17E+00	1,07E-07	2,33E-07	1,94E+00	2,22E-08	4,31E-08
2,18E+00	1,29E-07	2,80E-07	1,99E+00	3,21E-08	6,38E-08
2,20E+00	1,50E-07	3,29E-07	2,03E+00	4,27E-08	8,64E-08
2,21E+00	1,71E-07	3,77E-07	2,06E+00	5,50E-08	1,13E-07
2,22E+00	1,92E-07	4,26E-07	2,08E+00	6,76E-08	1,41E-07
2,23E+00	2,14E-07	4,77E-07	2,10E+00	8,05E-08	1,69E-07
2,23E+00	2,35E-07	5,24E-07	2,11E+00	9,43E-08	1,99E-07
2,24E+00	2,57E-07	5,75E-07	2,13E+00	1,08E-07	2,30E-07
2,25E+00	2,79E-07	6,25E-07	2,13E+00	1,22E-07	2,61E-07
2,25E+00	3,00E-07	6,75E-07	⋮	⋮	⋮
2,26E+00	3,22E-07	7,27E-07	2,32E+00	7,13E-07	1,65E-06
2,26E+00	3,44E-07	7,77E-07	2,31E+00	7,28E-07	1,68E-06
2,27E+00	3,65E-07	8,29E-07	2,32E+00	7,43E-07	1,72E-06
2,27E+00	3,87E-07	8,78E-07	2,31E+00	7,58E-07	1,75E-06
2,27E+00	4,09E-07	9,28E-07	2,31E+00	7,72E-07	1,78E-06
2,28E+00	4,31E-07	9,82E-07	2,32E+00	7,87E-07	1,83E-06
2,27E+00	4,53E-07	1,03E-06	2,31E+00	8,03E-07	1,86E-06
2,28E+00	4,75E-07	1,09E-06	2,33E+00	8,17E-07	1,90E-06
2,28E+00	4,97E-07	1,14E-06	2,33E+00	8,32E-07	1,94E-06
2,30E+00	5,19E-07	1,19E-06	2,34E+00	8,47E-07	1,98E-06
2,30E+00	5,41E-07	1,24E-06	2,33E+00	8,62E-07	2,01E-06
2,30E+00	5,62E-07	1,29E-06	2,33E+00	8,76E-07	2,04E-06
2,31E+00	5,84E-07	1,35E-06	2,33E+00	8,91E-07	2,08E-06
2,30E+00	6,06E-07	1,40E-06	2,34E+00	9,06E-07	2,12E-06
2,31E+00	6,28E-07	1,45E-06	2,33E+00	9,20E-07	2,15E-06
2,31E+00	6,50E-07	1,50E-06	2,34E+00	9,35E-07	2,19E-06
2,31E+00	6,64E-07	1,54E-06	2,35E+00	9,50E-07	2,23E-06
2,32E+00	6,64E-07	1,54E-06	2,35E+00	9,58E-07	2,25E-06

(a) LED blu

(b) LED giallo

Tabella 4.6: Grandezze caratteristiche. Range corrente 1 nA-10  $\mu$ A

### 4.3 Misure a corrente variabile

Anche se, come detto, il pilotaggio in corrente non consente di esplorare in maniera completa la caratteristica, si è ritenuto interessante analizzare il comportamento dei *LED* pilotati con corrente variabile. In questo paragrafo sono riportati i risultati di una misura effettuata sullo stesso *LED* blu utilizzato per il pilotaggio in tensione. L'intervallo di pilotaggio scelto è il massimo che riesce a dare il *S-M* (5 ma – 40 mA), per il quale sono stati scelti 300 livelli di corrente. Nella figura 4.5 è rappresentata la caratteristica mentre nella tabella 4.7 i valori delle grandezze caratteristiche.

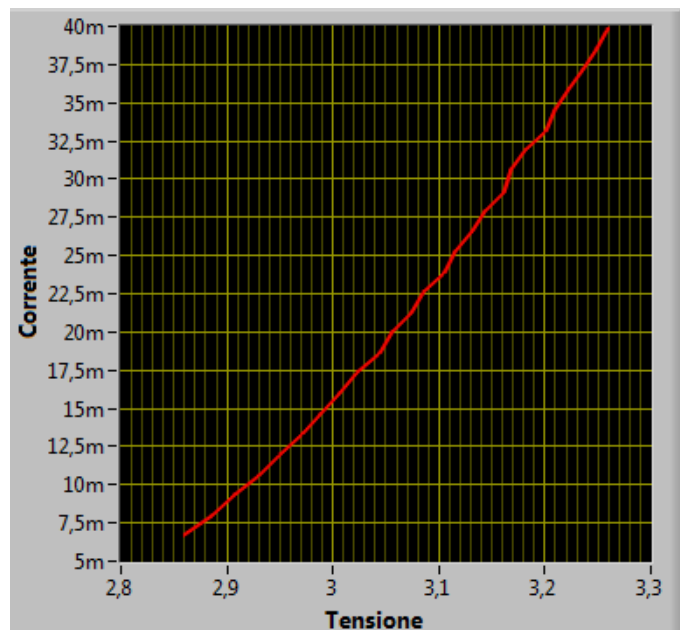


Figura 4.5: Pilotaggio con corrente variabile

Tensione (V)	Corrente (A)	Potenza (W)
2,86E+00	6,69E-03	1,91E-02
2,89E+00	8,00E-03	2,31E-02
2,91E+00	9,31E-03	2,71E-02
2,93E+00	1,06E-02	3,12E-02
2,95E+00	1,20E-02	3,54E-02
2,97E+00	1,33E-02	3,96E-02
2,99E+00	1,47E-02	4,38E-02
3,01E+00	1,60E-02	4,81E-02
3,02E+00	1,73E-02	5,24E-02
3,04E+00	1,86E-02	5,66E-02
3,06E+00	2,00E-02	6,10E-02
3,07E+00	2,13E-02	6,54E-02
3,09E+00	2,26E-02	6,97E-02
3,11E+00	2,39E-02	7,42E-02
3,12E+00	2,52E-02	7,86E-02
3,13E+00	2,66E-02	8,32E-02
3,14E+00	2,79E-02	8,75E-02
3,16E+00	2,92E-02	9,22E-02
3,17E+00	3,06E-02	9,68E-02
3,18E+00	3,19E-02	1,01E-01
3,20E+00	3,32E-02	1,06E-01
3,21E+00	3,45E-02	1,11E-01
3,22E+00	3,59E-02	1,16E-01
3,24E+00	3,72E-02	1,20E-01
3,25E+00	3,85E-02	1,25E-01
3,26E+00	3,98E-02	1,30E-01
3,26E+00	3,99E-02	1,30E-01

(a) LED blu

**Tabella 4.7:** Grandezze caratteristiche. Pilotaggio in corrente

# Conclusioni

Dalle misure effettuate si nota che il *Source Meter* realizzato è in grado di misurare correnti molto piccole, dell'ordine del nA: ciò rende lo strumento competitivo con i *Source Meter* in commercio. La scheda di acquisizione, coadiuvata dal circuito, hanno consentito di ottenere prestazioni accettabili e a basso costo. La personalizzazione del pilotaggio e della misura, unita alla gestione di tutto il sistema attraverso il calcolatore, rendono il *S-M* uno strumento versatile e di semplice utilizzo. Il primo capitolo di questa tesi è stato redatto, in modo da poter essere utilizzato come manuale d'uso dello strumento.

Il *S-M* sta alla base del sistema di caratterizzazione completo che si sta realizzando presso il *Laboratorio di Tecniche Laser* del *Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e delle Telecomunicazioni dell'Università degli Studi di Palermo*, infatti, integrandolo ad un sistema per la caratterizzazione fotometrica si realizza uno *spettroradiometro* notevolmente economico.



# Bibliografia

- [1] NATIONAL INSTRUMENTS, *NI USB-6008/6009 User Guide and Specifications*, 2008, <http://www.ni.com/pdf/manuals/3713031.pdf>.
- [2] Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith, *Circuiti per la microelettronica*, 2005, Edises.
- [3] P. Horowitz, W. Hill, *The Art of Electronics*, 1989, Cambridge University Press.
- [4] NATIONAL INSTRUMENTS, *LabVIEW: user manual*, 2003, <http://www.ni.com/pdf/manuals/320999e.pdf>.
- [5] NATIONAL INSTRUMENTS, *NI-DAQmx for USB Devices Getting Started Guide*, 2010, [http://www.ni.com/pdf/manuals/374147j\\_02.pdf](http://www.ni.com/pdf/manuals/374147j_02.pdf).

# Appendice A

## Datasheet

In questa appendice vengono riportati un estratto dei datasheet relativi ai componenti integrati utilizzati in questo lavoro di tesi ai quali si è fatto riferimento nel capitolo 2. L'ordine di inserimento è il seguente:

1. Decoder CD74HCT238E
2. Transistor Array ULN2003AN
3. Amplificatore operazionale LF347N
4. Amplificatore operazionale MC33076P1
5. Amplificatore operazionale OPA124
6. NPN Transistor 2N222A
7. Relè Reed SPST
8. Relè Reed SPDT



Data sheet acquired from Harris Semiconductor  
SCHS1471

**CD54/74HC138, CD54/74HCT138,  
CD54/74HC238, CD54/74HCT238**

**High-Speed CMOS Logic 3- to 8-Line Decoder/  
Demultiplexer Inverting and Noninverting**

October 1997 - Revised August 2004

**Features**

- Select One Of Eight Data Outputs  
Active Low for 138, Active High for 238
- I/O Port or Memory Selector
- Three Enable Inputs to Simplify Cascading
- Typical Propagation Delay of 13 ns at  $V_{CC} = 5\text{ V}$ ,  
 $C_L = 15\text{ pF}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$
- Fanout (Over Temperature Range)
  - Standard Outputs . . . . . 10 LSTTL Loads
  - Bus Driver Outputs . . . . . 15 LSTTL Loads
- Wide Operating Temperature Range . . .  $-55^\circ\text{C}$  to  $125^\circ\text{C}$
- Balanced Propagation Delay and Transition Times
- Significant Power Reduction Compared to LSTTL Logic ICs
- HC Types
  - 2 V to 6 V Operation
  - High Noise Immunity:  $N_{IL} = 30\%$ ,  $N_{IH} = 30\%$  of  $V_{CC}$  at  $V_{CC} = 5\text{ V}$
- HCT Types
  - 4.5-V to 5.5-V Operation
  - Direct LSTTL Input Logic Compatibility,  $V_{IL} = 0.8\text{ V (Max)}$ ,  $V_{IH} = 2\text{ V (Min)}$
  - CMOS Input Compatibility,  $I_I \leq 1\mu\text{A}$  at  $V_{OL}$ ,  $V_{OH}$

**Description**

The 'HC138, 'HC238, 'HCT138, and 'HCT238 are high-speed silicon-gate CMOS decoders well suited to memory address decoding or data-routing applications. Both circuits feature low power consumption usually associated with CMOS circuitry, yet have speeds comparable to low-power Schottky TTL logic. Both circuits have three binary select inputs (A0, A1, and A2). If the device is enabled, these inputs determine which one of the eight normally high outputs of the HC/HCT138 series go low or which of the normally low outputs of the HC/HCT238 series go high.

Two active low and one active high enables (E1, E2, and E3) are provided to ease the cascading of decoders. The decoder's eight outputs can drive ten low-power Schottky TTL equivalent loads.

**Ordering Information**

PART NUMBER	TEMP. RANGE (°C)	PACKAGE
CD54HC138F3A	-55 to 125	16 Ld CERDIP
CD54HC238F3A	-55 to 125	16 Ld CERDIP
CD54HCT138F3A	-55 to 125	16 Ld CERDIP
CD54HCT238F3A	-55 to 125	16 Ld CERDIP
CD74HC138E	-55 to 125	16 Ld PDIP
CD74HC138M	-55 to 125	16 Ld SOIC
CD74HC138MT	-55 to 125	16 Ld SOIC
CD74HC138M96	-55 to 125	16 Ld SOIC
CD74HC238E	-55 to 125	16 Ld PDIP
CD74HC238M	-55 to 125	16 Ld SOIC
CD74HC238MT	-55 to 125	16 Ld SOIC
CD74HC238M96	-55 to 125	16 Ld SOIC
CD74HC238NSR	-55 to 125	16 Ld SOP
CD74HC238PW	-55 to 125	16 Ld TSSOP
CD74HC238PWR	-55 to 125	16 Ld TSSOP
CD74HC238PWT	-55 to 125	16 Ld TSSOP
CD74HCT138E	-55 to 125	16 Ld PDIP
CD74HCT138M	-55 to 125	16 Ld SOIC
CD74HCT138MT	-55 to 125	16 Ld SOIC
CD74HCT138M96	-55 to 125	16 Ld SOIC
CD74HCT238E	-55 to 125	16 Ld PDIP
CD74HCT238M	-55 to 125	16 Ld SOIC
CD74HCT238M96	-55 to 125	16 Ld SOIC

NOTE: When ordering, use the entire part number. The suffixes 96 and R denote tape and reel. The suffix T denotes a small-quantity reel of 250.

CAUTION: These devices are sensitive to electrostatic discharge. Users should follow proper IC Handling Procedures.  
Copyright © 2004, Texas Instruments Incorporated

**CD54/74HC138, CD54/74HCT138, CD54/74HC238, CD54/74HCT238**

**Pinout**

CD54HC138, CD54HCT138, CD54HC238, CD54HCT238  
(CERDIP)  
CD74HC138, CD74HCT138, CD74HCT238  
(PDIP, SOIC)  
CD74HC238  
(PDIP, SOIC, SOP, TSSOP)  
TOP VIEW

**Functional Diagram**

Signal names in parentheses are for 'HC138 and 'HCT138.

**TRUTH TABLE 'HC138, 'HCT138**

INPUTS						OUTPUTS							
ENABLE			ADDRESS			Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
E3	E2	E1	A2	A1	A0	Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
X	X	H	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H
L	X	X	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H
X	H	X	X	X	X	H	H	H	H	H	H	H	H
H	L	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H
H	L	L	L	L	H	H	L	H	H	H	H	H	H
H	L	L	L	H	L	H	H	L	H	H	H	H	H
H	L	L	L	H	H	H	H	H	L	H	H	H	H
H	L	L	H	L	H	H	H	H	H	L	H	H	H
H	L	L	H	H	L	H	H	H	H	H	L	H	H
H	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H	H	L	L

H = High Voltage Level, L = Low Voltage Level, X = Don't Care

**TRUTH TABLE 'HC238, 'HCT238**

INPUTS						OUTPUTS							
ENABLE			ADDRESS			Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
E3	E2	E1	A2	A1	A0	Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
X	X	H	X	X	X	L	L	L	L	L	L	L	L
L	X	X	X	X	X	L	L	L	L	L	L	L	L
X	H	X	X	X	X	L	L	L	L	L	L	L	L
H	L	L	L	L	L	H	L	L	L	L	L	L	L
H	L	L	L	L	H	L	H	L	L	L	L	L	L
H	L	L	L	H	L	L	L	H	L	L	L	L	L
H	L	L	L	H	H	L	L	L	H	L	L	L	L
H	L	L	H	L	L	L	L	L	L	H	L	L	L
H	L	L	H	H	L	L	L	L	L	L	H	L	L
H	L	L	L	H	H	L	L	L	L	L	L	H	L
H	L	L	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L	H

H = High Voltage Level, L = Low Voltage Level, X = Don't Care

**CD54/74HC138, CD54/74HCT138, CD54/74HC238, CD54/74HCT238**

**Absolute Maximum Ratings**

DC Supply Voltage,  $V_{CC}$  ..... -0.5V to 7V  
 DC Input Diode Current,  $I_{IK}$   
 For  $V_I < -0.5V$  or  $V_I > V_{CC} + 0.5V$  .....  $\pm 20mA$   
 DC Output Diode Current,  $I_{OK}$   
 For  $V_O < -0.5V$  or  $V_O > V_{CC} + 0.5V$  .....  $\pm 20mA$   
 DC Output Source or Sink Current per Output Pin,  $I_O$   
 For  $V_O > -0.5V$  or  $V_O < V_{CC} + 0.5V$  .....  $\pm 25mA$   
 DC  $V_{CC}$  or Ground Current,  $I_{CC}$  or  $I_{GND}$  .....  $\pm 50mA$

**Thermal Information**

Package Thermal Impedance,  $\theta_{JA}$  (see Note 1):  
 E (PDIP) Package .....  $67^{\circ}C/W$   
 M (SOIC) Package .....  $73^{\circ}C/W$   
 NS (SOP) Package .....  $64^{\circ}C/W$   
 PW (TSSOP) Package .....  $108^{\circ}C/W$   
 Maximum Junction Temperature .....  $150^{\circ}C$   
 Maximum Storage Temperature Range .....  $-65^{\circ}C$  to  $150^{\circ}C$   
 Maximum Lead Temperature (Soldering 10s) .....  $300^{\circ}C$   
 (SOIC - Lead Tips Only)

**Operating Conditions**

Temperature Range ( $T_A$ ) .....  $-55^{\circ}C$  to  $125^{\circ}C$   
 Supply Voltage Range,  $V_{CC}$   
 HC Types ..... 2V to 6V  
 HCT Types ..... 4.5V to 5.5V  
 DC Input or Output Voltage,  $V_I$ ,  $V_O$  ..... 0V to  $V_{CC}$   
 Input Rise and Fall Time  
 2V ..... 1000ns (Max)  
 4.5V ..... 500ns (Max)  
 6V ..... 400ns (Max)

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating, and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

**NOTE:**

1. The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-7.

**DC Electrical Specifications**

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS		$V_{CC}$ (V)	25°C			-40°C TO 85°C		-55°C TO 125°C		UNITS
		$V_I$ (V)	$I_O$ (mA)		MIN	TYP	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	
<b>HC TYPES</b>												
High Level Input Voltage	$V_{IH}$	-	-	2	1.5	-	-	1.5	-	1.5	-	V
				4.5	3.15	-	-	3.15	-	3.15	-	V
				6	4.2	-	-	4.2	-	4.2	-	V
Low Level Input Voltage	$V_{IL}$	-	-	2	-	-	0.5	-	0.5	-	0.5	V
				4.5	-	-	1.35	-	1.35	-	1.35	V
				6	-	-	1.8	-	1.8	-	1.8	V
High Level Output Voltage CMOS Loads	$V_{OH}$	$V_{IH}$ or $V_{IL}$	-0.02	2	1.9	-	-	1.9	-	1.9	-	V
			-0.02	4.5	4.4	-	-	4.4	-	4.4	-	V
			-0.02	6	5.9	-	-	5.9	-	5.9	-	V
High Level Output Voltage TTL Loads	$V_{OH}$	$V_{IH}$ or $V_{IL}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	V
			-4	4.5	3.98	-	-	3.84	-	3.7	-	V
			-5.2	6	5.48	-	-	5.34	-	5.2	-	V
Low Level Output Voltage CMOS Loads	$V_{OL}$	$V_{IH}$ or $V_{IL}$	0.02	2	-	-	0.1	-	0.1	-	0.1	V
			0.02	4.5	-	-	0.1	-	0.1	-	0.1	V
			0.02	6	-	-	0.1	-	0.1	-	0.1	V
Low Level Output Voltage TTL Loads	$V_{OL}$	$V_{IH}$ or $V_{IL}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	V
			4	4.5	-	-	0.26	-	0.33	-	0.4	V
			5.2	6	-	-	0.26	-	0.33	-	0.4	V
Input Leakage Current	$I_I$	$V_{CC}$ or GND	-	6	-	-	$\pm 0.1$	-	$\pm 1$	-	$\pm 1$	$\mu A$
Quiescent Device Current	$I_{CC}$	$V_{CC}$ or GND	0	6	-	-	8	-	80	-	160	$\mu A$

**CD54/74HC138, CD54/74HCT138, CD54/74HC238, CD54/74HCT238**

**DC Electrical Specifications (Continued)**

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS		V <sub>CC</sub> (V)	25°C			-40°C TO 85°C		-55°C TO 125°C		UNITS
		V <sub>I</sub> (V)	I <sub>O</sub> (mA)		MIN	TYP	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	
		<b>HCT TYPES</b>										
High Level Input Voltage	V <sub>IH</sub>	-	-	4.5 to 5.5	2	-	-	2	-	2	-	V
Low Level Input Voltage	V <sub>IL</sub>	-	-	4.5 to 5.5	-	-	0.8	-	0.8	-	0.8	V
High Level Output Voltage CMOS Loads	V <sub>OH</sub>	V <sub>IH</sub> or V <sub>IL</sub>	-0.02	4.5	4.4	-	-	4.4	-	4.4	-	V
High Level Output Voltage TTL Loads			-4	4.5	3.98	-	-	3.84	-	3.7	-	V
Low Level Output Voltage CMOS Loads	V <sub>OL</sub>	V <sub>IH</sub> or V <sub>IL</sub>	0.02	4.5	-	-	0.1	-	0.1	-	0.1	V
Low Level Output Voltage TTL Loads			4	4.5	-	-	0.26	-	0.33	-	0.4	V
Input Leakage Current	I <sub>I</sub>	V <sub>CC</sub> and GND	0	5.5	-	-	±0.1	-	±1	-	±1	µA
Quiescent Device Current	I <sub>CC</sub>	V <sub>CC</sub> or GND	0	5.5	-	-	8	-	80	-	160	µA
Additional Quiescent Device Current Per Input Pin: 1 Unit Load	ΔI <sub>CC</sub> (Note 2)	V <sub>CC</sub> -2.1	-	4.5 to 5.5	-	100	360	-	450	-	490	µA

NOTE:

2. For dual-supply systems, theoretical worst case (V<sub>I</sub> = 2.4V, V<sub>CC</sub> = 5.5V) specification is 1.8mA.

**HCT Input Loading Table**

INPUT	UNIT LOADS
A0-A2	1.5
E1, E2	1.25
E3	1

NOTE: Unit Load is ΔI<sub>CC</sub> limit specified in DC Electrical Table, e.g., 360µA max at 25°C.

**Switching Specifications** Input t<sub>r</sub>, t<sub>f</sub> = 6ns

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	V <sub>CC</sub> (V)	25°C			-40°C TO 85°C		-55°C TO 125°C		UNITS
				MIN	TYP	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	
<b>HC TYPES</b>											
Propagation Delay Address to Output	t <sub>PLH</sub> , t <sub>PHL</sub>	C <sub>L</sub> = 50pF	2	-	-	150	-	190	-	225	ns
			4.5	-	-	30	-	38	-	45	ns
		C <sub>L</sub> = 15pF	5	-	13	-	-	-	-	-	ns
		C <sub>L</sub> = 50pF	6	-	-	26	-	33	-	38	ns

**CD54/74HC138, CD54/74HCT138, CD54/74HC238, CD54/74HCT238**

**Switching Specifications** Input  $t_r, t_f = 6\text{ ns}$  (Continued)

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	$V_{CC}$ (V)	25°C			-40°C TO 85°C		-55°C TO 125°C		UNITS
				MIN	TYP	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	
Enable to Output HC/HCT138	$t_{PLH}, t_{PHL}$	$C_L = 50\text{ pF}$	2	-	-	150	-	190	-	265	ns
			4.5	-	-	30	-	38	-	53	ns
			6	-	-	26	-	33	-	45	ns
Output Transition Time (Figure 1)	$t_{TLH}, t_{THL}$	$C_L = 50\text{ pF}$	2	-	-	75	-	95	-	110	ns
			4.5	-	-	15	-	19	-	22	ns
			6	-	-	13	-	16	-	19	ns
Power Dissipation Capacitance (Notes 3, 4)	$C_{PD}$	$C_L = 15\text{ pF}$	5	-	67	-	-	-	-	-	pF
Input Capacitance	$C_{IN}$	-	-	-	-	10	-	10	-	10	pF
<b>HCT TYPES</b>											
Propagation Delay Address to Output	$t_{PLH}, t_{PHL}$	$C_L = 50\text{ pF}$	4.5	-	-	35	-	44	-	53	ns
			$C_L = 15\text{ pF}$	5	-	14	-	-	-	-	-
Enable to Output HC/HCT138	$t_{PLH}, t_{PHL}$	$C_L = 50\text{ pF}$	4.5	-	-	35	-	44	-	53	ns
Enable to Output HC/HCT238	$t_{PLH}, t_{PHL}$	$C_L = 15\text{ pF}$	4.5	-	-	40	-	50	-	60	ns
Output Transition Time (Figure 2)	$t_{TLH}, t_{THL}$	$C_L = 50\text{ pF}$	4.5	-	-	15	-	19	-	22	ns
Power Dissipation Capacitance (Notes 3, 4)	$C_{PD}$	$C_L = 15\text{ pF}$	5	-	67	-	-	-	-	-	pF
Input Capacitance	$C_{IN}$	-	-	-	-	10	-	10	-	10	pF

NOTES:

- $C_{PD}$  is used to determine the dynamic power consumption, per gate.
- $P_D = V_{CC}^2 f_i (C_{PD} + C_L)$  where  $f_i$  = Input Frequency,  $C_L$  = Output Load Capacitance,  $V_{CC}$  = Supply Voltage.

**Test Circuits and Waveforms**

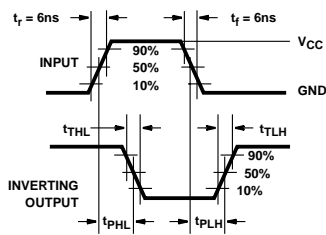


FIGURE 7. HC and HCU TRANSITION TIMES AND PROPAGATION DELAY TIMES, COMBINATION LOGIC

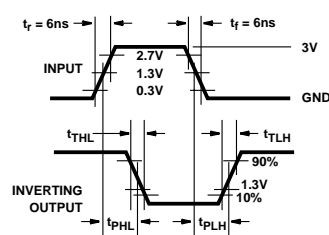


FIGURE 8. HCT TRANSITION TIMES AND PROPAGATION DELAY TIMES, COMBINATION LOGIC

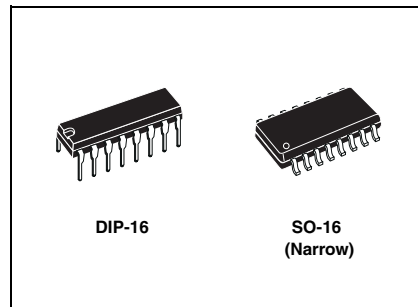


**ULN200xA  
ULN200xD1**

Seven darlington array

**Features**

- Seven darlington pairs per package
- Output current 500 mA per driver (600 mA peak)
- Output voltage 50 V
- Integrated suppression diodes for inductive loads
- Outputs can be paralleled for higher current
- TTL/CMOS/PMOS/DTL Compatible inputs
- Inputs pinned opposite outputs to simplify layout



**Description**

The ULN2001, ULN2002, ULN2003 and ULN2004 are high voltage, high current darlington arrays each containing seven open collector darlington pairs with common emitters. Each channel rated at 500 mA and can withstand peak currents of 600 mA. Suppression diodes are included for inductive load driving and the inputs are pinned opposite the outputs to simplify board layout.

These versatile devices are useful for driving a wide range of loads including solenoids, relays DC motors, LED displays filament lamps, thermal printheads and high power buffers.

The ULN2001A/2002A/2003A and 2004A are supplied in 16 pin plastic DIP packages with a copper leadframe to reduce thermal resistance. They are available also in small outline package (SO-16) as ULN2001D1/2002D1/2003D1/2004D1.

The versions interface to all common logic families:

- ULN2001 (general purpose, DTL, TTL, PMOS, CMOS)
- ULN2002 (14-25V PMOS)
- ULN2003 (5V TTL, CMOS)
- ULN2004 (6-15V CMOS, PMOS)

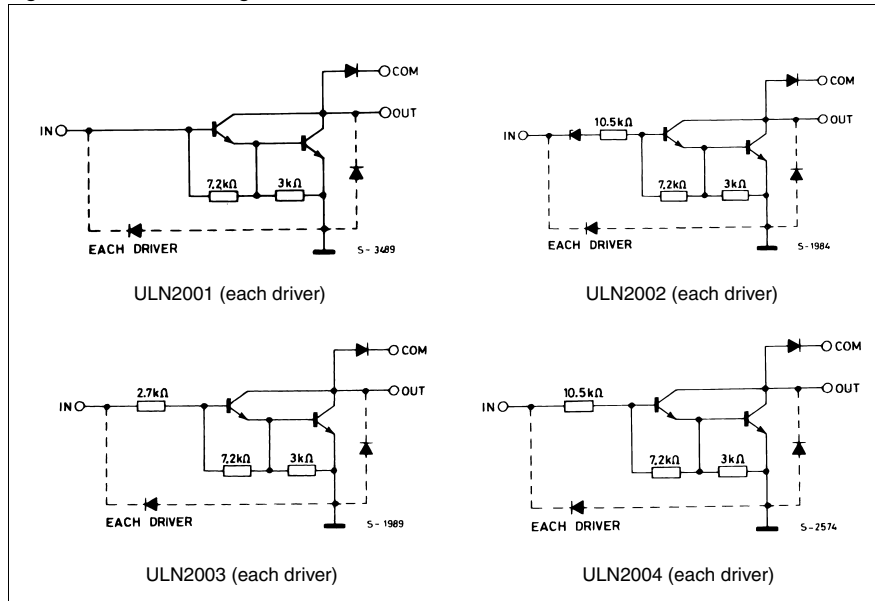
**Table 1. Device summary**

Order code	
ULN2001A	ULN2001D1013TR
ULN2002A	ULN2002D1013TR
ULN2003A	ULN2003D1013TR
ULN2004A	ULN2004D1013TR



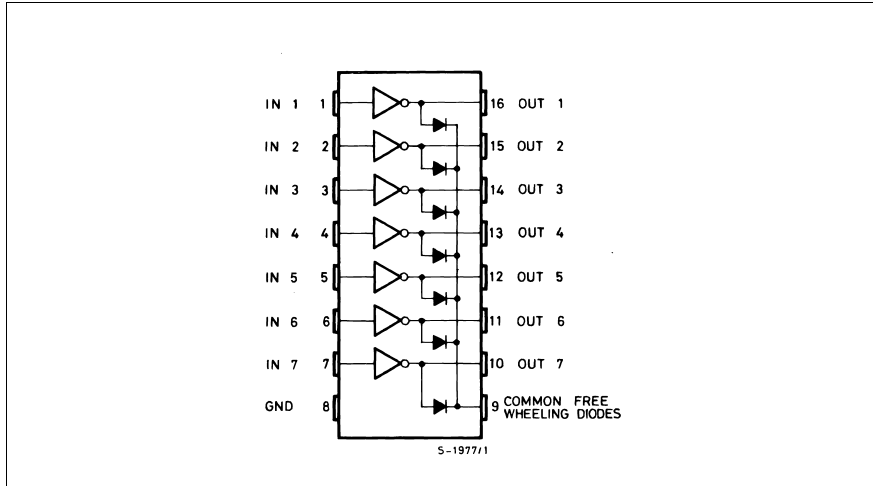
# 1 Diagram

Figure 1. Schematic diagram



## 2 Pin configuration

Figure 2. Pin connections (top view)



ULN200xA - ULN200xD1

Maximum ratings

### 3 Maximum ratings

**Table 2. Absolute maximum ratings**

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_O$	Output voltage	50	V
$V_I$	Input voltage (for ULN2002A/D - 2003A/D - 2004A/D)	30	V
$I_C$	Continuous collector current	500	mA
$I_B$	Continuous base current	25	mA
$T_A$	Operating ambient temperature range	- 20 to 85	°C
$T_{STG}$	Storage temperature range	- 55 to 150	°C
$T_J$	Junction temperature	150	°C

**Table 3. Thermal data**

Symbol	Parameter	DIP-16	SO-16	Unit
$R_{thJA}$	Thermal resistance junction-ambient, Max.	70	120	°C/W

## 4 Electrical characteristics

**Table 4. Electrical characteristics**  
( $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise specified).

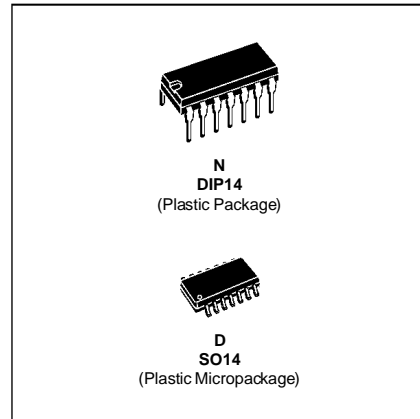
Symbol	Parameter	Test condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
$I_{\text{CEX}}$	Output leakage current	$V_{\text{CE}} = 50 \text{ V}$ , (Figure 3.)			50	$\mu\text{A}$
		$T_A = 70^\circ\text{C}$ , $V_{\text{CE}} = 50 \text{ V}$ (Figure 3.)			100	
		$T_A = 70^\circ\text{C}$ for ULN2002, $V_{\text{CE}} = 50 \text{ V}$ , $V_I = 6 \text{ V}$ (Figure 4.)			500	
		$T_A = 70^\circ\text{C}$ for ULN2002, $V_{\text{CE}} = 50 \text{ V}$ , $V_I = 1 \text{ V}$ (Figure 4.)			500	
$V_{\text{CE(SAT)}}$	Collector-emitter saturation voltage (Figure 5.)	$I_C = 100 \text{ mA}$ , $I_B = 250 \mu\text{A}$		0.9	1.1	V
		$I_C = 200 \text{ mA}$ , $I_B = 350 \mu\text{A}$		1.1	1.3	
		$I_C = 350 \text{ mA}$ , $I_B = 500 \mu\text{A}$		1.3	1.6	
$I_{\text{I(ON)}}$	Input current (Figure 6.)	for ULN2002, $V_I = 17 \text{ V}$		0.82	1.25	mA
		for ULN2003, $V_I = 3.85 \text{ V}$		0.93	1.35	
		for ULN2004, $V_I = 5 \text{ V}$		0.35	0.5	
		$V_I = 12 \text{ V}$		1	1.45	
$I_{\text{I(OFF)}}$	Input current (Figure 7.)	$T_A = 70^\circ\text{C}$ , $I_C = 500 \mu\text{A}$	50	65		$\mu\text{A}$
$V_{\text{I(ON)}}$	Input voltage (Figure 8.)	$V_{\text{CE}} = 2 \text{ V}$ , for ULN2002 $I_C = 300 \text{ mA}$ for ULN2003			13	V
		$I_C = 200 \text{ mA}$			2.4	
		$I_C = 250 \text{ mA}$			2.7	
		$I_C = 300 \text{ mA}$ for ULN2004			3	
		$I_C = 125 \text{ mA}$			5	
		$I_C = 200 \text{ mA}$			6	
		$I_C = 275 \text{ mA}$ $I_C = 350 \text{ mA}$			7 8	
$h_{\text{FE}}$	DC Forward current gain (Figure 5.)	for ULN2001, $V_{\text{CE}} = 2 \text{ V}$ , $I_C = 350 \text{ mA}$	1000			
$C_I$	Input capacitance			15	25	pF
$t_{\text{PLH}}$	Turn-on delay time	$0.5 V_I$ to $0.5 V_O$		0.25	1	$\mu\text{s}$
$t_{\text{PHL}}$	Turn-off delay time	$0.5 V_I$ to $0.5 V_O$		0.25	1	$\mu\text{s}$
$I_{\text{R}}$	Clamp diode leakage current (Figure 9.)	$V_{\text{R}} = 50 \text{ V}$			50	$\mu\text{A}$
		$T_A = 70^\circ\text{C}$ , $V_{\text{R}} = 50 \text{ V}$			100	
$V_{\text{F}}$	Clamp diode forward voltage (Figure 10.)	$I_{\text{F}} = 350 \text{ mA}$		1.7	2	V



**LF147 - LF247  
LF347**

**WIDE BANDWIDTH  
QUAD J-FET OPERATIONAL AMPLIFIERS**

- LOW POWER CONSUMPTION
- WIDE COMMON-MODE (UP TO  $V_{CC}^+$ ) AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGE
- LOW INPUT BIAS AND OFFSET CURRENT
- OUTPUT SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- HIGH INPUT IMPEDANCE J-FET INPUT STAGE
- INTERNAL FREQUENCY COMPENSATION
- LATCH UP FREE OPERATION
- HIGH SLEW RATE :  $16V/\mu s$  (typ)



**DESCRIPTION**

These circuits are high speed J-FET input quad operational amplifiers incorporating well matched, high voltage J-FET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit.

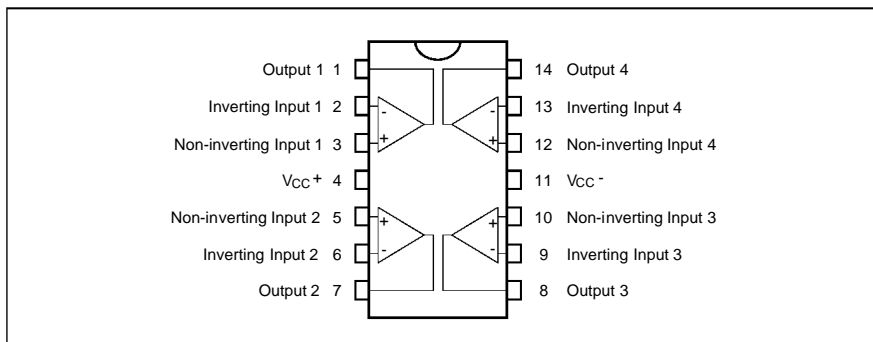
The devices feature high slew rates, low input bias and offset currents, and low offset voltage temperature coefficient.

**ORDER CODES**

Part Number	Temperature Range	Package	
		N	D
LF347	0°C, +70°C	•	•
LF247	-40°C, +105°C	•	•
LF147	-55°C, +125°C	•	•

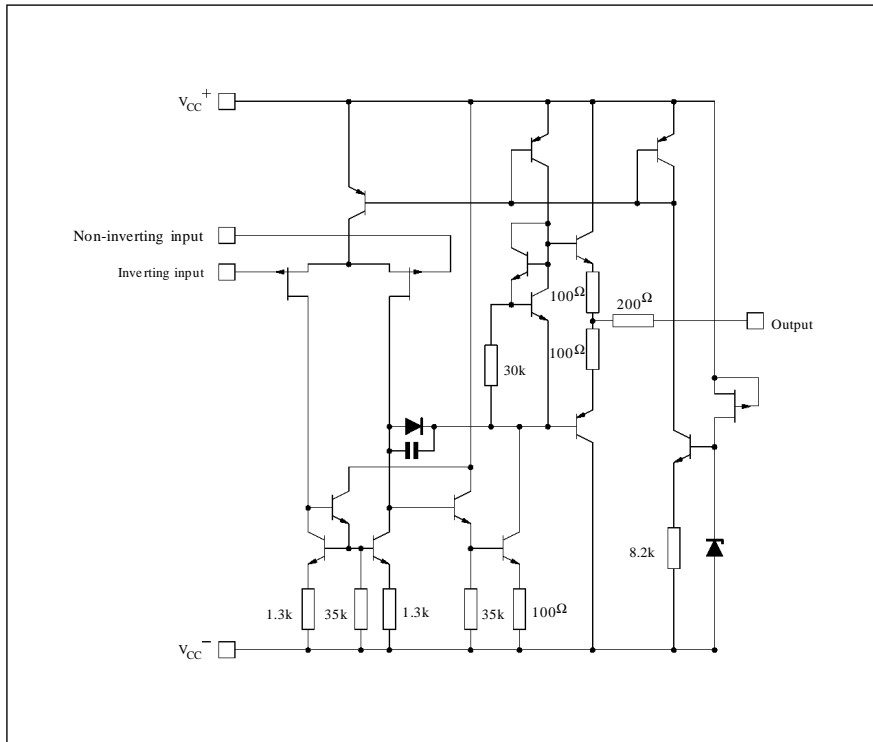
Example : LF347IN

**PIN CONNECTIONS (top view)**



**LF147 - LF247 - LF347**

**SCHEMATIC DIAGRAM (each amplifier)**



**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

Symbol	Parameter	Value	Unit	
$V_{CC}$	Supply Voltage - (note 1)	$\pm 18$	V	
$V_i$	Input Voltage - (note 3)	$\pm 15$	V	
$V_{id}$	Differential Input Voltage - (note 2)	$\pm 30$	V	
$P_{tot}$	Power Dissipation	680	mW	
	Output Short-circuit Duration - (note 4)	Infinite		
$T_{oper}$	Operating Free Air Temperature Range	LF347 LF247 LF147	0 to 70 -40 to 105 -55 to 125	°C
$T_{stg}$	Storage Temperature Range		-65 to 150	°C

- Notes :
1. All voltage values, except differential voltage, are with respect to the zero reference level (ground) of the supply voltages where the zero reference level is the midpoint between  $V_{CC}^+$  and  $V_{CC}^-$ .
  2. Differential voltages are at the non-inverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
  3. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
  4. The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and /or supply voltages must be limited to ensure that the dissipation rating is not exceeded.

LF147 - LF247 - LF347

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

V<sub>CC</sub> = ±15V, T<sub>amb</sub> = 25°C (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
V <sub>io</sub>	Input Offset Voltage (R <sub>S</sub> = 10kΩ) T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>		3	10 13	mV
DV <sub>io</sub>	Input Offset Voltage Drift		10		μV/°C
I <sub>io</sub>	Input Offset Current * T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>		5	100 4	pA nA
I <sub>ib</sub>	Input Bias Current * T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>		20	200 20	pA nA
A <sub>vd</sub>	Large Signal Voltage Gain (R <sub>L</sub> = 2kΩ, V <sub>O</sub> = ±10V) T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>	50 25	200		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio (R <sub>S</sub> = 10kΩ) T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>	80 80	86		dB
I <sub>cc</sub>	Supply Current, per Amp, no Load T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>		1.4	2.7 2.7	mA
V <sub>icm</sub>	Input Common Mode Voltage Range	±11	+15 -12		V
CMR	Common Mode Rejection Ratio (R <sub>S</sub> = 10kΩ) T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>	70 70	86		dB
I <sub>os</sub>	Output Short-circuit Current T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>	10 10	40	60 60	mA
±V <sub>OPP</sub>	Output Voltage Swing T <sub>amb</sub> = 25°C T <sub>min.</sub> ≤ T <sub>amb</sub> ≤ T <sub>max.</sub>				V
	R <sub>L</sub> = 2kΩ	10	12		
	R <sub>L</sub> = 10kΩ	12	13.5		
	R <sub>L</sub> = 2kΩ	10			
	R <sub>L</sub> = 10kΩ	12			
SR	Slew Rate (V <sub>i</sub> = 10V, R <sub>L</sub> = 2kΩ, C <sub>L</sub> = 100pF, T <sub>amb</sub> = 25°C, unity gain)	12	16		V/μs
t <sub>r</sub>	Rise Time (V <sub>i</sub> = 20mV, R <sub>L</sub> = 2kΩ, C <sub>L</sub> = 100pF, T <sub>amb</sub> = 25°C, unity gain)		0.1		μs
K <sub>OV</sub>	Overshoot (V <sub>i</sub> = 20mV, R <sub>L</sub> = 2kΩ, C <sub>L</sub> = 100pF, T <sub>amb</sub> = 25°C, unity gain)		10		%
GBP	Gain Bandwidth Product (f = 100kHz, T <sub>amb</sub> = 25°C, V <sub>in</sub> = 10mV, R <sub>L</sub> = 2kΩ, C <sub>L</sub> = 100pF)	2.5	4		MHz
R <sub>i</sub>	Input Resistance		10 <sup>12</sup>		Ω
THD	Total Harmonic Distortion (f = 1kHz, A <sub>V</sub> = 20dB, R <sub>L</sub> = 2kΩ, C <sub>L</sub> = 100pF, T <sub>amb</sub> = 25°C, V <sub>O</sub> = 2V <sub>PP</sub> )		0.01		%
e <sub>n</sub>	Equivalent Input Noise Voltage (f = 1kHz, R <sub>S</sub> = 100Ω)		15		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
∅ <sub>m</sub>	Phase Margin		45		Degrees
V <sub>O1</sub> /V <sub>O2</sub>	Channel Separation (A <sub>V</sub> = 100)		120		dB

\* The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every 10°C increase in the junction temperature.



Order this document by MC33076/D

# MC33076

## Dual High Output Current, Low Power, Low Noise Bipolar Operational Amplifier

The MC33076 operational amplifier employs bipolar technology with innovative high performance concepts for audio and industrial applications. This device uses high frequency PNP input transistors to improve frequency response. In addition, the amplifier provides high output current drive capability while minimizing the drain current. The all NPN output stage exhibits no deadband crossover distortion, large output voltage swing, excellent phase and gain margins, low open loop high frequency output impedance and symmetrical source and sink AC frequency performance.

The MC33076 is tested over the automotive temperature range and is available in an 8-pin SOIC package (D suffix) and in both the standard 8 pin DIP and 16-pin DIP packages for high power applications.

- 100 Ω Output Drive Capability
- Large Output Voltage Swing
- Low Total Harmonic Distortion
- High Gain Bandwidth: 7.4 MHz
- High Slew Rate: 2.6 V/μs
- Dual Supply Operation: ±2.0 V to ±18 V
- High Output Current: ISC = 250 mA typ
- Similar Performance to MC33178

### DUAL HIGH OUTPUT CURRENT OPERATIONAL AMPLIFIER

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

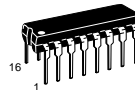
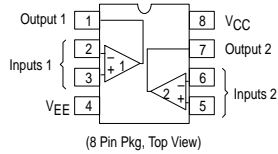


**D SUFFIX**  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 751  
(SO-8)



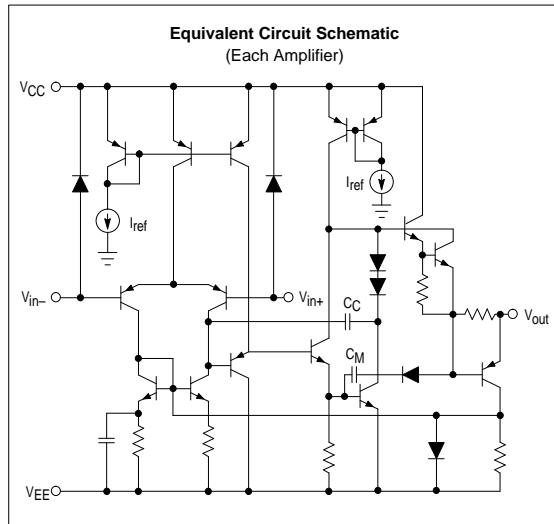
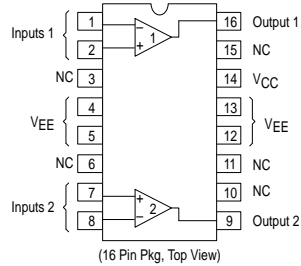
**P1 SUFFIX**  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 626

#### PIN CONNECTIONS



**P2 SUFFIX**  
PLASTIC PACKAGE  
CASE 648C  
DIP (12+2+2)

#### PIN CONNECTIONS



#### ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
MC33076D	T <sub>A</sub> = -40° to +85°C	SO-8
MC33076P1		Plastic DIP
MC33076P2		Power Plastic



MC33076

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltage (Note 2)	$V_{CC}$ to $V_{EE}$	+36	V
Input Differential Voltage Range	$V_{IDR}$	(Note 1)	V
Input Voltage Range	$V_{IR}$	(Note 1)	V
Output Short Circuit Duration (Note 2)	$t_{SC}$	5.0	sec
Maximum Junction Temperature	$T_J$	+150	°C
Storage Temperature	$T_{stg}$	-60 to +150	°C
Maximum Power Dissipation	PD	(Note 2)	mW

NOTES: 1. Either or both input voltages should not exceed  $V_{CC}$  or  $V_{EE}$ .  
 2. Power dissipation must be considered to ensure maximum junction temperature ( $T_J$ ) is not exceeded (see power dissipation performance characteristic, Figure 1). See applications section for further information.

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $V_{CC} = +15$  V,  $V_{EE} = -15$  V,  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.)

Characteristics	Figure	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Input Offset Voltage ( $R_S = 50 \Omega$ , $V_{CM} = 0$ V) ( $V_S = \pm 2.5$ V to $\pm 15$ V) $T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = -40^\circ$ to $+85^\circ\text{C}$	2	$ V_{IO} $	— —	0.5 0.5	4.0 5.0	mV
Input Offset Voltage Temperature Coefficient ( $R_S = 50 \Omega$ , $V_{CM} = 0$ V) $T_A = -40^\circ$ to $+85^\circ\text{C}$		$\Delta V_{IO}/\Delta T$	—	2.0	—	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Bias Current ( $V_{CM} = 0$ V) $T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = -40^\circ$ to $+85^\circ\text{C}$	3, 4	$I_{IB}$	— —	100 —	500 600	nA
Input Offset Current ( $V_{CM} = 0$ V) $T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = -40^\circ$ to $+85^\circ\text{C}$		$ I_{IO} $	— —	5.0 —	70 100	nA
Common Mode Input Voltage Range	5	$V_{ICR}$	-13	-14 +14	13	V
Large Signal Voltage Gain ( $V_O = -10$ V to $+10$ V) ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ ) $R_L = 100 \Omega$ $R_L = 600 \Omega$ ( $T_A = -40^\circ$ to $+85^\circ\text{C}$ ) $R_L = 600 \Omega$	6	$A_{VOL}$	25 50 25	— 200 —	— — —	kV/V
Output Voltage Swing ( $V_{ID} = \pm 1.0$ V) ( $V_{CC} = +15$ V, $V_{EE} = -15$ V) $R_L = 100 \Omega$ $R_L = 100 \Omega$ $R_L = 600 \Omega$ $R_L = 600 \Omega$ ( $V_{CC} = +2.5$ V, $V_{EE} = -2.5$ V) $R_L = 100 \Omega$ $R_L = 100 \Omega$	7, 8, 9	$V_{O+}$ $V_{O-}$ $V_{O+}$ $V_{O-}$ $V_{O+}$ $V_{O-}$	10 — 13 — 1.2 —	+11.7 -11.7 +13.8 -13.8 +1.66 -1.74	— -10 — -13 — -1.2	V
Common Mode Rejection ( $V_{in} = \pm 13$ V)	10	CMR	80	116	—	dB
Power Supply Rejection ( $V_{CC}/V_{EE} = +15$ V/-15 V, +5.0 V/-15 V, +15 V/-5.0 V)	11	PSR	80	120	—	dB

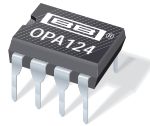
**MC33076**

**DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_{CC} = +15\text{ V}$ ,  $V_{EE} = -15\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.)

Characteristics	Figure	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Output Short Circuit Current ( $V_{ID} = \pm 1.0\text{ V}$ Output to Gnd) ( $V_{CC} = +15\text{ V}$ , $V_{EE} = -15\text{ V}$ ) Source Sink ( $V_{CC} = +2.5\text{ V}$ , $V_{EE} = -2.5\text{ V}$ ) Source Sink	12, 13	$I_{SC}$	190 —	+250 -280	— -215	mA
Power Supply Current per Amplifier ( $V_O = 0\text{ V}$ ) ( $V_S = \pm 2.5\text{ V}$ to $\pm 15\text{ V}$ ) $T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = -40^\circ$ to $+85^\circ\text{C}$	14	$I_D$	— —	2.2 —	2.8 3.3	mA

**AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_{CC} = +15\text{ V}$ ,  $V_{EE} = -15\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.)

Characteristics	Figure	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Slew Rate ( $V_{in} = -10\text{ V}$ to $+10\text{ V}$ , $R_L = 100\ \Omega$ , $C_L = 100\text{ pF}$ , $A_V = +1$ )	15	SR	1.2	2.6	—	V/ $\mu\text{s}$
Gain Bandwidth Product ( $f = 20\text{ kHz}$ )	16	GBW	4.0	7.4	—	MHz
Unity Gain Frequency (Open Loop) ( $R_L = 600\ \Omega$ , $C_L = 0\text{ pF}$ )	—	$f_U$	—	3.5	—	MHz
Gain Margin ( $R_L = 600\ \Omega$ , $C_L = 0\text{ pF}$ )	19, 20	$A_m$	—	15	—	dB
Phase Margin ( $R_L = 600\ \Omega$ , $C_L = 0\text{ pF}$ )	19, 20	$\phi_m$	—	52	—	Deg
Channel Separation ( $f = 100\text{ Hz}$ to $20\text{ kHz}$ )	21	CS	—	-120	—	dB
Power Bandwidth ( $V_O = 20\text{ V}_{pp}$ , $R_L = 600\ \Omega$ , $\text{THD} \leq 1\%$ )	—	$\text{BW}_p$	—	32	—	kHz
Total Harmonic Distortion ( $R_L = 600\ \Omega$ , $V_O = 2.0\text{ V}_{pp}$ , $A_V = +1$ ) $f = 1.0\text{ kHz}$ $f = 10\text{ kHz}$ $f = 20\text{ kHz}$	22	THD	— — —	0.0027 0.011 0.022	— — —	%
Open Loop Output Impedance ( $V_O = 0\text{ V}$ , $f = 2.5\text{ MHz}$ , $A_V = 10$ )	23	$ Z_O $	—	75	—	$\Omega$
Differential Input Resistance ( $V_{CM} = 0\text{ V}$ )	—	$R_{in}$	—	200	—	k $\Omega$
Differential Input Capacitance ( $V_{CM} = 0\text{ V}$ )	—	$C_{in}$	—	10	—	pF
Equivalent Input Noise Voltage ( $R_S = 100\ \Omega$ ) $f = 10\text{ Hz}$ $f = 1.0\text{ kHz}$	24	$e_n$	— —	7.5 5.0	—	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Equivalent Input Noise Current $f = 10\text{ Hz}$ $f = 1.0\text{ kHz}$	—	$i_n$	— —	0.33 0.15	—	pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$



OPA124

## Low Noise Precision *Difet*<sup>®</sup> OPERATIONAL AMPLIFIER

### FEATURES

- LOW NOISE: 6nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  (10kHz)
- LOW BIAS CURRENT: 1pA max
- LOW OFFSET: 250 $\mu\text{V}$  max
- LOW DRIFT: 2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  max
- HIGH OPEN-LOOP GAIN: 120dB min
- HIGH COMMON-MODE REJECTION: 100dB min
- AVAILABLE IN 8-PIN PLASTIC DIP AND 8-PIN SOIC PACKAGES

### DESCRIPTION

The OPA124 is a precision monolithic FET operational amplifier using a *Difet* (dielectrical isolation) manufacturing process. Outstanding DC and AC performance characteristics allow its use in the most critical instrumentation applications.

Bias current, noise, voltage offset, drift, open-loop gain, common-mode rejection and power supply rejection are superior to BIFET and CMOS amplifiers.

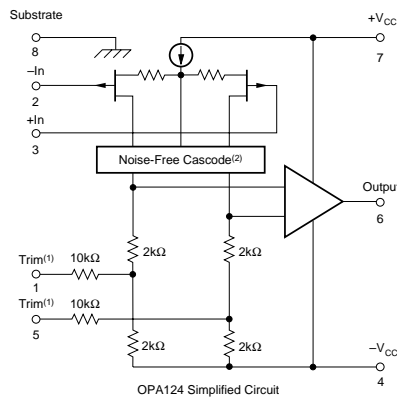
*Difet* fabrication achieves extremely low input bias currents without compromising input voltage noise performance. Low input bias current is maintained over a wide input common-mode voltage range with unique cascode circuitry. This cascode design also allows high precision input specifications and reduced susceptibility to flicker noise. Laser trimming of thin-film resistors gives very low offset and drift.

Compared to the popular OPA111, the OPA124 gives comparable performance and is available in an 8-pin PDIP and 8-pin SOIC package.

BIFET<sup>®</sup> National Semiconductor Corp.,  
*Difet*<sup>®</sup> Burr-Brown Corp.

### APPLICATIONS

- PRECISION PHOTODIODE PREAMP
- MEDICAL EQUIPMENT
- OPTOELECTRONICS
- DATA ACQUISITION
- TEST EQUIPMENT



NOTES: (1) Omitted on SOIC. (2) Patented.

International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 6730 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85706 • Tel: (520) 746-1111 • Twx: 910-952-1111  
Internet: <http://www.burr-brown.com/> • FAXLine: (800) 548-6133 (US/Canada Only) • Cable: BBRRCORP • Telex: 066-6491 • FAX: (520) 889-1510 • Immediate Product Info: (800) 548-6132

## SPECIFICATIONS

### ELECTRICAL

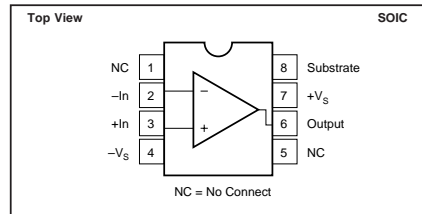
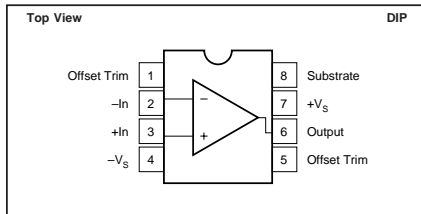
At  $V_{CC} = \pm 15\text{VDC}$  and  $T_A = +25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITION	OPA124U, P			OPA124UA, PA			OPA124PB			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
<b>INPUT NOISE</b>											
Voltage, $f_o = 10\text{Hz}^{(4)}$			40	80		*	*		*	*	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_o = 100\text{Hz}^{(4)}$			15	40		*	*		*	*	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_o = 1\text{kHz}^{(4)}$			8	15		*	*		*	*	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_o = 10\text{kHz}^{(5)}$			6	8		*	*		*	*	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_b = 10\text{Hz}$ to $10\text{kHz}^{(5)}$			0.7	1.2		*	*		*	*	$\mu\text{Vrms}$
$f_b = 0.1\text{Hz}$ to $10\text{Hz}$			1.6	3.3		*	*		*	*	$\mu\text{Vp-p}$
Current, $f_b = 0.1\text{Hz}$ to $10\text{Hz}$			9.5	15		*	*		*	*	$\text{fA}\cdot\text{p}$
$f_o = 0.1\text{Hz}$ thru $20\text{kHz}$			0.5	0.8		*	*		*	*	$\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$
<b>OFFSET VOLTAGE<sup>(1)</sup></b>											
Input Offset Voltage	$V_{CM} = 0\text{VDC}$		$\pm 200$	$\pm 800$		$\pm 150$	$\pm 500$		$\pm 100$	$\pm 250$	$\mu\text{V}$
vs Temperature	$T_A = T_{MIN}$ to $T_{MAX}$		$\pm 4$	$\pm 7.5$		$\pm 2$	$\pm 4$		$\pm 1$	$\pm 2$	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Supply Rejection	$V_{CC} = \pm 10\text{V}$ to $\pm 18\text{V}$	88	110		90	*	*	100	*	*	$\text{dB}$
vs Temperature	$T_A = T_{MIN}$ to $T_{MAX}$	84	100		86	*	*	90	*	*	$\text{dB}$
<b>BIAS CURRENT<sup>(1)</sup></b>											
Input Bias Current	$V_{CM} = 0\text{VDC}$		$\pm 1$	$\pm 5$		$\pm 0.5$	$\pm 2$		$\pm 0.35$	$\pm 1$	$\text{pA}$
<b>OFFSET CURRENT<sup>(1)</sup></b>											
Input Offset Current	$V_{CM} = 0\text{VDC}$		$\pm 1$	$\pm 5$		$\pm 0.5$	$\pm 1$		$\pm 0.25$	$\pm 0.5$	$\text{pA}$
<b>IMPEDANCE</b>											
Differential			$10^{13} \parallel 1$			*			*		$\Omega \parallel \text{pF}$
Common-Mode			$10^{14} \parallel 3$			*			*		$\Omega \parallel \text{pF}$
<b>VOLTAGE RANGE</b>											
Common-Mode Input Range	$V_{IN} = \pm 10\text{VDC}$	$\pm 10$	$\pm 11$		*	*		*	*		$\text{V}$
Common-Mode Rejection	$T_A = T_{MIN}$ to $T_{MAX}$	92	110		94	*	*	100	*	*	$\text{dB}$
vs Temperature		86	100		*	*		90	*	*	$\text{dB}$
<b>OPEN-LOOP GAIN, DC</b>											
Open-Loop Voltage Gain	$R_L \geq 2\text{k}\Omega$	106	125		*	*		120	*		$\text{dB}$
<b>FREQUENCY RESPONSE</b>											
Unity Gain, Small Signal			1.5			*			*		$\text{MHz}$
Full Power Response	$20\text{Vp-p}$ , $R_L = 2\text{k}\Omega$	16	32		*	*		*	*		$\text{kHz}$
Slew Rate	$V_O = \pm 10\text{V}$ , $R_L = 2\text{k}\Omega$	1	1.6		*	*		*	*		$\text{V}/\mu\text{s}$
THD			0.0003			*			*		%
Settling Time, 0.1%	Gain = $-1$ , $R_L = 2\text{k}\Omega$		6			*			*		$\mu\text{s}$
0.01%	10V Step		10			*			*		$\mu\text{s}$
Overload Recovery, 50% Overdrive <sup>(2)</sup>	Gain = $-1$		5			*			*		$\mu\text{s}$
<b>RATED OUTPUT</b>											
Voltage Output	$R_L = 2\text{k}\Omega$	$\pm 11$	$\pm 12$		*	*		*	*		$\text{V}$
Current Output	$V_O = \pm 10\text{VDC}$	$\pm 5.5$	$\pm 10$		*	*		*	*		$\text{mA}$
Output Resistance	DC, Open Loop		100			*			*		$\Omega$
Load Capacitance Stability	Gain = $+1$		1000			*			*		$\text{pF}$
Short Circuit Current		10	40		*	*		*	*		$\text{mA}$
<b>POWER SUPPLY</b>											
Rated Voltage			$\pm 15$			*			*		$\text{VDC}$
Voltage Range, Derated		$\pm 5$		$\pm 18$	*	*	*	*	*	*	$\text{VDC}$
Current, Quiescent	$I_O = 0\text{mA}$		2.5	3.5		*	*		*	*	$\text{mA}$
<b>TEMPERATURE RANGE</b>											
Specification	$T_{MIN}$ and $T_{MAX}$	$-25$		$+85$	*		*	*		*	$^\circ\text{C}$
Storage		$-65$		$+125$	*		*	*		*	$^\circ\text{C}$
$\theta$ Junction-Ambient: PDIP			90			*			*		$^\circ\text{C}/\text{W}$
SOIC			100			*			*		$^\circ\text{C}/\text{W}$

\* Specification same as OPA124U, P

NOTES: (1) Offset voltage, offset current, and bias current are measured with the units fully warmed up. For performance at other temperatures see Typical Performance Curves. (2) Overload recovery is defined as the time required for the output to return from saturation to linear operation following the removal of a 50% input overdrive. (3) For performance at other temperatures see Typical Performance Curves. (4) Sample tested, 98% confidence. (5) Guaranteed by design.

CONNECTION DIAGRAMS



PACKAGE/ORDERING INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER <sup>(1)</sup>	TEMPERATURE RANGE	BIAS CURRENT pA, max	OFFSET DRIFT $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , max
OPA124U	8-Lead SOIC	182	-25°C to +85°C	5	7.5
OPA124P	8-Pin Plastic DIP	006	-25°C to +85°C	5	7.5
OPA124UA	8-Lead SOIC	182	-25°C to +85°C	2	4
OPA124PA	8-Pin Plastic DIP	006	-25°C to +85°C	2	4
OPA124PB	8-Pin Plastic DIP	006	-25°C to +85°C	1	2

NOTE: (1) For detailed drawing and dimension table, please see end of data sheet, or Appendix C of Burr-Brown IC Data Book.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS<sup>(1)</sup>

Supply .....	$\pm 18\text{VDC}$
Internal Power Dissipation <sup>(2)</sup> .....	750mW
Differential Input Voltage <sup>(3)</sup> .....	$\pm 36\text{VDC}$
Input Voltage Range <sup>(3)</sup> .....	$\pm 18\text{VDC}$
Storage Temperature Range .....	-65°C to +150°C
Operating Temperature Range .....	-40°C to +125°C
Lead Temperature (soldering, 10s) .....	+300°C
Output Short Circuit Duration <sup>(4)</sup> .....	Continuous
Junction Temperature .....	+175°C

NOTES: (1) Stresses above these ratings may cause permanent damage. (2) Packages must be derated based on  $\theta_{JA} = 90^\circ\text{C/W}$  for PDIP and  $100^\circ\text{C/W}$  for SOIC. (3) For supply voltages less than  $\pm 18\text{VDC}$ , the absolute maximum input voltage is equal to  $+18\text{V} > V_{IN} > -V_{OC} - 6\text{V}$ . See Figure 2. (4) Short circuit may be to power supply common only. Rating applies to +25°C ambient. Observe dissipation limit and  $T_J$ .



**ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY**

This integrated circuit can be damaged by ESD. Burr-Brown recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

The information provided herein is believed to be reliable; however, BURR-BROWN assumes no responsibility for inaccuracies or omissions. BURR-BROWN assumes no responsibility for the use of this information, and all use of such information shall be entirely at the user's own risk. Prices and specifications are subject to change without notice. No patent rights or licenses to any of the circuits described herein are implied or granted to any third party. BURR-BROWN does not authorize or warrant any BURR-BROWN product for use in life support devices and/or systems.

## APPLICATIONS INFORMATION

### OFFSET VOLTAGE ADJUSTMENT

The OPA124 offset voltage is laser-trimmed and will require no further trim for most applications. In order to reduce layout leakage errors, the offset adjust capability has been removed from the SOIC versions (OPA124UA and OPA124U). The PDIP versions (OPA124PB, OPA124PA, and OPA124P) do have pins available for offset adjustment. As with most amplifiers, externally trimming the remaining offset can change drift performance by about  $0.3\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  for each  $100\mu\text{V}$  of adjusted offset. The correct circuit configuration for offset adjust for the PDIP packages is shown in Figure 1.

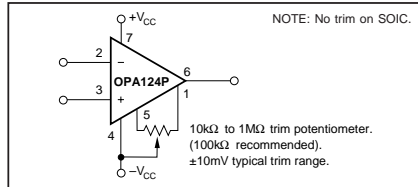


FIGURE 1. Offset Voltage Trim for PDIP packages.

### INPUT PROTECTION

Conventional monolithic FET operational amplifiers require external current-limiting resistors to protect their inputs against destructive currents that can flow when input FET gate-to-substrate isolation diodes are forward-biased. Most BIFET amplifiers can be destroyed by the loss of  $-V_{CC}$ .

Unlike BIFET amplifiers, the *Difet* OPA124 requires input current limiting resistors only if its input voltage is greater than 6V more negative than  $-V_{CC}$ . A  $10\text{k}\Omega$  series resistor will limit input current to a safe level with up to  $\pm 15\text{V}$  input levels, even if both supply voltages are lost (Figure 2).

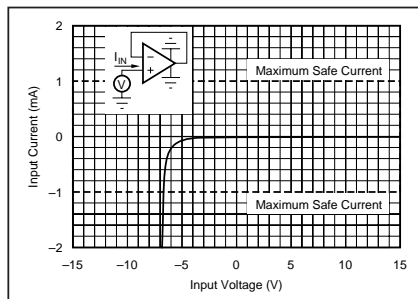


FIGURE 2. Input Current vs Input Voltage with  $\pm V_{CC}$  Pins Grounded.

Static damage can cause subtle changes in amplifier input characteristics without necessarily destroying the device. In precision operational amplifiers (both bipolar and FET types), this may cause a noticeable degradation of offset voltage and drift. Static protection is recommended when handling any precision IC operational amplifier.

### GUARDING AND SHIELDING

As in any situation where high impedances are involved, careful shielding is required to reduce “hum” pickup in input leads. If large feedback resistors are used, they should also be shielded along with the external input circuitry.

Leakage currents across printed circuit boards can easily exceed the bias current of the OPA124. To avoid leakage problems, the OPA124 should be soldered directly into a printed circuit board. Utmost care must be used in planning the board layout. A “guard” pattern should completely surround the high impedance input leads and should be connected to a low impedance point which is at the signal input potential.

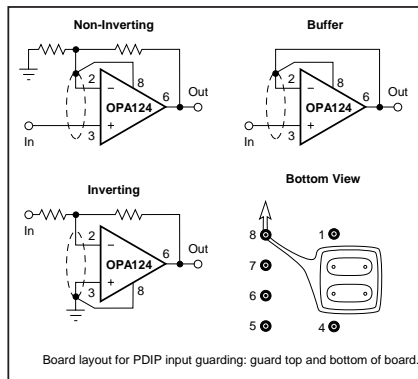


FIGURE 3. Connection of Input Guard.

The amplifier substrate should be connected to any input shield or guard via pin 8 minimizing both leakage and noise pickup (see Figure 3).

If guarding is not required, pin 8 should be connected to ground.

**NPN switching transistors**

**2N2222; 2N2222A**

**FEATURES**

- High current (max. 800 mA)
- Low voltage (max. 40 V).

**APPLICATIONS**

- Linear amplification and switching.

**DESCRIPTION**

NPN switching transistor in a TO-18 metal package.  
PNP complement: 2N2907A.

**PINNING**

PIN	DESCRIPTION
1	emitter
2	base
3	collector, connected to case

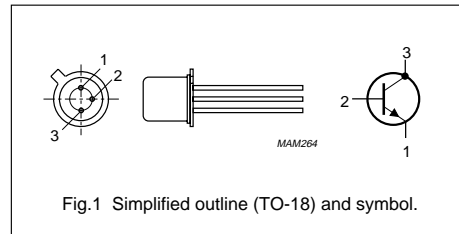


Fig.1 Simplified outline (TO-18) and symbol.

**QUICK REFERENCE DATA**

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
$V_{CBO}$	collector-base voltage 2N2222 2N2222A	open emitter	–	60	V
			–	75	V
$V_{CEO}$	collector-emitter voltage 2N2222 2N2222A	open base	–	30	V
			–	40	V
$I_C$	collector current (DC)		–	800	mA
$P_{tot}$	total power dissipation	$T_{amb} \leq 25\text{ }^\circ\text{C}$	–	500	mW
$h_{FE}$	DC current gain	$I_C = 10\text{ mA}; V_{CE} = 10\text{ V}$	75	–	
$f_T$	transition frequency 2N2222 2N2222A	$I_C = 20\text{ mA}; V_{CE} = 20\text{ V}; f = 100\text{ MHz}$	250	–	MHz
			300	–	MHz
$t_{off}$	turn-off time	$I_{Con} = 150\text{ mA}; I_{Bon} = 15\text{ mA}; I_{Boff} = -15\text{ mA}$	–	250	ns

NPN switching transistors

2N2222; 2N2222A

**LIMITING VALUES**

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V <sub>CBO</sub>	collector-base voltage	open emitter			
	2N2222		–	60	V
	2N2222A		–	75	V
V <sub>CEO</sub>	collector-emitter voltage	open base			
	2N2222		–	30	V
	2N2222A		–	40	V
V <sub>EBO</sub>	emitter-base voltage	open collector			
	2N2222		–	5	V
	2N2222A		–	6	V
I <sub>C</sub>	collector current (DC)		–	800	mA
I <sub>CM</sub>	peak collector current		–	800	mA
I <sub>BM</sub>	peak base current		–	200	mA
P <sub>tot</sub>	total power dissipation	T <sub>amb</sub> ≤ 25 °C	–	500	mW
		T <sub>case</sub> ≤ 25 °C	–	1.2	W
T <sub>stg</sub>	storage temperature		–65	+150	°C
T <sub>j</sub>	junction temperature		–	200	°C
T <sub>amb</sub>	operating ambient temperature		–65	+150	°C

**THERMAL CHARACTERISTICS**

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
R <sub>th j-a</sub>	thermal resistance from junction to ambient	in free air	350	K/W
R <sub>th j-c</sub>	thermal resistance from junction to case		146	K/W




NPN switching transistors

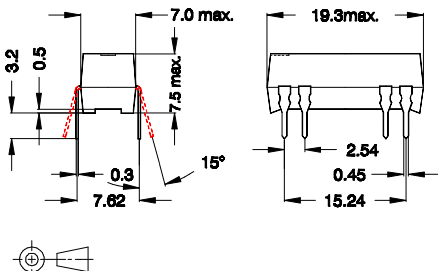
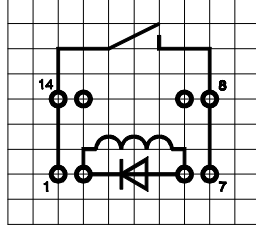
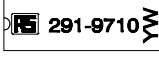
2N2222; 2N2222A

**CHARACTERISTICS**

T<sub>j</sub> = 25 °C unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
I <sub>CBO</sub>	collector cut-off current 2N2222	I <sub>E</sub> = 0; V <sub>CB</sub> = 50 V	–	10	nA
		I <sub>E</sub> = 0; V <sub>CB</sub> = 50 V; T <sub>amb</sub> = 150 °C	–	10	μA
I <sub>CBO</sub>	collector cut-off current 2N2222A	I <sub>E</sub> = 0; V <sub>CB</sub> = 60 V	–	10	nA
		I <sub>E</sub> = 0; V <sub>CB</sub> = 60 V; T <sub>amb</sub> = 150 °C	–	10	μA
I <sub>EBO</sub>	emitter cut-off current	I <sub>C</sub> = 0; V <sub>EB</sub> = 3 V	–	10	nA
h <sub>FE</sub>	DC current gain	I <sub>C</sub> = 0.1 mA; V <sub>CE</sub> = 10 V	35	–	
		I <sub>C</sub> = 1 mA; V <sub>CE</sub> = 10 V	50	–	
		I <sub>C</sub> = 10 mA; V <sub>CE</sub> = 10 V	75	–	
		I <sub>C</sub> = 150 mA; V <sub>CE</sub> = 1 V; note 1	50	–	
		I <sub>C</sub> = 150 mA; V <sub>CE</sub> = 10 V; note 1	100	300	
h <sub>FE</sub>	DC current gain 2N2222A	I <sub>C</sub> = 10 mA; V <sub>CE</sub> = 10 V; T <sub>amb</sub> = –55 °C	35	–	
h <sub>FE</sub>	DC current gain 2N2222 2N2222A	I <sub>C</sub> = 500 mA; V <sub>CE</sub> = 10 V; note 1	30	–	
			40	–	
V <sub>CEsat</sub>	collector-emitter saturation voltage 2N2222	I <sub>C</sub> = 150 mA; I <sub>B</sub> = 15 mA; note 1	–	400	mV
		I <sub>C</sub> = 500 mA; I <sub>B</sub> = 50 mA; note 1	–	1.6	V
V <sub>CEsat</sub>	collector-emitter saturation voltage 2N2222A	I <sub>C</sub> = 150 mA; I <sub>B</sub> = 15 mA; note 1	–	300	mV
		I <sub>C</sub> = 500 mA; I <sub>B</sub> = 50 mA; note 1	–	1	V
V <sub>BEsat</sub>	base-emitter saturation voltage 2N2222	I <sub>C</sub> = 150 mA; I <sub>B</sub> = 15 mA; note 1	–	1.3	V
		I <sub>C</sub> = 500 mA; I <sub>B</sub> = 50 mA; note 1	–	2.6	V
V <sub>BEsat</sub>	base-emitter saturation voltage 2N2222A	I <sub>C</sub> = 150 mA; I <sub>B</sub> = 15 mA; note 1	0.6	1.2	V
		I <sub>C</sub> = 500 mA; I <sub>B</sub> = 50 mA; note 1	–	2	V
C <sub>c</sub>	collector capacitance	I <sub>E</sub> = I <sub>e</sub> = 0; V <sub>CB</sub> = 10 V; f = 1 MHz	–	8	pF
C <sub>e</sub>	emitter capacitance 2N2222A	I <sub>C</sub> = I <sub>c</sub> = 0; V <sub>EB</sub> = 500 mV; f = 1 MHz	–	25	pF
f <sub>T</sub>	transition frequency 2N2222 2N2222A	I <sub>C</sub> = 20 mA; V <sub>CE</sub> = 20 V; f = 100 MHz	250	–	MHz
			300	–	MHz
F	noise figure 2N2222A	I <sub>C</sub> = 200 μA; V <sub>CE</sub> = 5 V; R <sub>S</sub> = 2 kΩ; f = 1 kHz; B = 200 Hz	–	4	dB


 <p><i>Products for tomorrow</i></p>	Headquarter Europe	Headquarter USA	<b>Reed Relay:</b> 291-9710
	MEDER electronic AG	MEDER electronic Inc.	DIP05-1A72-BV710
	Friedrich-List Strasse 6	766 Falmouth Rd	
	D-78234 Engen-Welschingen	Mashpee, MA 02649	
	Tel.: +49(0)7733-9487-0	Phone: +1/ 508-539-0002	
Fax: +49(0)7733-9487-32	Fax: +1/ 508-539-4088	<b>Part Number:</b> 3205172710	
eMail: <a href="mailto:info@meder.com">info@meder.com</a>	eMail: <a href="mailto:salesusa@meder.com">salesusa@meder.com</a>		
Internet: <a href="http://www.meder.com">www.meder.com</a>			

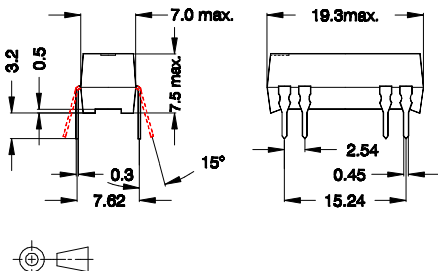
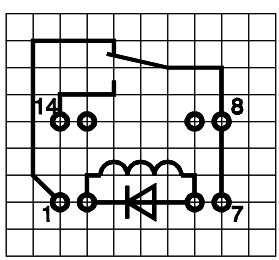
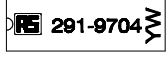
<p><b>Dimensions</b> (tolerance ± 0,1mm)</p> 	<p><b>Layout</b> 11D/ Pitch 2,54 / Top View</p> 	<p><b>Marking</b> Type -Layout Production -Code- EN60062</p> 
--	--	--

Coil/Relay Characteristics	Conditions at 20°C	Min.	Typ.	Max.	Units
Coil Resistance		450	500	550	Ω
Nominal Voltage			5,0		VDC
Nominal Rated Power			50		mW
Thermal Resistance			90		K / W
Operate Voltage				3,5	VDC
Release Voltage		0,75			VDC

Contact Data 72 (Form A/Dry)					
Contact Rating	Any combination of the switching voltage and current must not exceed the given rated power			15	W
Switching Voltage	DC or Peak AC			200	V
Switching Current	DC or Peak AC			1,0	A
Carry Current	DC or Peak AC			1,25	A
Static Contact Resistance (initial)	Measured with Nominal Voltage			150	mΩ
Insulation Resistance	RH 45%	10 <sup>10</sup>			Ω
Breakdown Voltage		250			VDC
Operate Time, including Bounce	Measured with Nominal Voltage			0,5	ms
Release Time	Measured with no coil suppression			0,1	ms
Capacitance			0,3		pF

Environmental Data					
Insulation Resistance Coil to Contact	RH 45%	10 <sup>11</sup>			Ω
Dielectric Strength Coil to Contact		1,5			kV DC
Shock	½ sine wave, duration 11ms			50	g
Vibration	from 10 - 2000 Hz			10	g
Operating Temperature	10°C/min max. allowable	-20		70	°C
Storage Temperature	10°C/min max. allowable	-35		95	°C
Soldering Temperature	5 sec. at			260	°C
Cleaning					fully sealed
Material of Case					mineral-filled epoxy
Material of Pins					Cu-alloy tinned

 <p><i>Products for tomorrow</i></p>	Headquarter Europe MEDER electronic AG Friedrich-List Strasse 6 D-78234 Engen-Welschingen Tel.: +49(0)7733-9487-0 Fax: +49(0)7733-9487-32 eMail: <a href="mailto:info@meder.com">info@meder.com</a> Internet: <a href="http://www.meder.com">www.meder.com</a>	Headquarter USA MEDER electronic Inc. 766 Falmouth Rd Mashpee, MA 02649 Phone: +1/ 508-539-0002 Fax: +1/ 508-539-4088 eMail: <a href="mailto:salesusa@meder.com">salesusa@meder.com</a>	<b>Reed Relay:</b> 291-9704 DIP05-1C90-BV704  <b>Part Number:</b> 3205190704
---	---	---	---

<b>Dimensions</b> (tolerance ± 0,1mm)	<b>Layout</b> 51D/ Pitch 2,54 / Top View	<b>Marking</b> Type -Layout Production -Code- EN60062
		

Coil/Relay Characteristics	Conditions at 20°C	Min.	Typ.	Max.	Units
Coil Resistance		180	200	220	Ω
Nominal Voltage			5		VDC
Nominal Rated Power			125		mW
Thermal Resistance			90		K/W
Operate Voltage				3,5	VDC
Release Voltage		0,75			VDC

Contact Data 90 (Form C/Dry)					
Contact Rating	Any combination of the switching voltage and current must not exceed the given rated power			3	W
Switching Voltage	DC or Peak AC			175	V
Switching Current	DC or Peak AC			0,25	A
Carry Current	DC or Peak AC			1,2	A
Static Contact Resistance (initial)	Measured with Nominal Voltage			150	mΩ
Insulation Resistance	RH 45%	10 <sup>9</sup>			Ω
Breakdown Voltage		200			VDC
Operate Time, including Bounce	Measured with Nominal Voltage			0,7	ms
Release Time	Measured with no coil suppression			1,0	ms
Capacitance			0,3		pF

Environmental Data					
Insulation Resistance Coil to Contact	RH 45%	10 <sup>11</sup>			Ω
Dielectric Strength Coil to Contact		1,5			kV DC
Shock	½ sine wave, duration 11ms			50	g
Vibration	from 10 - 2000 Hz			30	g
Operating Temperature	10°C/min max. allowable	-20		70	°C
Storage Temperature	10°C/min max. allowable	-35		95	°C
Soldering Temperature	5 sec. at			260	°C
Cleaning					fully sealed
Material of Case					mineral-filled epoxy
Material of Pins					Cu-alloy tinned