

## Introduzione

L'esperienza fatta in laboratorio ci ha permesso di capire come si affrontano le misure elettriche su un circuito e come valutarle. Come studiato in teoria, il risultato di una misura non è il vero valore della grandezza soggetta a misura, ma presenta alcuni scostamenti dovuti a vari errori. Questi scostamenti rientrano tutti in un intervallo delimitato dal valore dell'incertezza.

Il risultato delle misure pertanto sarà completato con il relativo valore dell'incertezza associata. Questa incertezza sarà determinata in base a delle funzioni matematiche studiate in teoria e dipende soprattutto dal fatto che la misura sia diretta o indiretta. Nella misura diretta l'incertezza si calcola in base a delle specifiche che il costruttore mette a disposizione per lo strumento adoperato nella misura, mentre per la misura indiretta, l'incertezza si calcola con le opportune formule matematiche che richiamano le incertezze delle misure dirette della quale è funzione.

Nell'eseguire queste prove in laboratorio sono stati eseguiti i seguenti strumenti:

- Oscilloscopio digitale HP54600B
- Multimetro digitale HP974A
- Generatore di forme d'onde Wavetek FG3A
- Sonde compensate 10X
- Cavetti coccodrilli
- Basetta sperimentale sulla quale è montato il circuito da analizzare

Per determinare l'incertezza delle varie misure sono stati utilizzati le specifiche messe a disposizione nel manuale degli strumenti utilizzati.

Sono stati poi determinati i valori dell'incertezza utilizzando le specifiche di manuali diversi da quelli utilizzati, con lo scopo di confrontare tra loro gli strumenti e di imparare a leggere le specifiche che da manuale a manuale vengono descritti in maniera differente.

Gli strumenti che analizzeremo nelle varie misure sono:

- Multimetro digitale HP974A
- Multimetro Fluke 8060A
- Multimetro Norma D1216
- Oscilloscopio digitale HP 54501A
- Oscilloscopio digitale HP 54600B
- Scheda di acquisizione NB-A2000
- Scheda di acquisizione LAB-PC+

## Struttura della relazione

La relazione si divide in 3 parti, nella prima parte si basa sulla prova B di laboratorio, la seconda parte si basa sulla prova C e la terza parte si basa sulla prova D.

Nella prima parte si discuteranno i seguenti problemi:

- Uso del multimetro come rilevatore di continuità, prova diodi e ohmmetro di precisione
- Uso dell'oscilloscopio con 2 tracce in modo normale e XY
- Caratterizzazione del BJT: esecuzione delle misure manuali (modo XY)
- Caratterizzazione del BJT: esecuzione di misure automatiche in modo normale.

I valori dei risultati delle misure e dei calcoli sono stati rappresentati in varie tabelle. Queste tabelle sono state ricavate grazie all'utilizzo di Excel. Excel è un foglio di calcolo che dà la possibilità di automatizzare i calcoli in base a delle funzioni predefinite o definite dall'utente. Basandoci su questo sono state definite delle funzioni che caratterizzano il comportamento di ogni strumento. Dopo aver definito queste funzioni è stato poi semplice eseguire i calcoli e determinare le tabelle.

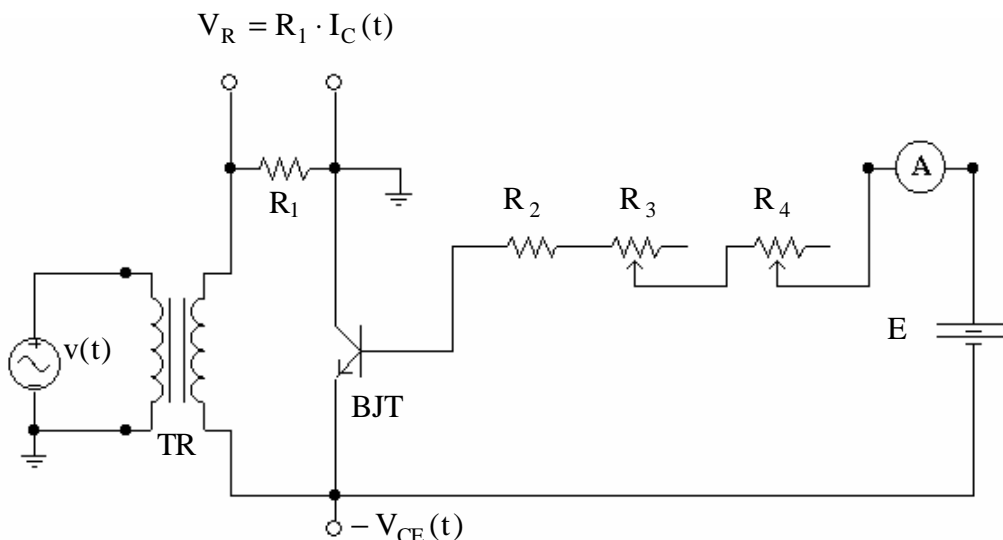
Nella relazione, per ogni tabella determinata è associato il codice (eseguito in VBA) che mette in evidenza come sono state determinate le funzioni utilizzate.

Per capire bene l'utilità di queste funzioni, basta valutare i file creati con excel presente nel dischetto allegato alla relazione.

## Uso del multimetro come rilevatore di continuità

Sulla base delle prove di continuità sono stati classificati dal punto di vista della massa il generatore di forma d'onda e l'oscilloscopio utilizzati. È stato possibile concludere in base a questa prova che sia l'oscilloscopio che il generatore di segnali risultano *single-ended* essendoci continuità tra gli involucri esterni degli ingressi BNC dell'oscilloscopio e tra gli involucri esterni delle uscite BNC del generatore di segnali. Possiamo anche dire che il generatore di segnali e l'oscilloscopio sono anche *grounded* essendoci continuità, rispettivamente, tra gli involucri esterni delle uscite del generatore e il conduttore di terra e tra gli involucri esterni degli ingressi dell'oscilloscopio e il conduttore di terra.

Dopo avere analizzato questo aspetto importante del generatore di segnale e dell'oscilloscopio, è indispensabile adesso rappresentare lo schema di principio del circuito presente sulla basetta sperimentale:



Elenco dei componenti :

$R_1$  = resistenza 100  $\Omega$ , 5 %, 1/4 W       $R_2$  = resistenza 120  $\Omega$ , 5 %, 1/4 W

$R_3$  = potenziometro logaritmico 470  $\Omega$ , 1/4 W

$R_4$  = potenziometro logaritmico 10 k $\Omega$ , 1/4 W

TR = trasformatore di isolamento      E = batteria

BJT = transistor in prova ( BC107 )

Nella prova di continuità è stato verificato il funzionamento del trasformatore. Questa analisi ha potuto confermare che tra il primario e il secondario del trasformatore c'è disaccoppiamento.

Si utilizza un **trasformatore di isolamento** poiché la terra dell'oscilloscopio non coincide con quella del circuito, per cui il trasformatore serve appunto per disaccoppiare quest'ultimo dalla terra.

## Misure delle resistenze

Con l'utilizzo del multimetro sono stati eseguite le misure delle resistenze presenti nel circuito. Ogni resistenza presente nel circuito ha un suo valore nominale e una tolleranza. Il valore effettivo della resistenza si trova all'interno dell'intervallo delimitato dal valore della tolleranza.

Con il multimetro determiniamo con più precisione il valore della resistenza, e viene poi sostituito l'intervallo delimitato dalla tolleranza, con l'intervallo delimitato dal valore dell'incertezza determinata in base alle specifiche dello strumento utilizzato.

Nelle tabelle successive, saranno presenti per ogni strumento il valore della misura e dell'incertezza delle misure dirette delle resistenze:

$R_1, R_2, R_3$  ed  $R_4$

e delle misure indirette di:

$R_3 - R_2$  e  $R_4 - R_1$   $R_3/R_2$  e  $R_4/R_1$

Per eseguire questa misura è stato utilizzato il multimetro digitale HP974A, ma noi ipotizzeremo che la prova sia ripetuta utilizzando poi il Multimetro Fluke 8060A e il Multimetro Norma D1216. (in realtà questo lo ipotizziamo solo per il calcolo delle incertezze con le specifiche presenti sui manuali degli strumento).

Riportiamo adesso i valori delle resistenze misurate (mettiamo anche affianco il loro valore nominale).

	Va misurato [ohm]	Val nominale [ohm]
R1	102.6	100
R2	119.0 k	120 k
$R_{3_{max}}$	521 k	470 k
$R_{4_{max}}$	9.87 k	10 k

In base alle specifiche presenti sui vari manuali dei rispettivi multimetri possiamo per ognuno di essi caratterizzare la propria incertezza.

## Multimetro HP974A

Le specifiche dello strumento sono:

visore a 4 ½ cifre: 50000 punti di misura se utilizzato come ohmmetro.

Le portate, risoluzione e precisione sono riportate in tabella.

Portata ( $R_{FS}$ )	Risoluzione ( $Q$ )	Precisione
500 $\Omega$	10 m $\Omega$	$\pm(0,06\%+2)$
5,0 k $\Omega$	100 m $\Omega$	
50 k $\Omega$	1 $\Omega$	
500 k $\Omega$	10 $\Omega$	
5,0 M $\Omega$	100 $\Omega$	$\pm(0,5\%+1)$
50 M $\Omega$	1 k $\Omega$	$\pm(1,0\%+2)$

*calcolo di:*

**$E_G$ : Errore massimo di guadagno.**

Questo errore rappresenta la parte percentuale presente nella colonna della precisione presente in tabella.

**$E_q$ : Errore massimo di quantizzazione.**

Per calcolare questo valore bisogna calcolare prima calcolare  $Q$ .

$$Q = \frac{R_{FS}}{\text{punti di misura}}$$

$$E_q = \frac{Q}{2}$$

**$E_{o+inl}$ : Errore massimo di offset e di non linearità (integrale)**

Per calcolare questo valore bisogna moltiplicare il secondo valore presente nella colonna della precisione per il valore di  $Q$ .

**$E$ : Errore massimo assoluto.**

$$E = E_G \cdot |x| + E_q + E_{o+inl}$$

Nel caso in cui si vuole valutare l'errore massimo assoluto della differenza di due resistenze si ha:

$$E = E' + E''$$

Se si vuole invece determinare l'errore massimo assoluto del rapporto di 2 resistenze allora ci conviene determinare prima l'errore relativo percentuale e poi procedere con la seguente formula:

$$E = \frac{e_{\%} \cdot \left| \frac{x'}{x''} \right|}{100}$$

**$e_{\%}$ : Errore massimo relativo percentuale.**

$$e_{\%} = \frac{E}{|x|} \cdot 100$$

Nel caso in cui si vuole valutare l'errore relativo percentuale della differenza di due resistenze si procede con:

$$e_{\%} = \frac{E}{|x''-x'|} \cdot 100$$

Se si vuole invece determinare l'errore percentuale del rapporto di 2 resistenze invece si procede con:

$$e_{\%} = e_{\%}' + e_{\%}''$$

Queste formule sono state utilizzate per implementare delle funzioni utilizzando il VBA nel programma Excel utili per ottenere la seguente tabella:

<b>Multimetro digitale HP974A</b>							
Resistenza	Lettura	Portata $R_{FS}$ [ $\Omega$ ]	$E_G$ [%]	$E_{O+inl}$ [ $\Omega$ ]	$E_q$ [ $\Omega$ ]	Errore ass. E	Err rel %. e [%]
$R_1$	99,51 $\Omega$	5,00E+02	0,06	0,02	0,005	0,085 $\Omega$	0,085
$R_2$	118,85 k $\Omega$	5,00E+05	0,06	20	5	96,31 $\Omega$	0,081
$(R_3)_{max}$	0,5115 M $\Omega$	5,00E+06	0,5	100	50	2707,5 $\Omega$	0,529
$(R_4)_{max}$	10,652 k $\Omega$	5,00E+04	0,06	2	0,5	8,891 $\Omega$	0,083
$(R_3)_{max} - R_2$	0,3927 M $\Omega$	—	—	—	—	2804 $\Omega$	0,71
$(R_4)_{max} - R_1$	10,552 k $\Omega$	—	—	—	—	8,98 $\Omega$	0,085
$(R_3)_{max}/R_2$	4,304	—	—	—	—	0,026	0,610
$(R_4)_{max}/R_1$	107,045	—	—	—	—	0,180	0,169

<b>Presentazione dei risultati della misura di resistenze (con HP974A)</b>	
$R_1 = 99,51 \pm 0,085 \Omega$	$R_2 = 118,85 \pm 0,096 \text{ k}\Omega$
$(R_3)_{max} = 0,512 \pm 0,0027 \text{ M}\Omega$	$(R_4)_{max} = 10,652 \pm 0,0089 \text{ k}\Omega$
$(R_3)_{max} - R_2 = 0,393 \pm 0,0028 \text{ M}\Omega$	$(R_4)_{max} - R_1 = 10,552 \pm 0,0090 \text{ k}\Omega$
$(R_3)_{max}/R_2 = 4,30 \pm 0,026$	$(R_4)_{max}/R_1 = 107,05 \pm 0,180$

Le funzioni realizzate in VBA sono:

**Function Portata(Valore As Currency) As Currency**

```
Select Case Valore
Case Is < 500
    Portata = 500
Case Is < 5000
    Portata = 5000
Case Is < 50000
    Portata = 50000
Case Is < 500000
    Portata = 500000
Case Is < 5000000
    Portata = 5000000
Case Is < 50000000
    Portata = 50000000
Case Else
    MsgBox ("il valore della resistenza supera il
    massimo valore di fondo scala")
End Select
End Function
```

**Function ConvMisuraNumero(Valore As Currency, Cella As String) As Currency**

```
Dim Formato As String
Formato = Range(Cella).NumberFormat
Select Case Formato
Case Is = "0.0_-k"
    Valore = Valore * 1000
Case Is = "0.00_-k"
    Valore = Valore * 1000
Case Is = "0.000_-k"
    Valore = Valore * 1000
Case Is = "0.0000_-k"
    Valore = Valore * 1000
Case Is = "0.0_-""M""""
    Valore = Valore * 1000000
Case Is = "0.00_-""M""""
    Valore = Valore * 1000000
Case Is = "0.000_-""M""""
    Valore = Valore * 1000000
Case Is = "0.0000_-""M""""
    Valore = Valore * 1000000
Case Is = "0.0_-""m""""
    Valore = Valore * 0.001
Case Is = "0.00_-""m""""
    Valore = Valore * 0.001
Case Is = "0.000_-""m""""
    Valore = Valore * 0.001
Case Is = "0.0000_-""m""""
    Valore = Valore * 0.001
End Select
ConvMisuraNumero = Valore
End Function
```

**Function ConvNumeroMisura(Valore As Currency, Cella As String) As Currency**

```
Select Case Valore
Case Is < 1
    Valore = Valore * 1000
```

```
Range(Cella).NumberFormat = "0.0_-""m""""
Case 1 To 999
    Range(Cella).NumberFormat = "0.0"
Case 1000 To 999999
    Range("C27").NumberFormat = "0.0_-k"
    Valore = Valore / 1000
Case Is > 1000000
    Valore = Valore / 1000000
    Range(Cella).NumberFormat = "0.0_-""M""""
End Select
ConvNumeroMisura = Valore
End Function
```

**Function Eg(Portata As Currency) As Currency**

```
' valore in percentuale di Eg
Select Case Portata
Case Is = 500
    Eg = 0.06
Case Is = 5000
    Eg = 0.06
Case Is = 50000
    Eg = 0.06
Case Is = 500000
    Eg = 0.06
Case Is = 5000000
    Eg = 0.5
Case Is = 50000000
    Eg = 1
End Select
End Function
```

**Function Eoinl(Portata As Currency, Resistenza As Currency, Q As Double) As Double**

```
If Portata = 5000000 Then
    precisione2 = 1
Else
    precisione2 = 2
End If
Eoinl = precisione2 * Q * Resistenza
End Function
```

**Function Eq(Portata As Currency, Q As Double) As Double**

```
Eq = Q * Portata / 2
End Function
```

**Function ErroreAss(Eg As Double, Eq As Double, Eoinl As Double, Misura As Currency, Cella As String) As Double**

```
ErroreAss = Eg * ConvMisuraNumero(Misura, Cella) / 100 + Eq + Eoinl
' Si fa diviso 100 perchè Eg è un valore in percentuale
End Function
```

**Function ePercent(EroreAss As Double, Misura As Currency, Cella As String) As Double**

```
ePercent = ErroreAss * 100 / ConvMisuraNumero(Misura, Cella)
End Function
```

## Multimetro Fluke 8060A

Le specifiche di questo strumento sono:

visore a 4 ½ cifre: 20000 punti di misura.

Le portate , risoluzione e precisione sono riportate in tabella

Portata ( $R_{FS}$ )	Risoluzione ( Q )	Precisione
200 $\Omega$	0,01 $\Omega$	(0,07%+2+0,02 $\Omega$ )
2 k $\Omega$	0,1 $\Omega$	(0,07%+2)
20 k $\Omega$	1 $\Omega$	
200 k $\Omega$	10 $\Omega$	
0-1,9999 M $\Omega$	100 $\Omega$	(0,15%+2)

*calcolo di:*

**$E_G$ : Errore massimo di guadagno.**

Questo errore rappresenta la parte percentuale presente nella colonna della precisione presente in tabella.

**$E_q$ : Errore massimo di quantizzazione.**

Per calcolare questo valore bisogna prima calcolare Q.

$$Q = \frac{R_{FS}}{\text{punti di misura}}$$

$$E_q = \frac{Q}{2}$$

**$E_{o+inl}$ : Errore massimo di offset e di non linearità (integrale)**

Per calcolare questo valore bisogna moltiplicare il secondo valore presente nella colonna della precisione per il valore di Q.

**Errore massimo casuale addizionale:**

E' un errore addizionale che si presenta soprattutto per portate piccole.

**E: Errore massimo assoluto.**

$$E = E_G \cdot |x| + E_q + E_{o+inl}$$

Nel caso in cui si vuole valutare l'errore massimo assoluto della differenza di due resistenze si ha:

$$E = E' + E''$$

Se si vuole invece determinare l'errore massimo assoluto del rapporto di 2 resistenze allora ci conviene determinare prima l'errore relativo percentuale e poi procedere con la seguente formula:



$$E = \frac{e_{\%} \cdot \left| \frac{x'}{x''} \right|}{100}$$

**$e_{\%}$ : Errore massimo relativo percentuale.**

$$e_{\%} = \frac{E}{|x|} \cdot 100$$

Nel caso in cui si vuole valutare l'errore relativo percentuale della differenza di due resistenze si procede con:

$$e_{\%} = \frac{E}{|x'' - x'|} \cdot 100$$

Se si vuole invece determinare l'errore percentuale del rapporto di 2 resistenze invece si procede con:

$$e_{\%} = e_{\%}' + e_{\%}''$$

Queste formule sono state utilizzate per implementare delle funzioni utilizzando il VBA nel programma Excel utili per ottenere la seguente tabella:

<b>Multimetro analogico Fluke 8060A</b>								
Resistenza	Letture	Portata $R_{FS}$ [ $\Omega$ ]	$E_G$ [%]	$E_{O+inl}$ [ $\Omega$ ]	$E_q$ [ $\Omega$ ]	$E_c$ [ $\Omega$ ]	Errore ass.E	Err rel perc. e [%]
$R_1$	99,51 $\Omega$	2,00E+02	0,07	0,02	0,005	0,02	0,115 $\Omega$	0,12
$R_2$	118,85 k $\Omega$	2,00E+05	0,07	20	5	0	108,195 $\Omega$	0,09
$(R_3)_{max}$	0,5115 M $\Omega$	2,00E+06	0,15	200	50	0	1017,25 $\Omega$	0,2
$(R_4)_{max}$	10,652 k $\Omega$	2,00E+04	0,07	2	0,5	0	9,956 $\Omega$	0,09
$(R_3)_{max} - R_2$	0,3927 M $\Omega$	—	—	—	—	—	1125 $\Omega$	0,29
$(R_4)_{max} - R_1$	10,552 k $\Omega$	—	—	—	—	—	10,071 $\Omega$	0,095
$(R_3)_{max}/R_2$	4,304	—	—	—	—	—	0,012	0,290
$(R_4)_{max}/R_1$	107,045	—	—	—	—	—	0,223	0,209

<b>Presentazione dei risultati della misura di resistenze (con Fluke 8060A)</b>	
$R_1 = 99,51 \pm 0,115 \Omega$	$R_2 = 118,85 \pm 0,108 \text{ k}\Omega$
$(R_3)_{max} = 0,512 \pm 0,0010 \text{ M}\Omega$	$(R_4)_{max} = 10,65 \pm 0,010 \text{ k}\Omega$
$(R_3)_{max} - R_2 = 0,393 \pm 0,0011 \text{ M}\Omega$	$(R_4)_{max} - R_1 = 10,552 \pm 0,0101 \text{ k}\Omega$
$(R_3)_{max}/R_2 = 4,30 \pm 0,012$	$(R_4)_{max}/R_1 = 107,05 \pm 0,223$

Le funzioni realizzate in VBA sono:

**Function Portata(Valore As Currency) As Currency**

```
Select Case Valore
Case Is < 200
    Portata = 200
Case Is < 2000
    Portata = 2000
Case Is < 20000
    Portata = 20000
Case Is < 200000
    Portata = 200000
Case Is < 2000000
    Portata = 2000000
Case Is < 100000000
    Portata = 100000000
Case Is < 300000000
    Portata = 300000000
Case Else
    MsgBox ("il valore della resistenza supera il
massimo valore di fondo scala")
End Select
End Function
```

**Function ConvMisuraNumero(Valore As Currency, Cella As String) As Currency**

```
Dim Formato As String
Formato = Range(Cella).NumberFormat
Select Case Formato
Case Is = "0.0_-k"
    Valore = Valore * 1000
Case Is = "0.00_-k"
    Valore = Valore * 1000
Case Is = "0.000_-k"
    Valore = Valore * 1000
Case Is = "0.0000_-k"
    Valore = Valore * 1000
Case Is = "0.0_-""M""
    Valore = Valore * 1000000
Case Is = "0.00_-""M""
    Valore = Valore * 1000000
Case Is = "0.000_-""M""
    Valore = Valore * 1000000
Case Is = "0.0000_-""M""
    Valore = Valore * 1000000
Case Is = "0.0_-""m""
    Valore = Valore * 0.001
Case Is = "0.00_-""m""
    Valore = Valore * 0.001
Case Is = "0.000_-""m""
    Valore = Valore * 0.001
Case Is = "0.0000_-""m""
    Valore = Valore * 0.001
End Select
ConvMisuraNumero = Valore
End Function
```

**Function ConvNumeroMisura(Valore As Currency, Cella As String) As Currency**

```
Select Case Valore
Case Is < 1
```

```
    Valore = Valore * 1000
    Range(Cella).NumberFormat = "0.0_-""m""
Case 1 To 999
    Range(Cella).NumberFormat = "0.0"
Case 1000 To 999999
    Range("C27").NumberFormat = "0.0_-k"
    Valore = Valore / 1000
Case Is > 1000000
    Valore = Valore / 1000000
    Range(Cella).NumberFormat = "0.0_-""M""
End Select
ConvNumeroMisura = Valore
End Function
```

**Function Eg(Portata As Currency) As Currency**

```
' valore in percentuale di Eg
Select Case Portata
Case Is = 200
    Eg = 0.07
Case Is = 2000
    Eg = 0.07
Case Is = 20000
    Eg = 0.07
Case Is = 200000
    Eg = 0.07
Case Is = 2000000
    Eg = 0.15
Case Is = 20000000
    Eg = 0.2
Case Is = 100000000
    Eg = 1
Case Is = 300000000
    Eg = 1
End Select
End Function
```

**Function Eoinl(Portata As Currency, Resistenza As Currency, Q As Double) As Double**

```
If Portata > 2000000 Then
    precisione2 = 3
Else
    precisione2 = 2
End If
Eoinl = precisione2 * Q * Resistenza
End Function
```

**Function Eq(Portata As Currency, Q As Double) As Double**

```
Eq = Q * Portata / 2
End Function
```

**Function ErroreAss(Eg As Double, Eq As Double, Eoinl As Double, Ec As Double, Misura As Currency, Cella As String) As Double**

```
ErroreAss = Eg * ConvMisuraNumero(Misura, Cella) / 100 + Ec + Eq + Eoinl
End Function
```

**Function ePercent(EroreAss As Double, Misura As Currency, Cella As String) As Double**

```
ePercent = ErroreAss * 100 / ConvMisuraNumero(Misura, Cella)
End Function
```

## Multimetro norma D1216

Le specifiche di questo strumento sono:

visore a 3 ½ cifre: 2000 punti di misura.

Le portate, risoluzione e precisione sono riportate in tabella

Portata ( $R_{FS}$ )	Risoluzione	Precisione
200 $\Omega$	100 m $\Omega$	$\pm ( 0,3\% + 5 )$
2 k $\Omega$	1 $\Omega$	$\pm ( 0,2\% + 1 )$
20 k $\Omega$	10 $\Omega$	
200 k $\Omega$	100 $\Omega$	$\pm ( 2\% + 1 )$
2 M $\Omega$	1 k $\Omega$	
20 M $\Omega$	10 k $\Omega$	

*calcolo di:*

**$E_G$ : Errore massimo di guadagno.**

Questo errore rappresenta la parte percentuale presente nella colonna della precisione presente in tabella.

**$E_q$ : Errore massimo di quantizzazione.**

Per calcolare questo valore bisogna calcolare prima calcolare Q.

$$Q = \frac{R_{FS}}{\text{punti di misura}}$$

$$E_q = \frac{Q}{2}$$

**$E_{o+inl}$ : Errore massimo di offset e di non linearità (integrale)**

Per calcolare questo valore bisogna moltiplicare il secondo valore presente nella colonna della precisione per il valore di Q.

**E: Errore massimo assoluto.**

$$E = E_G \cdot |x| + E_q + E_{o+inl}$$

Nel caso in cui si vuole valutare l'errore massimo assoluto della differenza di due resistenze si ha:

$$E = E' + E''$$

Se si vuole invece determinare l'errore massimo assoluto del rapporto di 2 resistenze allora ci conviene determinare prima l'errore relativo percentuale e poi procedere con la seguente formula:

$$E = \frac{e_{\%} \cdot \left| \frac{x'}{x''} \right|}{100}$$

$e_{\%}$ : **Errore massimo relativo percentuale.**

$$e_{\%} = \frac{E}{|x|} \cdot 100$$

Nel caso in cui si vuole valutare l'errore relativo percentuale della differenza di due resistenze si procede con:

$$e_{\%} = \frac{E}{|x' - x|} \cdot 100$$

Se si vuole invece determinare l'errore percentuale del rapporto di 2 resistenze invece si procede con:

$$e_{\%} = e_{\%}' + e_{\%}''$$

Queste formule sono state utilizzate per implementare delle funzioni utilizzando il VBA nel programma Excel utili per ottenere la seguente tabella:

<b>Multimetro digitale Norma D1216</b>							
Resistenza	Lettura	Portata $R_{FS}$ [ $\Omega$ ]	$E_G$ [%]	$E_{O+inl}$ [ $\Omega$ ]	$E_q$ [ $\Omega$ ]	Errore ass.E	Errore perc e [%]
$R_1$	99,51 $\Omega$	2,00E+02	0,3	0,5	0,05	0,849 $\Omega$	0,85
$R_2$	118,85 k $\Omega$	2,00E+05	0,2	100	50	387,7 $\Omega$	0,33
$(R_3)_{max}$	0,5115 M $\Omega$	2,00E+06	2	1000	500	11730 $\Omega$	2,29
$(R_4)_{max}$	10,652 k $\Omega$	2,00E+04	0,2	10	5	36,304 $\Omega$	0,34
$(R_3)_{max} - R_2$	0,3927 M $\Omega$	—	—	—	—	12118 $\Omega$	3,09
$(R_4)_{max} - R_1$	10,552 k $\Omega$	—	—	—	—	37,15 $\Omega$	0,35
$(R_3)_{max}/R_2$	4,304	—	—	—	—	0,113	2,619
$(R_4)_{max}/R_1$	107,045	—	—	—	—	1,278	1,194

<b>Presentazione dei risultati della misura di resistenze (con Norma D1216)</b>	
$R_1 = 99,51 \pm 0,085 \Omega$	$R_2 = 118,9 \pm 0,39 \text{ k}\Omega$
$(R_3)_{max} = 0,512 \pm 0,0027 \text{ M}\Omega$	$(R_4)_{max} = 10,652 \pm 0,0117 \text{ k}\Omega$
$(R_3)_{max} - R_2 = 0,393 \pm 0,0121 \text{ M}\Omega$	$(R_4)_{max} - R_1 = 10,552 \pm 0,0371 \text{ k}\Omega$
$(R_3)_{max}/R_2 = 4,30 \pm 0,113$	$(R_4)_{max}/R_1 = 107,05 \pm 1,278$

Le funzioni realizzate in VBA sono:

**Function Portata(Valore As Currency) As Currency**

```
Select Case Valore
Case Is < 200
    Portata = 200
Case Is < 2000
    Portata = 2000
Case Is < 20000
    Portata = 20000
Case Is < 200000
    Portata = 200000
Case Is < 2000000
    Portata = 2000000
Case Is < 100000000
    Portata = 100000000
Case Is < 300000000
    Portata = 300000000
Case Else
    MsgBox ("il valore della resistenza supera il
    massimo valore di fondo scala")
End Select
End Function
```

**Function ConvMisuraNumero(Valore As Currency, Cella As String) As Currency**

```
Dim Formato As String
Formato = Range(Cella).NumberFormat
Select Case Formato
Case Is = "0.0_-k"
    Valore = Valore * 1000
Case Is = "0.00_-k"
    Valore = Valore * 1000
Case Is = "0.000_-k"
    Valore = Valore * 1000
Case Is = "0.0000_-k"
    Valore = Valore * 1000
Case Is = "0.0_-""M""
    Valore = Valore * 1000000
Case Is = "0.00_-""M""
    Valore = Valore * 1000000
Case Is = "0.000_-""M""
    Valore = Valore * 1000000
Case Is = "0.0000_-""M""
    Valore = Valore * 1000000
Case Is = "0.0_-""m""
    Valore = Valore * 0.001
Case Is = "0.00_-""m""
    Valore = Valore * 0.001
Case Is = "0.000_-""m""
    Valore = Valore * 0.001
Case Is = "0.0000_-""m""
    Valore = Valore * 0.001
End Select
ConvMisuraNumero = Valore
End Function
```

**Function ConvNumeroMisura(Valore As Currency, Cella As String) As Currency**

```
Select Case Valore
```

```
Case Is < 1
    Valore = Valore * 1000
    Range(Cella).NumberFormat = "0.0_-""m""
Case 1 To 999
    Range(Cella).NumberFormat = "0.0"
Case 1000 To 999999
    Range("C27").NumberFormat = "0.0_-k"
    Valore = Valore / 1000
Case Is > 1000000
    Valore = Valore / 1000000
    Range(Cella).NumberFormat = "0.0_-""M""
End Select
ConvNumeroMisura = Valore
End Function
```

**Function Eg(Portata As Currency) As Currency**

```
' valore in percentuale di Eg
Select Case Portata
Case Is = 200
    Eg = 0.07
Case Is = 2000
    Eg = 0.07
Case Is = 20000
    Eg = 0.07
Case Is = 200000
    Eg = 0.07
Case Is = 2000000
    Eg = 0.15
Case Is = 20000000
    Eg = 0.2
Case Is = 100000000
    Eg = 1
Case Is = 300000000
    Eg = 1
End Select
End Function
```

**Function Eoinl(Portata As Currency, Resistenza As Currency, Q As Double) As Double**

```
If Portata > 2000000 Then
    precisione2 = 3
Else
    precisione2 = 2
End If
Eoinl = precisione2 * Q * Resistenza
End Function
```

**Function Eq(Portata As Currency, Q As Double) As Double**

```
Eq = Q * Portata / 2
End Function
```

**Function ErroreAss(Eg As Double, Eq As Double, Eoinl As Double, Ec As Double, Misura As Currency, Cella As String) As Double**

```
ErroreAss = Eg * ConvMisuraNumero(Misura, Cella) / 100 + Ec + Eq + Eoinl
End Function
```

**Function ePercent(EroreAss As Double, Misura As Currency, Cella As String) As Double**

```
ePercent = ErroreAss * 100 /
ConvMisuraNumero(Misura, Cella)
End Function
```

## Misura della $V_{BE}$ e della $V_{BC}$ del BJT

Impostato adesso il multimetro come prova diodi proviamo le polarità delle giunzioni del BJT utilizzato nel circuito. In questo caso il multimetro, assume caratteristiche simile ad un generatore di corrente, infatti, se tra i suoi terminali si chiude un circuito, riesce a far circolare in questo circuito una corrente fissa di 0.8 mA. Sul display del multimetro viene visualizzato la tensione presente tra i terminali del multimetro. Questa corrente è sufficiente per polarizzare la giunzione pn di un diodo. Pertanto se questa corrente polarizza direttamente un diodo, ai capi del diodo, e quindi tra i terminali del multimetro, è presente una tensione pari all'incirca di 0.7V.

Questa funzionalità del multimetro permette di verificare il corretto funzionamento della giunzione e quindi verificare possibili guasti nei diodi e nei BJT inoltre permette di valutare se un BJT è PNP o NPN.

Con questo metodo sono state eseguite le misure della  $V_{BE}$  e della  $V_{BC}$  del BJT.

È difficile avere delle misure precise della  $V_{BE}$  e della  $V_{BC}$  poiché la caduta di tensione con polarizzazione diretta tende ad aumentare per parecchi minuti di pochi millivolt. Pertanto in queste misure ha poco senso avere molte cifre significative pertanto dopo la virgola sono state considerate solo le prime 2 cifre significative, aumentando il passo di quantizzazione portandolo al valore di:  $Q=0,01$  V.

Il multimetro utilizzato è sempre il HP974A

Che come prova diodi, le specifiche di questo strumento sono:

**Precisione:**  $\pm(1\%+2)$ .

**risoluzione:** 100 $\mu$ V

*calcolo di:*

**$E_G$ : Errore massimo di guadagno.**

Questo errore rappresenta la parte percentuale presente nella colonna della precisione.

**$E_q$ : Errore massimo di quantizzazione.**

$$E_q = \frac{Q}{2}$$

**$E_{o+inl}$ : Errore massimo di offset e di non linearità (integrale)**

Per calcolare questo valore bisogna moltiplicare il secondo valore presente nella colonna della precisione per il valore di Q.

**E: Errore massimo assoluto.**

$$E = E_G \cdot |x| + E_q + E_{o+inl}$$

**$e_{\%}$ : Errore massimo relativo percentuale.**

$$e_{\%} = \frac{E}{|x|} \cdot 100$$

Queste formule sono state utilizzate per ottenere la seguente tabella:

<b>Multimetro digitale HP974A come prova diodi</b>							
	Letture [ V ]	Risoluzione [ $\mu$ V ]	$E_G$ [%]	$E_{O+inl}$ [ $\mu$ V ]	$E_q$ [ V ]	Errore ass. E [ V ]	Errore perc e [%]
$V_{BE}$	0,7279	100	1	200	0,005	0,012479	1,714
$V_{BC}$	0,7248	100	1	200	0,005	0,012448	1,717

### Presentazione dei risultati

$$V_{BE} = 0,73 \pm 0,013 \text{ V}$$

$$V_{BC} = 0,72 \pm 0,013 \text{ V}$$

## Uso dell'oscilloscopio con 2 tracce in modo normale e XY

Il primo utilizzo dell'oscilloscopio è stato quello di misurare la tensione applicata al primario del trasformatore e la tensione che si trova all'uscita dello stesso. Il segnale applicato al trasformatore viene generato dal generatore di segnale con una frequenza di 1MHz e con l'ampiezza massima possibile. Questa frequenza è troppo alta per avere sul secondario del trasformatore una copia fedele della sinusoide applicata al primario.

Il segnale sul secondario risulta attenuato e nello stesso tempo sfasato.

Questo può essere visualizzato sull'oscilloscopio sia in modalità normale che in modalità XY. In questo secondo caso si osserva una specie di ciclo di isteresi che mette in evidenza che il segnale in uscita del trasformatore è sfasato rispetto al segnale del primario e nello stesso tempo non risulta una perfetta sinusoide.

Da queste misure sono stati prelevati i valori delle tensione picco picco dei segnali di ingresso e di uscita del trasformatore. L'oscilloscopio digitale utilizzato ha la funzione di fornirci questo valore senza che viene interpretato dal display, ha anche la capacità di eseguire la media di tutti i valori di picco che si presentano nel segnale periodico.

I valori  $V_{pp}$  ottenuti dallo strumento pertanto risultano abbastanza precisi.

In base alle specifiche dello strumento è stato possibile determinare i valori delle incertezze anche di queste misure.

Per eseguire questa misura è stato utilizzato l'oscilloscopio digitale HP 54600B ma noi ipotizzeremo che la prova sia ripetuta utilizzando l'oscilloscopio digitale HP 54501A, Scheda di acquisizione NB-A2000 e Scheda di acquisizione LAB-PC+. (in realtà questo lo ipotizziamo solo per il calcolo delle incertezze con le specifiche presenti sui manuali degli strumento).

## Oscilloscopio digitale HP 54600B

Le specifiche dello strumento sono:

numero di canali: 2

vertical gain accuracy:  $\pm 1.9\%$

offset accuracy:

single cursor: precisione verticale  $\pm 1.2\%$  del fondo scala

dual cursor: precisione verticale  $\pm 0.4\%$  del fondo scala

A/D vertical resolution: 8 bit (256 punti di misura)

caratteristiche monitor: il monitor è suddiviso in 8 divisioni verticali e 10 orizzontali

### Valutazione di $V_{PP1}$ , $V_{PP2}$ , $V_{PP1}/V_{PP2}$ , $V_{eff1}$ e $V_{eff2}$

*calcolo di:*

**$E_{G+inl}$ : Errore massimo di guadagno e di non linearità (integrale).**

Questo valore è espresso chiaramente nelle specifiche dello strumento come vertical gain accuracy.

**$E_{qv}$ : Errore massimo di quantizzazione sull'asse verticale.**

Per calcolare questo valore bisogna conoscere il valore di  $Q_v$ .

Questo valore viene determinato dalle dimensioni verticali del monitor e dalla risoluzione verticale:

$$Q_v = \frac{FSR_v \text{ (n° divisioni verticali)}}{\text{risoluzione e verticale}}$$

Il valore di  $E_{qv}$  viene determinato con la seguente formula:

$$E_Q = \frac{Q_v}{2}$$

**$E_o$ : Errore massimo di offset con cursore singolo e doppio**

Questo errore è espressamente riportato sul manuale delle caratteristiche dello strumento nella voce offset accuracy e rappresenta il valore percentuale di FSR.

**E: Errore massimo assoluto.**

Per determinare l'errore massimo assoluto si procede in questo modo: Quando si fa uso del cursore singolo.

$$E_v = E_{G+inl} \cdot |x| + E_o + E_{qv}$$

**$e\%$ : Errore massimo relativo percentuale.**

$$e_v \% = \frac{E_v}{|x|} \cdot 100$$



Queste formule sono state utilizzate per implementare delle funzioni utilizzando il VBA nel programma Excel utili per ottenere la seguente tabella:

<b>Oscilloscopio digitale HP54600B</b>							
Misure di tensione	Letture	Guadagno verticale $K_v$ [V/div]	$E_{G+inl}$ [%]	$E_o$ [V]	$E_q$ [V]	Errore ass. E	Err perc. e [%]
$V_{PP1}$	22,50 V	10,00	1,9	0,320	0,156	0,904 V	4,02
$V_{PP2}$	1,391 V	1,00	1,9	0,032	0,016	0,074 V	5,32
$V_{PP1}/V_{PP2}$	16,175	—	—	—	—	1,511	9,340
$V_{eff1}$	7,955 V	—	—	—	—	0,320 V	4,017
$V_{eff2}$	0,492 V	—	—	—	—	0,026 V	5,324

<b>Presentazione dei risultati</b>
$V_{PP1} = 22,50 \pm 0,904 \text{ V}$
$V_{PP2} = 1,39 \pm 0,074 \text{ V}$
$V_{PP1}/V_{PP2} = 16,18 \pm 1,511 \text{ V}$
$V_{eff1} = 7,96 \pm 0,320 \text{ V}$
$V_{eff2} = 0,49 \pm 0,026 \text{ V}$

Le funzioni realizzate in VBA sono:

**Function Eq( $K_v$  As Double) As Double**

```
Dim bit As Integer
Dim FSR As Integer
bit = 8 ' risoluzione A/D verticale
FSR = 8 *  $K_v$  ' divisioni verticali del monitor
Dim  $Q_v$  As Double
 $Q_v = FSR / (2 ^ \text{bit})$ 
 $E_q = Q_v / 2$ 
End Function
```

**Function E0( $K_v$  As Double, Cursori As String) As Double**

```
Dim FSR As Integer
FSR = 8 *  $K_v$  ' divisioni verticali del monitor
If Cursori = "Cursori Doppio" Then
```

```
 $E_o = 0.004 * FSR$ 
ElseIf Cursori = "Cursori Singolo" Then
 $E_o = 0.012 * FSR$ 
End If
End Function
```

**Function ErroreAss( $E_{ginl}$  As Double,  $E_q$  As Double,  $E_o$  As Double, Misura As Currency) As Double**

```
ErroreAss =  $E_{ginl} * Misura / 100 + E_q + E_o$ 
End Function
```

**Function ePercent(ErroreAss As Double, Misura As Currency) As Double**

```
ePercent = ErroreAss * 100 / Misura
End Function
```

## Oscilloscopio digitale HP 54501A

Le specifiche di questo strumento sono:

**numero di canali:** 4

**vertical gain accuracy:**  $\pm 1.5\%$

**offset accuracy:**  $\pm 2\%$  of offset +0.2\* V/div

**voltage measurement accuracy:**

single cursor: gain accuracy+offset accuracy+A/D vertical resolution

dual cursor: gain accuracy+2\*A/D vertical resolution

**A/D vertical resolution:** 8 bit (256 punti di misura)

**caratteristiche monitor:** il monitor è suddiviso in 8 divisioni verticali e 10 orizzontali

**Valutazione di  $V_{PP1}$ ,  $V_{PP2}$ ,  $V_{PP1}/V_{PP2}$ ,  $V_{eff1}$  e  $V_{eff2}$**

*calcolo di:*

**$E_{G+int}$ : Errore massimo di guadagno e di non linearità (integrale).**

Questo valore è espresso chiaramente nelle specifiche dello strumento come vertical gain accuracy.

**$E_{qv}$ : Errore massimo di quantizzazione sull'asse verticale.**

Per calcolare questo valore bisogna conoscere il valore di  $Q_v$ .

Questo valore viene determinato dalle dimensioni verticali del monitor e dalla risoluzione verticale:

$$Q_v = \frac{FSR_v \text{ (n° divisioni verticali)}}{\text{risoluzione e verticale}}$$

Il valore di  $E_{qv}$  viene determinato con la seguente formula:

$$E_Q = \frac{Q_v}{2}$$

**$E_o$ : Errore massimo di offset.**

Questo errore è espressamente riportato sul manuale delle caratteristiche dello strumento nella voce offset accuracy e rappresenta il valore che moltiplica V/div.

**$E_k$ : Errore massimo di offset.**

Le caratteristiche dell'offset avvertono che anche se non c'è nessuno spostamento verticale, è presente un errore di offset fisso che assume il valore percentuale presente nella voce offset accuracy delle caratteristiche dello strumento.

**E: Errore massimo assoluto.**

In base a quanto affermato espressamente sul manuale dello strumento, nella voce voltage measurement accuracy per determinare l'errore massimo assoluto si procede in questo modo:

Quando si fa uso del cursore singolo.

$$E_v = E_{G+inl} \cdot |x| + E_o + E_k \cdot |V_{offset}| + E_{qv}$$

il cursore singolo viene utilizzato per misurare la tensione massima

Quando si fa uso del cursore doppio.

$$E_v = E_{G+inl} \cdot |x| + 2 \cdot E_{qv}$$

il cursore doppio viene utilizzato per misurare la tensione di picco

**e%: Errore massimo relativo percentuale.**

$$e_{v \%} = \frac{E_v}{|x|} \cdot 100$$

Queste formule sono state utilizzate per implementare delle funzioni utilizzando il VBA nel programma Excel utili per ottenere la seguente tabella:

PS: le misure sono fatte in modalità normale quindi a cursore doppio

<b>Oscilloscopio digitale HP54501A</b>							
Misure di tensione	Letture [V]	Guadagno verticale $K_v$ [V/div]	$E_{G+inl}$ [%]	$E_o$ [V]	$E_q$ [V]	Errore ass. E [V]	Errore percent. e [%]
$V_{PP1}$	22,50	10,00	1,5	0,20	0,156	0,65	2,89
$V_{PP2}$	1,391	1,00	1,5	0,02	0,016	0,052	3,75
$V_{PP1}/V_{PP2}$	16,18					1,073	6,635
$V_{eff1}$	7,955					0,230	2,889
$V_{eff2}$	0,492					0,018	3,747

<b>Presentazione dei risultati</b>
$V_{PP1} = 22,50 \pm 0,650 \text{ V}$
$V_{PP2} = 1,39 \pm 0,052 \text{ V}$
$V_{PP1}/V_{PP2} = 16,18 \pm 1,073$
$V_{eff1} = 7,96 \pm 0,230 \text{ V}$
$V_{eff2} = 0,49 \pm 0,018 \text{ V}$

Le funzioni realizzate in VBA sono:**Function Eq(Kv As Double) As Double**

```
Dim bit As Integer
Dim FSR As Integer
bit = 8 ' risoluzione A/D verticale
FSR = 8 * Kv ' divisioni verticali del monitor
Dim Qv As Double
Qv = FSR / (2 ^ bit)
Eq = Qv / 2
End Function
```

**Function E0(Kv As Double) As Double**

```
' Rappresenta l'errore massimo di offset
' questo viene visto sul manuale dello strumento come
offset accuracy
E0 = 0.02 * Kv
End Function
```

**Function ErroreAss(Eginl As Double, Eq As Double, Eo As Double, Voffset As Double, Ek As Double, Misura As Currency, Cursori As String) As Double**

```
If Cursori = "cursori singolo" Then
    ErroreAss = Eginl * Misura / 100 + Eq + Eo + Ek *
Voffset
ElseIf Cursori = "cursori doppio" Then
    ErroreAss = Eginl * Misura / 100 + 2 * Eq
Else: MsgBox ("Attenzione: devi mettere il tipo di
cursore giusto")
End If
End Function
```

**Function ePercent(ErroreAss As Double, Misura As Currency) As Double**

```
ePercent = ErroreAss * 100 / Misura
End Function
```

## Scheda di acquisizione NB-A2000

Le specifiche di questo strumento sono:

**gain error:**  $\pm 1$ \*LSB Massimo

**offset voltage:**  $\pm 0.2$ \*LSB Massimo dopo calibrazione

**analog resolution:** 12-bit, 1 in 4,096

**differential non linearity:**  $\pm 0.3$ \*LSB tipico;  $\pm 0.75$ \*LSB massimo

**integral non linearity:**  $\pm 0.3$ \*LSB tipico;  $\pm 1$ \*LSB massimo

**relative accuracy:**  $\pm 0.8$ \*LSB tipico;  $\pm 1.5$ \*LSB massimo

### Valutazione di $V_{PP1}$ , $V_{PP2}$ , $V_{PP1}/V_{PP2}$ , $V_{eff1}$ e $V_{eff2}$

*calcolo di:*

**INL: Errore massimo di guadagno e di non linearità (integrale).**

Questo valore è espresso chiaramente nelle specifiche dello strumento come integral non linearity e visto che è espresso in funzione di LSB è semplice portarlo in funzione di FSR. Il valore di FSR è semplice da determinare ed è uguale al valore presente durante le misure da parte dell'oscilloscopio.

**DNL: Errore massimo di guadagno e di non linearità (differenziale).**

Questo valore è espresso chiaramente nelle specifiche dello strumento come differential non linearity e visto che è espresso in funzione di LSB è semplice portarlo in funzione di FSR.

**$E_{qv}$ : Errore massimo di quantizzazione sull'asse verticale.**

Per calcolare questo valore bisogna conoscere il valore di  $Q_v$ .  
Questo valore viene determinato dalle dimensioni verticali del monitor e dalla risoluzione verticale:

$$Q_v = \frac{FSR_v \text{ (n° divisioni verticali)}}{\text{risoluzione e verticale}}$$

dove la risoluzione verticale è dato da:

$$\text{risoluzione e verticale} = 2^{\text{analog resolution}}$$

Alla fine viene espresso  $Q$  in funzione di  $FSR$

Il valore di  $E_{qv}$  viene poi determinato con la seguente formula:

$$E_Q = \frac{Q_v}{2} \quad \text{funzione anche di FSR}$$

**$E_o$ : Errore massimo di offset.**

Questo errore è espressamente riportato sul manuale delle caratteristiche dello strumento nella voce offset voltage.

Il valore LSB equivale a  $Q$  pertanto è semplice riportare  $E_o$  in funzione di  $FSR$

**$E_G$ : Errore massimo di guadagno.**

Questo errore viene valutato valutando dal manuale dello strumento la voce gain error.

$$E_G \cdot FSR = \text{gain error} \quad \text{quindi:} \quad E_G = \frac{\text{gain error}}{FSR}$$

**$E$ : Errore massimo assoluto.**

Per determinare questo errore, ipotizziamo che la tensione massima è ottenuta da una misura singola mentre quella di picco picco da una differenza di misure per cui valgono le seguenti formule:

per la misura di  $V_{max}$ :

$$E = E_G \cdot |x| + E_o + INL + E_q$$

pe la misura di  $V_{pp}$ :

$$E = E_G \cdot |\Delta x| + 2 \cdot E_q + \min(2 \cdot INL; N \cdot DNL)$$

dove  $N$  rappresenta la differenza tra le due misure in LSB:

$$N = \frac{\Delta x}{Q}$$

**$e\%$ : Errore massimo relativo percentuale.**

$$e_{v\%} = \frac{E_v}{|x|} \cdot 100$$

Queste formule sono state utilizzate per implementare delle funzioni utilizzando il VBA nel programma Excel utili per ottenere la seguente tabella:

PS: le misure sono fatte in modalità normale quindi a cursore doppio

Scheda di acquisizione dati NB-A2000										
Misure di tensione	FSR [V]	Letture	N [LSB]	E <sub>G</sub> [%]	DNL [mV]	INL [mV]	E <sub>O</sub> [mV]	E <sub>q</sub> [mV]	Errore ass. E	Errore perc. e [%]
V <sub>PP1</sub>	32	22,50 V	2880	0,024	7,81	11,72	—	3,91	36,743 mV	0,163
V <sub>PP2</sub>	16	1,391 V	356	0,024	2,93	3,91	—	1,95	12,058 mV	0,867
V <sub>PP1</sub> /V <sub>PP2</sub>	—	16,18	—	—	—	—	—	—	0,167	1,030
V <sub>eff1</sub>	—	7,955 V	—	—	—	—	—	—	12,991 mV	0,163
V <sub>eff2</sub>	—	0,492 V	—	—	—	—	—	—	4,263 mV	0,867

Presentazione dei risultati
V <sub>PP1</sub> = 22,50 ± 0,037 V
V <sub>PP2</sub> = 1,39 ± 0,012 V
V <sub>PP1</sub> /V <sub>PP2</sub> = 16,18 ± 0,167 V
V <sub>eff1</sub> = 7,96 ± 0,013 V
V <sub>eff2</sub> = 0,49 ± 0,004 V

Le funzioni realizzate in VBA:

**Function NN(Misura As Double, Bit As Integer, FSR As Integer) As Double**

NN = Misura \* 2 ^ Bit / FSR

' questa formula deriva da N=misura/Q e Q=FSR/2^bit

End Function

**Function Eq(FSR As Integer, Bit As Double) As Double**

' Valore espresso in mV

Q = FSR / (2 ^ Bit)

Eq = Q \* 1000 / 2

End Function

**Function Eo(FSR As Integer, Bit As Integer) As Double**

' Valore espresso in mV

Q = FSR / (2 ^ Bit)

Eo = 0.2 \* Q \* 1000

End Function

**Function Eg(Gain As Double, Bit As Integer) As Double**

' il valore di Gain error viene espresso in LSB (Q)

Eg = Gain \* 100 / (2 ^ Bit)

End Function

**Function DNL(valDNL As Double, FSR As Integer, Bit As Integer) As Double**

' il parametro passato viene moltiplicato per LSB (Q)

Q = FSR / (2 ^ Bit)

' Valore espresso in mV

DNL = valDNL \* Q \* 1000

End Function

**Function INL(valINL As Double, FSR As Integer, Bit As Integer) As Double**

' il parametro passato viene moltiplicato per LSB (Q)

Q = FSR / (2 ^ Bit)

' Valore espresso in mV

INL = valINL \* Q \* 1000

End Function

```

Function EVpp(DNL As Double, INL As Double,
NN As Double, Eg As Double, Misura As Double,
Eq As Double) As Double
If (2 * INL > NN * DNL) Then
    EVpp = Eg / 100 * Misura * 1000 + 2 * Eq + NN *
DNL
Else
    EVpp = Eg / 100 * Misura * 1000 + 2 * Eq + 2 *
INL
End If
End Function
    
```

```

Function EVmax(INL As Double, Eg As Double,
Misura As Double, Eq As Double) As Double
    EVmax = Eg / 100 * Misura * 1000 + Eq + INL
End Function
    
```

```

Function ePercent(E As Double, Misura As Double)
ePercent = E * 100 / Misura / 1000
End Function
    
```

## Scheda di acquisizione LAB- PC+

Le specifiche di questo strumento sono:

**measurement (gain) accuracy:** 0.04% max, ±0.025% typical  
**offset voltage:** Trimmable to zero  
**analog resolution:** 12-bit, 1 in 4,096  
**differential non linearity:** ± 0.5\*LSB tipico; ± 1\*LSB massimo  
**nonlinearity+quantization error:** ± 0.5\*LSB tipico  
**relative accuracy (non linearity):** ± 1.5\*LSB tipico

Valutazione di  $V_{PP1}$  ,  $V_{PP2}$  ,  $V_{PP1}/V_{PP2}$ ,  $V_{eff1}$  e  $V_{eff2}$

*calcolo di:*

### **INL: Errore massimo di guadagno e di non linearità (integrale).**

Questo valore è espresso chiaramente nelle specifiche dello strumento come realtive accuracy e visto che è espresso in funzione di LSB è semplice portarlo in funzione di FSR.

Il valore di FSR è semplice da determinare ed è uguale al valore presente durante le misure da parte dell'oscilloscopio.

### **DNL: Errore massimo di guadagno e di non linearità (differenziale).**

Questo valore è espresso chiaramente nelle specifiche dello strumento come differential non linearity e visto che è espresso in funzione di LSB è semplice portarlo in funzione di FSR.

### **$E_{qv}$ : Errore massimo di quantizzazione sull'asse verticale.**

Per calcolare questo valore bisogna conoscere il valore di  $Q_v$ .

Questo valore viene determinato dalle dimensioni verticali del monitor e dalla risoluzione verticale:

$$Q_v = \frac{FSR_v \text{ (n° divisioni verticali)}}{\text{risoluzione e verticale}}$$

dove la risoluzione verticale è dato da:

$$\text{risoluzione e verticale} = 2^{\text{analog resolution}}$$

Alla fine viene espresso  $Q$  in funzione di FSR

Il valore di  $E_{qv}$  viene poi determinato con la seguente formula:

$$E_Q = \frac{Q_v}{2} \quad \text{funzione anche di FSR}$$

**$E_o$ : Errore massimo di offset.**

Questo errore è espressamente riportato sul manuale delle caratteristiche dello strumento nella voce offset voltage.

**$E_G$ : Errore massimo di guadagno.**

Questo errore viene valutato valutando dal manuale dello strumento la voce measurement (gain) accuracy.

**$E$ : Errore massimo assoluto.**

Per determinare questo errore, ipotizziamo che la tensione massima è ottenuta da una misura singola mentre quella di picco picco da una differenza di misure per valgono le seguenti formule:

per la misura di  $V_{max}$ :

$$E = E_G \cdot |x| + E_o + INL + E_q$$

per la misura di  $V_{pp}$  (differenza di tensioni):

$$E = E_G \cdot |\Delta x| + 2 \cdot E_q + \min(2 \cdot INL; N \cdot DNL)$$

dove  $N$  rappresenta la differenza tra le due misure in LSB:

$$N = \frac{\Delta x}{Q}$$

**$e\%$ : Errore massimo relativo percentuale.**

$$e_{v\%} = \frac{E_v}{|x|} \cdot 100$$



Queste formule sono state utilizzate per implementare delle funzioni utilizzando il VBA nel programma Excel utili per ottenere la seguente tabella:

PS: le misure sono fatte in modalità normale quindi a cursore doppio

Scheda di acquisizione dati LAB-PC+										
Misure di tensione	FSR [V]	Letture	N [LSB]	E <sub>G</sub> [%]	DNL [mV]	INL [mV]	E <sub>O</sub> [mV]	E <sub>q</sub> [mV]	Errore ass. E	Errore perc. e [%]
V <sub>PP1</sub>	32	22,50 V	2880	0,04	7,81	11,72	—	3,91	40,25 mV	0,18
V <sub>PP2</sub>	16	1,391 V	356	1,04	3,91	5,86	—	1,95	30,09 mV	2,16
V <sub>PP1</sub> /V <sub>PP2</sub>		16,18							0,379	2,34
V <sub>eff1</sub>		7,955 V							14,231 mV	0,179
V <sub>eff2</sub>		0,492 V							10,639 mV	2,163

Presentazione dei risultati
V <sub>PP1</sub> = 22,50 ± 0,041 V
V <sub>PP2</sub> = 1,39 ± 0,030 V
V <sub>PP1</sub> /V <sub>PP2</sub> = 16,18 ± 0,379 V
V <sub>eff1</sub> = 7,96 ± 0,014 V
V <sub>eff2</sub> = 0,49 ± 0,011 V

Le funzioni realizzate in VBA sono:

**Function NN(Misura As Double, Bit As Integer, FSR As Integer) As Double**

NN = Misura \* 2 ^ Bit / FSR

' questa formula deriva da N=misura/Q e Q=FSR/2^bit

End Function

**Function Eq(FSR As Integer, Bit As Double) As Double**

' Valore espresso in mV

Q = FSR / (2 ^ Bit)

Eq = Q \* 1000 / 2

End Function

**Function Eo(FSR As Integer, Bit As Integer) As Double**

' Valore espresso in mV

Q = FSR / (2 ^ Bit)

Eo = 0.2 \* Q \* 1000

End Function

**Function DNL(valDNL As Double, FSR As Integer, Bit As Integer) As Double**

Q = FSR / (2 ^ Bit)

DNL = valDNL \* Q \* 1000

End Function

**Function INL(valINL As Double, FSR As Integer, Bit As Integer) As Double**

Q = FSR / (2 ^ Bit)

INL = valINL \* Q \* 1000

End Function

**Function EVpp(DNL As Double, INL As Double, NN As Double, Eg As Double, Misura As Double, Eq As Double) As Double**

If (2 \* INL > NN \* DNL) Then

EVpp = Eg / 100 \* Misura \* 1000 + 2 \* Eq + NN \* DNL

DNL

Else

EVpp = Eg / 100 \* Misura \* 1000 + 2 \* Eq + 2 \* INL

INL

End If

End Function

**Function EVmax(INL As Double, Eg As Double, Misura As Double, Eq As Double) As Double**

EVmax = Eg / 100 \* Misura \* 1000 + Eq + INL

End Function

**Function ePercent(E As Double, Misura As Double)**

ePercent = E \* 100 / Misura / 1000

End Function

## Caratterizzazione del BJT: esecuzione di misure manuali (modoXY)

In modalità XY le misure vengono effettuate a cursore singolo pertanto bisogna considerare questo nel momento in cui bisogna prendere le specifiche dello strumento per ricavare i valori delle incertezze.

In questo paragrafo sarà valutata la misura della  $V_{RMAX1}$  utile per poi ricavare il valore della  $I_C$ . Per eseguire questa misura è stato utilizzato l'oscilloscopio digitale HP 54600B ma noi ipotizzeremo che la prova sia ripetuta utilizzando l'oscilloscopio digitale HP 54501A, Scheda di acquisizione NB-A2000 e Scheda di acquisizione LAB-PC+. (in realtà questo lo ipotizziamo solo per il calcolo delle incertezze con le specifiche presenti sui manuali degli strumento).

PS:

Per come è stata eseguita la relazione, eseguire queste misure sarà adesso molto semplice in quanto ogni strumento presenta opportune funzioni in VBA che determinano i parametri delle misure, che al loro interno sono rinchiusi le relative specifiche.

Mostriamo adesso le tabelle che mostrano la misura di  $V_{RMAX1}$

<b>Oscilloscopio digitale HP 54600B</b>							
	Guadagno verticale $K_V$ [V/div]	Valore Misurato [mV]	$E_{G+inl}$ [%]	$E_o$ [mV]	$E_q$ [ mV ]	Errore ass. E [mV ]	Errore perc.e [%]
$V_{RMAX1}$	200	1069	1,9	19,2	3,125	42,64	3,99

### Presentazione dei risultati

$$V_{RMAX1} = 1069 \pm 42,6 \text{ mV}$$

<b>Oscilloscopio digitale HP 54501A</b>								
	Guadagno verticale $K_V$ [V/div]	Valore Misurato [mV]	$E_{G+inl}$ [%]	$E_o$ [mV]	$E_q$ [ mV ]	$E_k$ [%]	Errore ass. E [mV ]	Errore perc.e [%]
$V_{RMAX1}$	200	1069,00	1,5	40,00	3,125	2	59,16	5,53

### Presentazione dei risultati

$$V_{RMAX1} = 1069 \pm 59,2 \text{ mV}$$

**Scheda di acquisizione dati LAB-PC**

	Guadagno verticale $K_V$ [V/div]	Valore Misurato [mV]	$E_G$ [%]	$E_o$ [mV]	INL [ mV ]	$E_q$ [mV]	Errore ass. E [mV ]	Errore perc.e [%]
$V_{RMAX1}$	1600	1069	0,04	0	0,586	0,195	1,209	0,11

**Presentazione dei risultati**

$$V_{RMAX1} = 1069 \pm 1,2 \text{ mV}$$

**Scheda di acquisizione dati NB-A2000**

	Guadagno verticale $K_V$ [V/div]	Valore Misurato [mV]	$E_G$ [%]	$E_o$ [mV]	INL [ mV ]	$E_q$ [mV]	Errore ass. E [mV ]	Errore perc.e [%]
$V_{RMAX1}$	1600	1069	0,024	0,08	0,391	0,195	0,925	0,087

**Presentazione dei risultati**

$$V_{RMAX1} = 1069 \pm 0,9 \text{ mV}$$

## Determinazione della corrente $I_C$ utilizzando la $V_{R_{MAX1}}$ ottenuta attraverso misure manuali in modo XY

Dopo aver determinato la misura della tensione ai capi della resistenza  $R_1$ , è possibile eseguire la misura indiretta della corrente di collettore semplicemente sapendo che  $I_C = V_{R_{MAX1}}/R_1$ .

Per eseguire questa misura sarà utilizzato il valore della resistenza  $R_1$  misurata con il multimetro digitale HP974A. Tale valore è:  $R_1 = 99,51 \pm 0,085 \Omega$ .

Valutiamo pertanto il valore della corrente associata ad ogni oscilloscopio che ha determinato il valore di  $V_{R_{MAX1}}$ .

Visto che sono disponibili gli errori assoluti, la formula che utilizzeremo è la seguente:

$$E_{tot} = \frac{E_{R_1} V_{R_{MAX1}} + E_{V_{R_{MAX1}}} R_1}{R_1^2}$$

tipo di strumento	Misura di $R_1$ [Ω]	E ass di $R_1$ [Ω]	Misura di $V_{R_{MAX1}}$ [mV]	E ass di $V_{R_{MAX1}}$ [mV]	$I_C$ [mA]	E ass di $I_C$ [mA]	presentazione
HP54600B	99,51	0,085	1069	42,6	10,74	0,437	$I_C = 10,74 \pm 0,437$ mA
HP54501A	99,51	0,085	1069	59,2	10,74	0,604	$I_C = 10,74 \pm 0,604$ mA
Scheda NB-A2000	99,51	0,085	1069	0,9	10,74	0,018	$I_C = 10,74 \pm 0,018$ mA
Scheda LAB-PC	99,51	0,085	1069	1,2	10,74	0,021	$I_C = 10,74 \pm 0,021$ mA

## Caratterizzazione del BJT: esecuzione di misure automatiche in modo normale

In modalità normale le misure vengono effettuate a cursore doppio pertanto bisogna considerare questo nel momento in cui bisogna prendere le specifiche dello strumento per ricavare i valori delle incertezze.

In questo paragrafo sarà valutata la misura della  $V_{R_{MAX1}}$  utile per poi ricavare il valore della  $I_C$  (come fatto anche in modalità XY visto nel paragrafo precedente) e sarà anche misurata anche la  $V_{CE_{MAX}}$ .

Per eseguire queste misure è stato utilizzato l'oscilloscopio digitale HP 54600B ma noi ipotizzeremo che la prova sia ripetuta utilizzando l'oscilloscopio digitale HP 54501A, Scheda di acquisizione NB-A2000 e Scheda di acquisizione LAB-PC+. (in realtà questo lo ipotizziamo solo per il calcolo delle incertezze con le specifiche presenti sui manuali degli strumenti).

PS:

Per come è stata eseguita la relazione, eseguire queste misure sarà adesso molto semplice in quanto ogni strumento presenta opportune funzioni in VBA che determinano i parametri delle misure.

Mostriamo adesso le tabelle che mostrano la misura di  $V_{RMAX1}$  e di  $V_{CEMAX}$ .

<b>Oscilloscopio digitale HP 54600B</b>							
	Guadagno verticale $K_v$ [V/div]	Valore Misurato [mV]	$E_{G+inl}$ [%]	$E_o$ [mV]	$E_q$ [ mV ]	Errore ass. E [mV ]	Errore perc.e [%]
$V_{Rmax1}$	200	1069	1,9	6,4	3,125	29,84	2,79
$V_{CEMAX}$	400	3047	1,9	12,8	6,250	76,94	2,53

<b>Presentazione dei risultati</b>
$V_{RMAX1} = 1069 \pm 29,9 \text{ mV}$
$V_{CEMAX} = 3047 \pm 76,9 \text{ mV}$

<b>Oscilloscopio digitale HP 54501A</b>								
	Guadagno verticale $K_v$ [V/div]	Valore Misurato [mV]	$E_{G+inl}$ [%]	$E_o$ [mV]	$E_q$ [ mV ]	$E_k$ [%]	Errore ass. E [mV ]	Errore perc.e [%]
$V_{Rmax1}$	200	1069	1,5	40,00	3,125	2	22,29	2,08
$V_{CEMAX}$	400	3047	1,5	80,00	6,250	3	58,21	1,91

<b>Presentazione dei risultati</b>
$V_{RMAX1} = 1069 \pm 22,3 \text{ mV}$
$V_{CEMAX} = 3047 \pm 58,2 \text{ mV}$

**Scheda di acquisizione dati LAB-PC**

	Guadagno verticale $K_V$ [V/div]	Valore Misurato [mV]	$E_G$ [%]	$E_o$ [mV]	INL [ mV ]	$E_q$ [mV]	Errore ass. E [mV ]	Errore perc.e [%]
$V_{Rmax1}$	1600	1069	0,04	0	0,586	0,195	1,209	0,11
$V_{CEMAX}$	3200	3047	0,04	0	1,172	0,391	2,781	0,09

**Presentazione dei risultati**

$$V_{RMAX1} = 1069 \pm 1,2 \text{ mV}$$

$$V_{CEMAX} = 3047 \pm 2,8 \text{ mV}$$

**Scheda di acquisizione dati NB-A2000**

	Guadagno verticale $K_V$ [V/div]	Valore Misurato [mV]	$E_G$ [%]	$E_o$ [mV]	INL [ mV ]	$E_q$ [mV]	Errore ass. E [mV ]	Errore perc.e [%]
$V_{Rmax1}$	1600	1069	0,024	0,08	0,391	0,195	0,925	0,087
$V_{CEMAX}$	3200	3047	0,024	0,16	0,781	0,391	2,072	0,068

**Presentazione dei risultati**

$$V_{RMAX1} = 1069 \pm 0,9 \text{ mV}$$

$$V_{CEMAX} = 3047 \pm 2,1 \text{ mV}$$

## Determinazione della corrente $I_C$ utilizzando la $V_{R_{MAX1}}$ ottenuta attraverso misure automatiche in modo normale

Dopo aver determinato la misura della tensione ai capi della resistenza  $R_1$ , è possibile eseguire la misura indiretta della corrente di collettore semplicemente sapendo che  $I_C = V_{R_{MAX1}}/R_1$ .

Per eseguire questa misura sarà utilizzato il valore della resistenza  $R_1$  misurata con il multimetro digitale HP974A. Tale valore è :  $R_1 = 99,51 \pm 0,085 \Omega$ .

Valutiamo pertanto il valore della corrente associata ad ogni oscilloscopio che ha determinato il valore di  $V_{R_{MAX1}}$ .

Visto che sono disponibili gli errori assoluti, la formula che utilizzeremo è la seguente:

$$E_{I_C} = \frac{E_{R_1} V_{R_{MAX1}} + E_{V_{R_{MAX1}}} R_1}{R_1^2}$$

tipo di strumento	Misura di $R_1$ [Ω]	E ass di $R_1$ [Ω]	Misura di $V_{R_{MAX1}}$ [mV]	E ass di $V_{R_{MAX1}}$ [mV]	$I_C$ [mA]	E ass di $I_C$ [mA]	presentazione
HP54600B	99,51	0,085	1069	29,9	10,74	0,310	$I_C = 10,74 \pm 0,310$ mA
HP54501A	99,51	0,085	1069	22,3	10,74	0,233	$I_C = 10,74 \pm 0,233$ mA
Scheda NB-A2000	99,51	0,085	1069	0,9	10,74	0,018	$I_C = 10,74 \pm 0,018$ mA
Scheda LAB-PC	99,51	0,085	1069	1,2	10,74	0,021	$I_C = 10,74 \pm 0,021$ mA

## Misura della corrente $I_B$

Con l'amperometro presente nel circuito, è possibile misurare la corrente di base  $I_B$ .

La funzione di amperometro è stata eseguita dal multimetro digitale HP974A.

Il valore di questa corrente di base è molto piccola, per questo è soggetto maggiormente ad interferenze sia con altre correnti interne sia con campi elettromagnetici esterni. Queste interferenze producono una variazione del suo valore nell'ordine sei centesimi di micro-ampere.

Il multimetro utilizzato presenta la funzione Min-Max. Con questa funzione è stato possibile rilevare i valori minimo, medio e massimo assunti dalla corrente durante la prova.

L'incertezza totale è stata calcolata considerando l'incertezza del valore più distante da quello medio e sommando a tale termine la massima escursione del segnale rispetto al valore medio.

I valori misurati sono i seguenti:

$$I_{B_{min}} = 40.13 \mu A$$

$$I_{B_{max}} = 40.19 \mu A$$

$$I_{B_{avg}} = 40.16 \mu A$$

Le specifiche dello strumento come amperometro sono indicate nella tabella sottostante.

Portata ( $I_{FS}$ )	Risoluzione ( $Q$ )	Precisione
500 $\mu A$	1 nA	$\pm(0,3\%+2)$
50 mA	1 $\mu A$	
500 mA	10 $\mu A$	
10 A	1 mA	$\pm(0,7\%+2)$

**calcolo di:**

**$E_G$ : Errore massimo di guadagno.**

Questo errore rappresenta la parte percentuale presente nella colonna della precisione presente in tabella.

**$E_q$ : Errore massimo di quantizzazione.**

$$E_q = \frac{Q}{2}$$

**$E_{o+inl}$ : Errore massimo di offset e di non linearità (integrale)**

Per calcolare questo valore bisogna moltiplicare il secondo valore presente nella colonna della precisione per il valore di  $Q$ .

**$E$ : Errore massimo assoluto.**

$$E = E_G \cdot |x| + E_q + E_{o+inl}$$

**$e_{\%}$ : Errore massimo relativo percentuale.**

$$e_{\%} = \frac{E}{|x|} \cdot 100$$

In base a quello che è stato prima detto, bisogna considerare il valore dell'incertezza del valore più distante da quello medio e poi sommare a tale termine la massima escursione del segnale rispetto al valore medio. In questo caso sia il valore minimo e il valore massimo risultano distanti della stessa quantità dal valore medio, pertanto la scelta in questo caso è facoltativa.

Determiniamo pertanto l'incertezza di  $I_{Bmax}$ .

<b>Misura di <math>I_B</math> con il multimetro digitale HP974A</b>							
Valore nominale di $I_B$	Lettura [ $\mu A$ ]	Portata $I_{FS}$ [ $\mu A$ ]	$E_G$ [%]	$E_{O+inl}$ [ $\mu A$ ]	$E_q$ [ $\mu A$ ]	Errore ass. E [ $\mu A$ ]	Errore perc. $e$ [%]
40,19 $\mu A$	40,19	500	0,3	0,02	0,005	0,146	0,362



Determiniamo quindi l'incertezza di  $I_{Bavg}$

Valore nominale di $I_{BAVG}$	Lettura [ $\mu A$ ]	$\Delta I$ con $I_{BMAX}$ [ $\mu A$ ]	E ass di $I_{BMAX}$ [ $\mu A$ ]	E ass tot [ $\mu A$ ]	presentazione
40,16 $\mu A$	40,16	0,03	0,146	0,176	$I_{BAVG} = 40,16 \pm 0,176 \mu A$

Ricavata la misura di  $I_C$  (sia in modo XY che in modo normale) e ricavata la misura di  $I_B$  è possibile determinare la misura indiretta di  $h_{FE} = I_C/I_B$ .

Visto che il valore di  $I_C$  è stato determinato in base alle specifiche di diversi oscilloscopi, e in base al fatto che l'oscilloscopio è stato utilizzato in modalità XY e in modalità normale, possiamo fare la stessa cosa per il calcolo di  $h_{FE}$ .

Visto che sono disponibili gli errori assoluti, la formula che utilizzeremo è la seguente:

$$E_{h_{FE}} = \frac{E_{I_B} V_{I_C} + E_{I_C} I_B}{I_B^2}$$

In modalità XY

tipo di strumento	Misura di $I_C$ [mA]	E ass di $I_C$ [mA]	Misura di $I_B$ [ $\mu A$ ]	E ass di $I_B$ [ $\mu A$ ]	$h_{FE}$	E ass di $h_{FE}$	presentazione
HP54600B	10,74	0,437	40,16	0,176	267,43	12,1	$267 \pm 12,1$
HP54501A	10,74	0,604	40,16	0,176	267,43	16,2	$267 \pm 16,2$
Scheda NB-A2000	10,74	0,018	40,16	0,176	267,43	1,6	$267 \pm 1,6$
Scheda LAB-PC	10,74	0,021	40,16	0,176	267,43	1,7	$267 \pm 1,7$

In modalità normale

tipo di strumento	Misura di $I_C$ [mA]	E ass di $I_C$ [mA]	Misura di $I_B$ [ $\mu A$ ]	E ass di $I_B$ [ $\mu A$ ]	$h_{FE}$	E ass di $h_{FE}$	presentazione
HP54600B	10,74	0,31	40,16	0,176	267,43	8,891	$267 \pm 8,9$
HP54501A	10,74	0,233	40,16	0,176	267,43	6,974	$267 \pm 12,1$
Scheda NB-A2000	10,74	0,018	40,16	0,176	267,43	1,620	$267 \pm 1,6$
Scheda LAB-PC	10,74	0,021	40,16	0,176	267,43	1,695	$267 \pm 1,7$

## Prova C

In questa prova è stato eseguito un programma in matlab che permette di stimare i parametri dei transistor in maniera automatica partendo dai dati in ingresso presenti nei file r96.txt e s96.prn. Questi 2 file sono stati ottenuti dall'oscilloscopio durante la prova B.

Il programma fatto in matlab si basa sul modello di Ebers-Moll del BJT la cui formula è la seguente:

$$I_C = I_{CE0} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{V_{BE} - V_{CE}}{\eta \cdot V_T}} \right) + \beta_F \cdot I_B \cdot \left( 1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right)$$

i parametri che si possono stimare sono:

- $I_{CE0}$ = corrente collettore-emettitore a base aperta
- $\eta V_T$ = prodotto tra il coefficiente di remissività e la tensione termica
- $\hat{\alpha}$ = guadagno di corrente in zona attiva diretta
- $V_A$ = tensione di Early

In questa prova il BJT lavora sempre in zona attiva diretta pertanto è possibile considerare costante la tensione tra base ed emettitore:  $V_{BE} \cong 0,7 \text{ V}$ .

Per stimare i parametri che fanno parte del modello di Ebers-Moll sono state fatte le seguenti assegnazioni:

$$m = \beta_F \cdot \frac{I_B}{V_A}, \quad n = \beta_F \cdot I_B + I_{CE0}, \quad p = I_{CE0}, \quad q = \frac{1}{\eta \cdot V_T}$$

In questo modo la formula del modello risulta più semplice da valutare:

$$I_C = m \cdot V_{CE} + n + p \cdot e^{q(V_{BE} - V_{CE})}$$

Per valori di  $V_{CE} > 1 \text{ V}$  il termine esponenziale presente nel modello risulta trascurabile pertanto risulta semplice da quei valori determinare il valore di m e n utilizzando il metodo dei minimi quadrati.

Per valutare p e q è stato utilizzato lo stesso metodo però sull'equazione  $y = \log p + q \cdot x$  in cui  $y = \log(I_C - m \cdot V_{CE} - n)$  e  $x = V_{BE} - V_{CE}$ .

Il programma fatto si basa sui seguenti file:

**nargramisure.m**: richiama prova\_c.m e rappresenta l'interfaccia verso l'utente

**prova\_c.m**: presenta il vero e proprio algoritmo per determinare i parametri

**intlin.m**: permette di fare l'interpolazione lineare (metodo dei minimi quadrati)

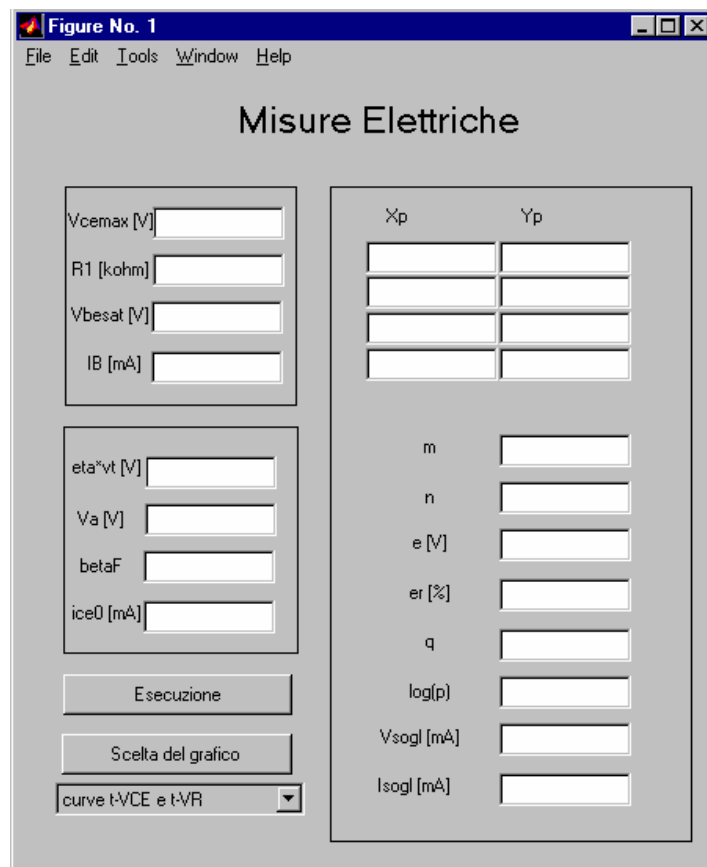
**bjt.m**: permette di fare previsioni sul comportamento del BJT

all'interno dei file **gruppo96.mat** e **interfaccia.mat** sono memorizzati variabili utili per i file .m implementati.

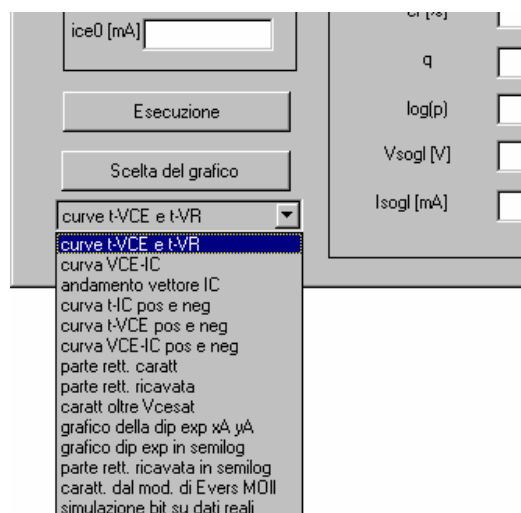
Vediamo adesso l'interfaccia grafica che si presenta nel momento in cui dal prompt del matlab scriviamo:

>> **nargramisure**

(bisogna prima entrare nella path dove ci sono i file del programma)



Il tasto esecuzione permette di eseguire l'algoritmo prova\_c.m. Dopo averlo cliccato, nei vari campi testi si presentano tutti i risultati che esprimono i parametri del BJT e utili risultati intermedi. Dopo aver cliccato sul tasto esecuzione possiamo anche visualizzare i grafici, che durante l'esecuzione dell'algoritmo vengono creati. Per visualizzare questi grafici bisogna selezionare il grafico voluto dal menù a tendina e cliccare poi il tasto "Scelta del grafico"



Vediamo adesso il programma eseguito in matlab.

## File nargramisure.m

```
function nargramisure(action)

global ice0 ListaFunzioni
global Dati Grafico pos neg vceA icA icB x y vceAi icAi
global vcemax ib xA yA xC yC yE vceC icC
global Vcemax Rltxt Vbesat IB xP1 xP2 xP3 xP4 yP1 yP2 yP3 yP4
global ice0 BetaF Va EtaVt mtxt ntxt etxt ertxt qttx logPttx Vsoglttx Isoglttx

if nargin < 1,
    action = 'initialize';
end;

if strcmp(action,'initialize')

load interfaccia

h0 = figure('Units','points', ...
    'Color',[0.8 0.8 0.8], ...
    'Colormap',mat0, ...
    'FileName','D:\politec\dafare\misure\laboratorio e
relazioni\matlab133\interfaccia.m', ...
    'PaperPosition',[18 180 576 432], ...
    'PaperUnits','points', ...
    'Position',[345 78.75 333 379.5], ...
    'Tag','Fig1', ...
    'ToolBar','none');
ListaFunzioni = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'String',mat1, ...
    'Position',[18.75 18 119.25 21.75], ...
    'Style','popupmenu', ...
    'Tag','PopupMenu1', ...
    'Value',1);
Frame1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941176470588 0.752941176470588 0.752941176470588], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[23.25 219.75 111 105], ...
    'Style','frame', ...
    'Tag','Frame1');
Vcemax = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[65.25 299.25 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText2');
Rltxt = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[65.25 276.75 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText3');
Vbesat = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[64.5 254.25 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText4');
```

```

IB = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[64.5 230.25 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText5');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941176470588 0.752941176470588 0.752941176470588], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[24 300.75 42 12.75], ...
    'String','Vcemax [V]', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[24 277.5 41.25 12.75], ...
    'String','R1 [kohm]', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[24.75 255 39.75 13.5], ...
    'String','Vbesat [V]', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[32.25 231 29.25 14.25], ...
    'String','IB [mA]', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
Esecuzione = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941176470588 0.752941176470588 0.752941176470588], ...
    'Callback','nargramisure(''Esecuzione'')', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[22.5 72 109.5 19.5], ...
    'String','Esecuzione', ...
    'Tag','Pushbutton2');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941176470588 0.752941176470588 0.752941176470588], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[150 11.25 173.25 313.5], ...
    'Style','frame', ...
    'Tag','Frame2');
xP1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[167.25 282.75 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText6');
yP1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[231 282.75 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText7');

```

```

yP2 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[231 266.25 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText1');
xP2 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[167.25 266.25 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText8');
yP3 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[231 249 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText1');
xP3 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[167.25 249 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText9');
yP4 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[231 231.75 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText1');
xP4 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[167.25 231.75 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText10');
ertxt = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[231 121.5 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText11');
etxt = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[231 145.5 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText12');
ntxt = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[231 168 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText1');
mtxt = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[231 190.5 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...

```

```

    'Tag', 'EditText13');
qtxt = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[231 97.5 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText17');
logPtxt = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[231 75 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText14');
Vsogltxt = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[231 52.5 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText15');
Isogltxt = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[231 28.5 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText16');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941176470588 0.752941176470588 0.752941176470588], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[22.5 101.25 112.5 108.75], ...
    'Style','frame', ...
    'Tag','Frame3');
ice0 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[60.75 111 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText19');
BetaF = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[60.75 135 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText20');
Va = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[61.5 157.5 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText21');
EtaVt = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[1 1 1], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[61.5 180 63 15.75], ...
    'Style','edit', ...
    'Tag','EditText22');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941176470588 0.752941176470588 0.752941176470588], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[26.25 111.75 33 14.25], ...
    'String','ice0 [mA]', ...

```

```

        'Style','text', ...
        'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941176470588 0.752941176470588 0.752941176470588], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[25.5 134.25 29.25 14.25], ...
    'String','betaF', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[25.5 156.75 29.25 14.25], ...
    'String','Va [V]', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941176470588 0.752941176470588 0.752941176470588], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[24 180.75 38.25 15], ...
    'String','eta*vt [V]', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[183 121.5 29.25 14.25], ...
    'String','er [%]', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[183 145.5 29.25 14.25], ...
    'String','e [V]', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[183 167.25 29.25 14.25], ...
    'String','n', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941176470588 0.752941176470588 0.752941176470588], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[183 191.25 29.25 14.25], ...
    'String','m', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[171 30.75 37.5 12.75], ...
    'String','Isogl [mA]', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[174 51.75 38.25 15], ...
    'String','Vsogl [V]', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');

```



```

h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[183 74.25 29.25 14.25], ...
    'String','log(p)', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941176470588 0.752941176470588 0.752941176470588], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[183 98.25 29.25 14.25], ...
    'String','q', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
SceltaGrafico = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941176470588 0.752941176470588 0.752941176470588], ...
    'Callback','nargramisure('SceltaGrafico')', ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[21.75 43.5 110.25 19.5], ...
    'String','Scelta del grafico', ...
    'Tag','Pushbutton2');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941176470588 0.752941176470588 0.752941176470588], ...
    'FontSize',20, ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[24 342.75 299.25 24.75], ...
    'String','Misure Elettriche', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText2');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941176470588 0.752941176470588 0.752941176470588], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[167.25 301.5 29.25 14.25], ...
    'String','Xp', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...
    'Units','points', ...
    'BackgroundColor',[0.752941176470588 0.752941176470588 0.752941176470588], ...
    'ListboxTop',0, ...
    'Position',[231.75 301.5 29.25 14.25], ...
    'String','Yp', ...
    'Style','text', ...
    'Tag','StaticText1');

elseif strcmp(action,'Esecuzione')
    prova_c
    set(Vcemax,'String',mat2str(Dati(1,:)));
    set(Rltxt,'String',mat2str(Dati(2,:)));
    set(Vbesat,'String',mat2str(Dati(3,:)));
    set(IB,'String',mat2str(Dati(4,:)));
    set(xP1,'String',Dati(17,:));
    set(xP2,'String',Dati(21,:));
    set(xP3,'String',Dati(18,:));
    set(xP4,'String',Dati(22,:));
    set(yP1,'String',Dati(19,:));
    set(yP2,'String',Dati(23,:));
    set(yP3,'String',Dati(20,:));
    set(yP4,'String',Dati(24,:));
    set(ice0,'String',Dati(8,:));
    set(BetaF,'String',Dati(7,:));
    set(Va,'String',Dati(6,:));
    set(EtaVt,'String',Dati(5,:));
    set(mtxt,'String',Dati(9,:));

```

```

set(ntxt, 'String', Dati(10,:));
set(etxt, 'String', Dati(11,:));
set(ertxt, 'String', Dati(12,:));
set(logPtxt, 'String', Dati(14,:));
set(qtxt, 'String', Dati(13,:));
set(Vsogltxt, 'String', Dati(15,:));
set(Isogltxt, 'String', Dati(16,:));
close
close

elseif strcmp(action, 'SceltaGrafico')
    NumeroGrafico=get(ListaFunzioni, 'value');
    switch NumeroGrafico
        case 1, figure
            plot(Grafico(:,1), Grafico(:,2), Grafico(:,1), Grafico(:,3))
            grid
            xlabel('tempo [s]')
            ylabel('tensione [V]')
            title('Andamento grafico della tensione VR e della tensione VCE')
            legend('VR', 'VCE')
        case 2, figure
            plot(Grafico(:,3), Grafico(:,4))
            grid
            xlabel('VCE [V]')
            ylabel('IC [mA]')
            title('Andamento grafico della corrente IC in funzione di VCE')
        case 3, figure
            plot(Grafico(:,4))
            grid
            xlabel('posizione nel vettore')
            ylabel('IC [mA]')
            title('Andamento grafico del vettore IC')
        case 4, figure
            plot(Grafico(pos,1), Grafico(pos,2), 'o', Grafico(neg,1), Grafico(neg,2), '.')
            grid
            xlabel('tempo [s]')
            ylabel('IC [mA]')
            title('distinzione dell\'andamento della corrente IC a pendenza positiva e negativa')
        case 5, figure
            plot(Grafico(pos,1), Grafico(pos,3), 'o', Grafico(neg,1), Grafico(neg,3), '.')
            grid
            xlabel('tempo [s]')
            ylabel('VCE [V]')
            title('distinzione dell\'andamento della tensione VCE a pendenza positiva e negativa')
        case 6, figure
            plot(Grafico(pos,3), Grafico(pos,2), 'r+', Grafico(neg,3), Grafico(neg,2), 'g.')
            grid
            xlabel('VCE [V]')
            ylabel('IC [mA]')
            title('distinzione della Ic in funz di VCE a pendenza positiva e negativa ')
        case 7, figure
            plot(vceA, icA, '.', x, y, 'o')
            grid
            xlabel('VCE [V]')
            ylabel('IC [mA]')
            title('parte linear della caratteristica presente sicuramente per VCE superiore a 1V')
        case 8, figure
            plot(vceA, icA, '.', x, y, 'o', vceA, icB, '-')
            grid
            xlabel('VCE [V]')
            ylabel('IC [mA]')
            title('parte lineare della caratteristica ricavata dal modello')
    end
end

```

```

case 9, figure
plot(vceA,icA, '.',vceAi,icAi, 'o')
grid
xlabel('VCE [V]')
ylabel('IC [mA]')
title('caratteristica per tensione superiore a VCEsat')
case 10, figure
plot(xA,yA, '.')
grid
xlabel('Vbesat-VceA(j) [V]')
ylabel('-icA(j)+m*vceA(j)+n [mA]')
title('andamento grafico di y' in funzione di x' utile x valutare altri parametri')
case 11, figure
semilogy(xC,yC, '.')
grid
title('andamento grafico di y' in funzione di x' su scala semilogaritmica')
case 12, figure
semilogy(xC,yC, '+', xC,yE, '-')
grid
title('parte lin della caratteristica ricavata dal modello su scala semilogaritmica')
case 13, figure
plot(vceA,icA, '+', vceC,icC, '-')
grid
title('caratteristica determinata con il modello di evers moll')
xlabel('VCE [V]')
ylabel('IC [mA]')
case 14, figure
Ib=40.19e-3;
Vce=3.047;
bjt('gruppo96', Vce, Ib)
end
end

```

## File prova\_c.m

```

global Dati Grafico pos neg vceA icA icB x y vceAi icAi
global vceAmax ib xA yA xC yC yE vceC icC
%=====
%= Caricamento dei dati: =
%=====
load s96.prn;
load r96.txt;

%=====
% si mettono i grafici in un vettore: Grafici()
% si mettono i valori in un vettore: Dati()
%=====

%=====
%= Estrazione del numero di campioni per traccia: =
%=====
N = length(s96);

%=====
%= Estrazione degli istanti di campionamento: =
%=====
t = s96(:, 1);

%=====
%= Estrazione dei valori assunti da VCE: =
%=====
vce = s96(:, 2);

%=====

```

```

%= Estrazione dei valori assunti da VR (dai quali si può risalire ai =
%= valori assunti dalla corrente di collettore): =
%=====
vr = s96(:, 4);

%=====
%= Correzione dell'errore di offset sui valori assunti da VCE, causa- =
%= to da un bug nel programma di acquisizione dei dati =
%= dall'oscilloscopio. =
%= Tale errore lo eliminiamo confrontando il valore max misurato as- =
%= sunto da VCE, con il valore max assunto dai valori di VCE acquisi- =
%= ti: =
%=====
vcemax = r96(23);
eo = max(vce) - vcemax;
vce = vce - eo;
Dati(1,:)=vcemax;

%=====
%= memorizzazione di t,vr e vce nella matrice Grafico =
%= utile per la visualizzazione successiva dalla schermata principale =
%=====
Grafico(:,1)=t;
Grafico(:,2)=vr;
Grafico(:,3)=vce;

%=====
%= Calcolo della corrente di collettore Ic: =
%=====
R1 = r96(8);
Ic = vr / R1;
Dati(2,:)=R1;

%=====
%= memorizzazione di Ic nella matrice Grafico =
%=====
Grafico(:,4)=Ic;

%=====
%= Selezione dei tratti in cui Ic è crescente e dei tratti in cui è =
%= decrescente. L'identificazione di tali tratti la facciamo mediante =
%= la ricerca dei massimi e dei minimi di Ic. Per far ciò, è necessa- =
%= rio l'aiuto dell'operatore, che deve selezionare le zone in cui ci =
%= sono i massimi ed i minimi, in corrispondenza dei quali c'è un =
%= netto cambio della pendenza, nel senso che il max o il min non do- =
%= vuto al rumore o ad effetti del II ordine. =
%=====

%plot(Grafico(:,4));
%grid on;
%title('selezionare gli intervalli in cui sono contenuti minimi e massimi');
%xlabel('posizione nel vettore');
%ylabel('IC [mA]');

[xP,yP]=minmaxIc(Ic);

Dati(17,:)=xP(1);
Dati(18,:)=xP(3);
Dati(19,:)=yP(1);
Dati(20,:)=yP(3);
Dati(21,:)=xP(2);
Dati(22,:)=xP(4);
Dati(23,:)=yP(2);
Dati(24,:)=yP(4);

```

```

iP=round(xP);
pos=[1:iP(1), iP(2):iP(3) iP(4):500];
neg=[iP(1):iP(2), iP(3):iP(4)];

%*****
%* STIMA DEI PARAMETRI *
%*****
%* Come modello del BJT adopereremo il seguente: *
%* *
%*  $I_c = m \cdot V_{CE} + n + p \cdot \exp(q \cdot (V_{BE} - V_{CE}))$  *
%* *
%* Analizzando il modello si può notare che per  $V_{CE} > 1V$  è predomi- *
%* nante la caratteristica rettilinea, mentre per  $V_{CE} < 1V$  lo è quel- *
%* la esponenziale, per cui la stima verrà effettuata in due parti: *
%* nella PRIMA PARTE ( $V_{CE} > 1V$ ) ricaveremo m ed n, mentre nella SE- *
%* CONDA PARTE, rilasciando l'ipotesi  $V_{CE} > 1V$ , ricaveremo p e q. *
%* *
%* Osserviamo che: *
%* *
%*  $m = \beta \cdot I_B / V_A$  *
%*  $n = \beta \cdot I_B + I_{CEO}$  *
%*  $p = I_{CEO}$  *
%*  $q = 1 / (\eta \cdot V_T)$  *
%*****

%=====
%= Le zone della caratteristica  $t-I_c$  decrescenti sono più stabili di =
%= di quelle crescenti, per cui adopereremo queste per la stima: =
%=====

vceA = vce(neg);
icA = Ic(neg);

%*****
%* STIMA DEI PARAMETRI - PARTE PRIMA *
%*****

%=====
%= Selezione e visualizzazione della parte rettilinea della =
%= caratteristica che rappresentano i valori in cui VceA =
%= (Vce con derivata negativa) risulta maggiore di 1V =
%=====

j = find(vceA > 1);
x = vceA(j);
y = icA(j);

%=====
%= Stima dei parametri m ed n: =
%= Capire come è fatta la funzione intlin =
%= che calcola m e n con formule statistiche =
%=====
[m, n] = intlin(x, y);
Dati(9,:) = m;
Dati(10,:) = n;

%=====
%= Stiamo approssimando la caratteristica del BJT per  $V_{CE} > 1V$  con =
%=  $I_c = m \cdot V_{CE} + n$ . =
%= Determiniamo gli errori massimo assoluto e relativo percentuale =
%= commessi con tale approssimazione: =
%=====
e = max(abs(y - m*x - n));
er = e / max(icA) * 100;
Dati(11,:) = e;
Dati(12,:) = er;

```

```

%=====
%= Visualizzazione della caratteristica rilevata e dell'approssima- =
%= zione della parte rettilinea appena ricavata: =
%=====
icB = m * vceA + n;

%*****
%* STIMA DEI PARAMETRI - PARTE SECONDA *
%*****

%=====
%= Dobbiamo stimare gli altri due parametri p e q. =
%= La selezione del tratto della caratteristica rilevata utile alla =
%= va effettuata dall'operatore: =
%=====
vce_sat = 0.2;
vsoglia = vce_sat - 0.1;
j= find(vceA>vsoglia);
vceAi=vceA(j);
icAi=icA(j);
figure;
plot(vceA,icA, '.', vceA(j), icA(j), '+');
grid on;
xlabel('VCE [V]');
ylabel('IC [mA]');
title('SELEZIONE LA TENSIONE DI SOGLIA. ');
disp(' ');
[vsoglia, isoglia] = ginput(1);
Dati(15,:)=vsoglia;
Dati(16,:)=isoglia;
hold on;
j = find(vceA > vsoglia);
vceAi=vceA(j);
icAi=icA(j);
plot(vceAi, icAi, 'o');
%=====
%= Adesso non possiamo più trascurare la componente esponenziale del =
%= modello, tuttavia con una serie di manipolazioni possiamo effe- =
%= tuare una "linearizzazione": =
%= =
%=  $I_c = m \cdot VCE + n + p \cdot \exp(q \cdot (VBE - VCE)) \Rightarrow$  =
%=  $I_c - m \cdot VCE - n = p \cdot \exp(q \cdot (VBE - VCE)) \quad (*)$  =
%= =
%= poniamo: =
%= 1.  $y' = I_c - m \cdot VCE - n$  =
%= 2.  $x' = VBE - VCE$  =
%= =
%= quindi, sostituendo nella (*): =
%=  $y' = p \cdot \exp(q \cdot x') \Rightarrow \ln(y') = \ln(p) + q \cdot x' \quad (o)$  =
%= =
%= poniamo: =
%= =
%= 3.  $y'' = \ln(y')$  =
%= 4.  $x'' = x'$  =
%= =
%= quindi, sostituendo nella (o): =
%= =
%=  $y'' = \ln(p) + q \cdot x''$  =
%= =
%= In conclusione la stima di p e q può essere effettuata con una =
%= interpolazione ai minimi quadrati (NON SI OTTIENE LA STIMA OTTI- =
%= MA). =
%= =
%= NOTA: Indicheremo  $x'$ ,  $y'$ ,  $x''$ ,  $y''$  rispettivamente con  $x_A$ ,  $y_A$ ,  $x_D$ , =
%= e  $y_D$ . =
%=====
vbe_sat = r96(14);
Dati(3,:)=vbe_sat;
xA = vbe_sat - vceA(j);

```

```

yA = -icA(j) + m * vceA(j) + n;
%=====
%= Osserviamo che yA assume valori negativi a causa del rumore e de- =
%= gli errori di misura, per cui non possiamo calcolare direttamente =
%= il logaritmo di yA per determinare yD, ma dobbiamo scartare quel- =
%= l'intervallo di valori in cui yA <= 0: =
%=====
[xB, k] = sort(xA);
yB = yA(k);
kk = find(yB <= 0);
inizio = max(kk) + 1;
fine = length(yB);
yC = yB(inizio: fine);
xC = xB(inizio: fine);

%=====
%= La caratteristica VCE-Ic in scala semilogaritmica sull'asse delle =
%= ordinate, dovrebbe assumere andamento rettilineo, tuttavia a cau- =
%= sa della quantizzazione di Ic, può non essere così. In particolare =
%= si può individuare un punto su tale diagramma, a sinistra del qua- =
%= le lo scostamento fra l'andamento rilevato e quello teorico è mol- =
%= to pronunciato. Si chiede all'operatore di individuare tale punto =
%= in modo tale da scartare i dati che si discostano troppo dal mo- =
%= delo. =
%=====
figure;
semilogy(xC, yC, '.');
grid on;
[xC_soglia, yC_soglia] = ginput(1);
k = find(xC >= xC_soglia);
xC = xC(k);
yC = yC(k);

%=====
%= Stima dei parametri p e q: =
%=====
yD = log(yC);
xD = xC;
[q, logp] = intlin(xD, yD);
Dati(14,:) = logp;
Dati(13,:) = q;
p = exp(logp);
yE = p * exp(q * xC);

%=====
%= Verifica...: =
%=====
vceC = linspace(-0.05, max(vce), 1000);
icC = m * vceC + n - p * exp(q * (vbe_sat - vceC));

%=====
%= Partendo dai parametri m, n, p e q determiniamo ICEO, beta, VA, =
%= eta*VT: =
%=====
ib = r96(27) / 1000;
Dati(4,:) = ib;
iceo = p;
Dati(8,:) = iceo;
betaF = (n - p) / ib;
Dati(7,:) = betaF;
va = (n - p) / m;
Dati(6,:) = va;
etavt = 1 / q;
Dati(5,:) = etavt;

%=====
%= Salvataggio dei risultati: =
%=====
save gruppo96;

```

**File minmaxIc.m**

```

function [RisultatoX,RisultatoY]=minmaxIc(Ic)

% dove Ic è il nostro vettore formato da 500 elementi

Icfinestra=Ic(60:500-40);

% IC finestra in questo modo è un vettore di 400
% elementi dove all'interno i minimi e i massimi relativi sono
% i punti che ci interessano.
% questi punti non li possiamo prendere con metodi matematici in quanto
% al segnale è aggiunto una componente di rumore

ValoriI0=[];
ValoriZero=[];
indice=1;
for i=1:400
    if Icfinestra(i)<10
        if Icfinestra(i+1)>10
            ValoriI0(indice)=i;
            indice=indice+1;
        end
    else
        if Icfinestra(i+1)<10
            ValoriI0(indice)=i;
            indice=indice+1;
        end
    end
end
indice=1;

for i=1:400
    if Icfinestra(i)<0
        if Icfinestra(i+1)>0
            ValoriZero(indice)=i;
            indice=indice+1;
        end
    else
        if Icfinestra(i+1)<0
            ValoriZero(indice)=i;
            indice=indice+1;
        end
    end
end

Xmax(1)=round((ValoriI0(1)+ValoriI0(2))/2);
Xmax(2)=round((ValoriI0(3)+ValoriI0(4))/2);
Xmin(1)=round((ValoriZero(1)+ValoriZero(2))/2);
Xmin(2)=round((ValoriZero(3)+ValoriZero(4))/2);
Xmax=Xmax+60;
Xmin=Xmin+60;

RisultatoX=[Xmax(1),Xmin(1),Xmax(2),Xmin(2)];
RisultatoY=Ic(RisultatoX);

```



## File intlin.m

```
function [m, n] = intlin(x, y);
N = length(x);
Ex = sum(x) / N;
Ey = sum(y) / N;
Exy = sum(x .* y) / N;
Ex2 = sum(x .^ 2) / N;
sigmaxy = Exy - Ex * Ey;
sigmax2 = Ex2 - Ex ^ 2;
m = sigmaxy / sigmax2;
n = (Ey * Ex2 - Ex * Exy) / sigmax2;
```

## File bjt.m

```
function bjt(nomefile, Vce, Ib, valore)

eval(['load ' nomefile])

IC=iceo*(1-exp((vbe_sat-Vce)/etavt))+betaF*Ib*(1+Vce/va);
HFE=IC/Ib;
riga1=['IB=' num2str(Ib) ' mA'];
riga2=['VCE=' num2str(Vce) ' V'];
riga3=['HFE=' num2str(HFE)];

vcesim=linspace(-0.05,max(vce),50);
ibsim=linspace(0,100e-3,10);ibsim=[ibsim Ib];
[vceg, ibg]=meshgrid(vcesim,ibsim);
icsim=iceo*(1-exp((vbe_sat-vceg)/etavt))+betaF*ibg.*(1+vceg/va);

plot(vcesim,icsim,Vce,IC,'or')
xlabel('Vce [V]')
ylabel('Ic [mA]')
ax=axis;
axis([ax(1) ax(2) -1 ax(4)]);
grid
line([Vce Vcel],[-1 ax(4)])
text(.5,ax(4)-1,riga1)
text(ax(2)/2-.5,ax(4)-1,riga2)
text(ax(2)-1.5,ax(4)-1,riga3)
```

Descriviamo adesso alcune funzioni di questo programma.

### **Descriviamo adesso la funzione nargramisure**

Questa funzione viene richiamata nel momento in cui scriviamo nel prompt del matlab: nargramisure. In questo caso non si passa nessun parametro a questa funzione. La funzione nel momento in cui vede che non gli è stato passato nessun parametro, fa apparire l'interfaccia fatta dal form, dai bottoni, dai frame, dai text box, e dal menù a tendina opportunamente predisposti. Gli eventi associati ai bottoni vengono richiamati dalla proprietà callback. Grazie a questa proprietà, al click sul bottone, viene fatta eseguire una determinata funzione. Nel nostro caso questa funzione è sempre la stessa: nargramisure dove però in questo caso gli viene passato un parametro. Dalle caratteristiche di questo parametro, la funzione stessa capisce quale parte del codice deve eseguire. Il tasto **“esecuzione”** fa eseguire la funzione prova\_c.m e scrive negli opportuni text box i risultati che quest'ultima funzione fornisce. Per fare questo bisogna fare in modo che i valori di alcune variabili siano passati da funzione a funzione. Questo implica che queste variabili siano dichiarate globali.

Il tasto **“scelta del grafico”** fa apparire il grafico selezionato nel menù a tendina. Questi grafici sono disponibili nel momento in cui sono disponibili i vettori che li rappresentano. Questi vettori sono anche loro delle variabili globali e sono disponibili nel momento in cui viene eseguito il codice prova\_c.m cioè dopo che è stato cliccato il tasto esecuzione.

Quindi per far apparire i grafici, prima di cliccare sul tasto **“scelta del grafico”** è necessario che almeno una volta sia stato cliccato il tasto esecuzione.

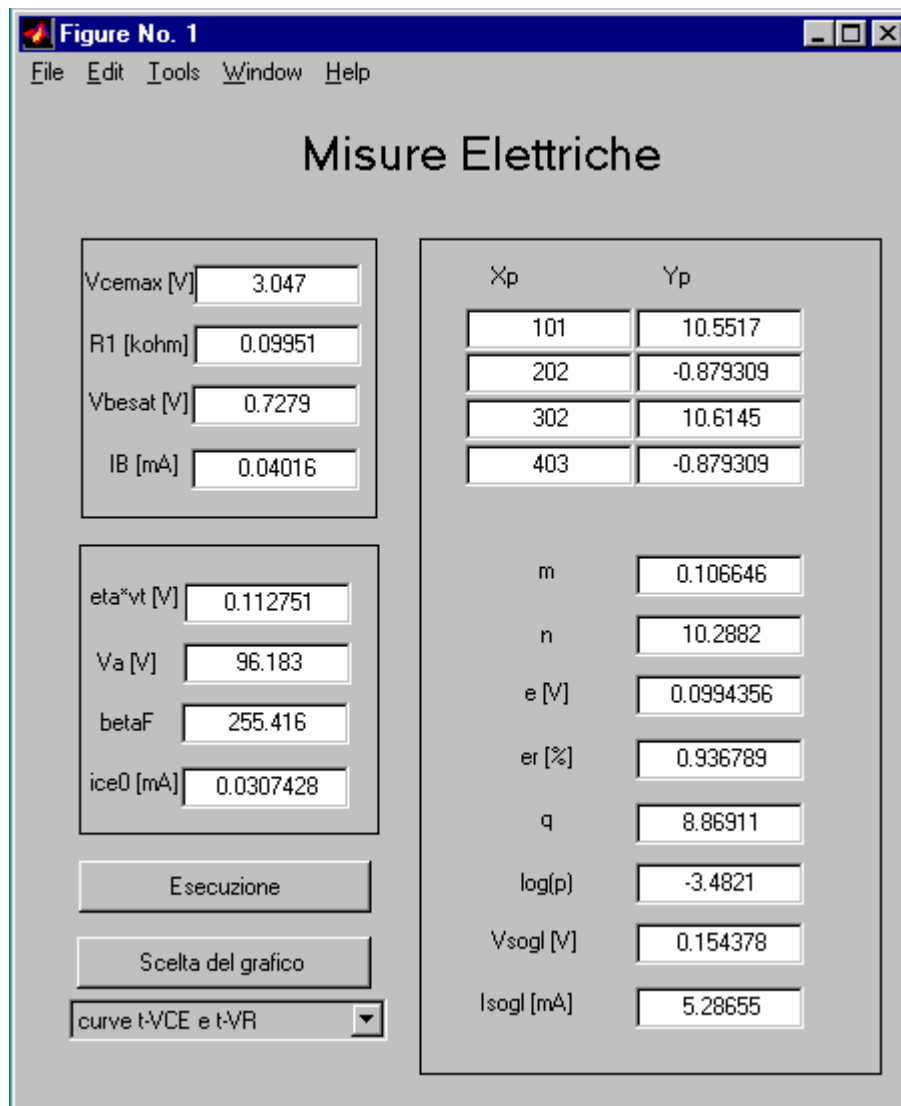
### **Descriviamo adesso la funzione minmaxIc**

Questa funzione determina con sufficiente precisione, la posizione e il valore dei minimi e dei massimi del vettore  $I_c$  fornito dall'oscilloscopio.

La componente  $I_C$  presenta una componente di rumore non indifferente pertanto, valutare con gli algoritmi di calcolo numerico il valore massimo e minimo non porterebbe a soluzioni volute.

Analizzando le caratteristiche dell'andamento di  $I_C$ , l'algoritmo fatto determina con buona precisione, per ogni periodo del segnale, un intervallo, il cui valor medio rappresenta il massimo o il minimo voluto. L'intervallo contenente il massimo presenta tutti valori superiori a 10mA, mentre l'intervallo contenente il minimo presenta tutti i valori inferiori a 0mA.

A questo punto mostriamo i risultati e i grafici del nostro programma:

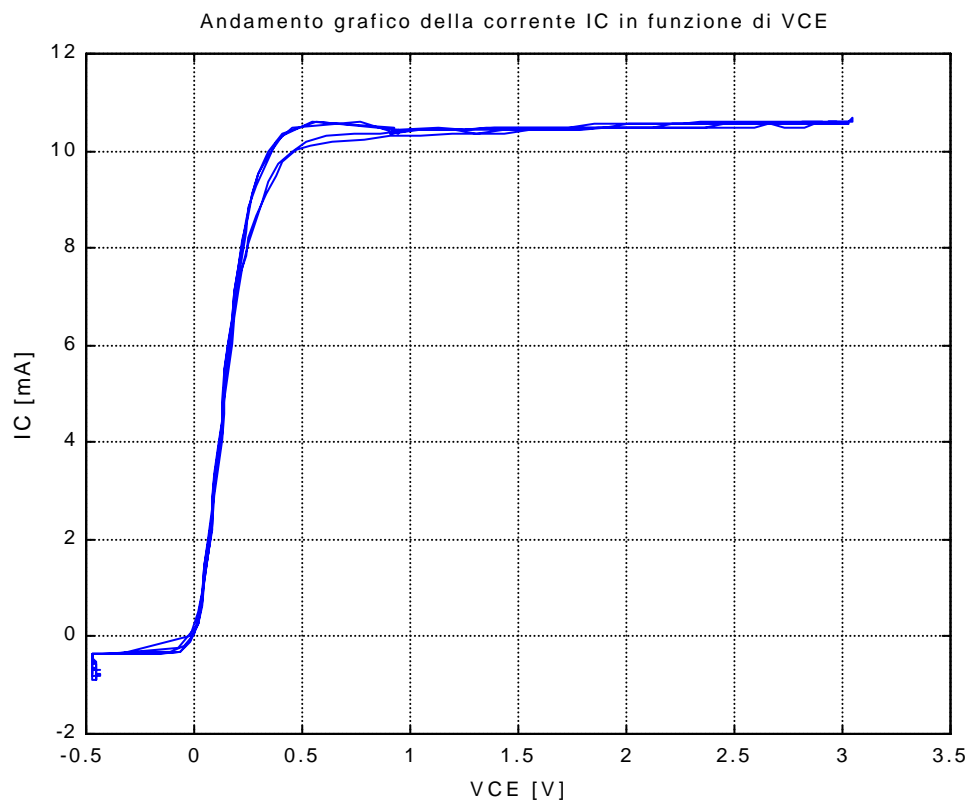
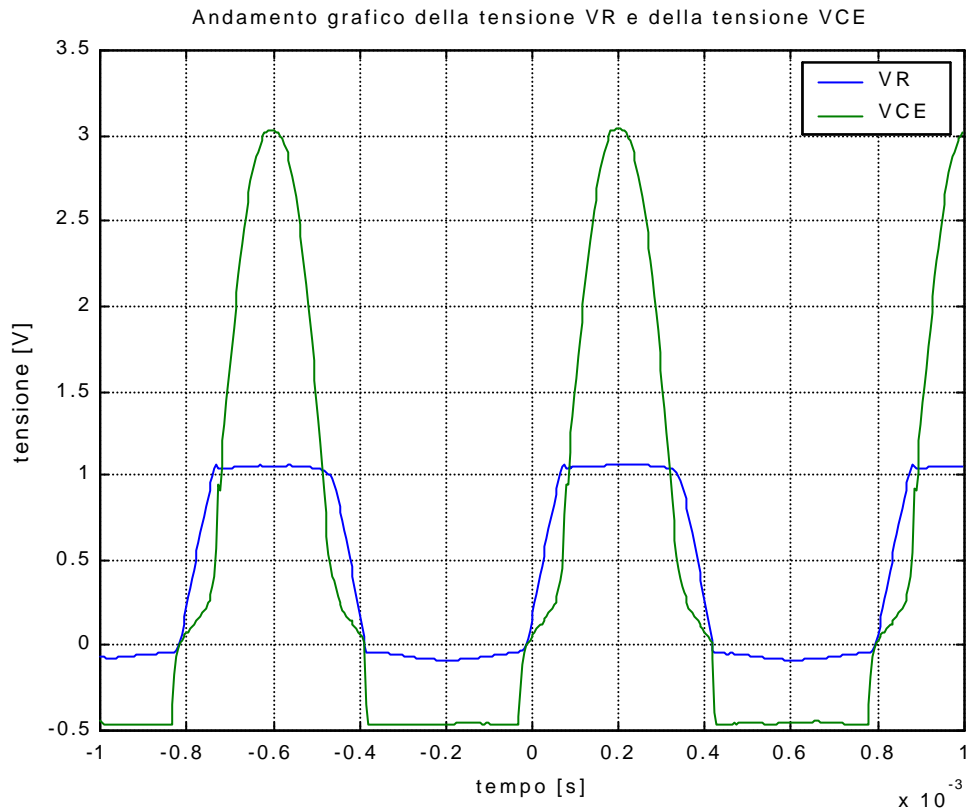


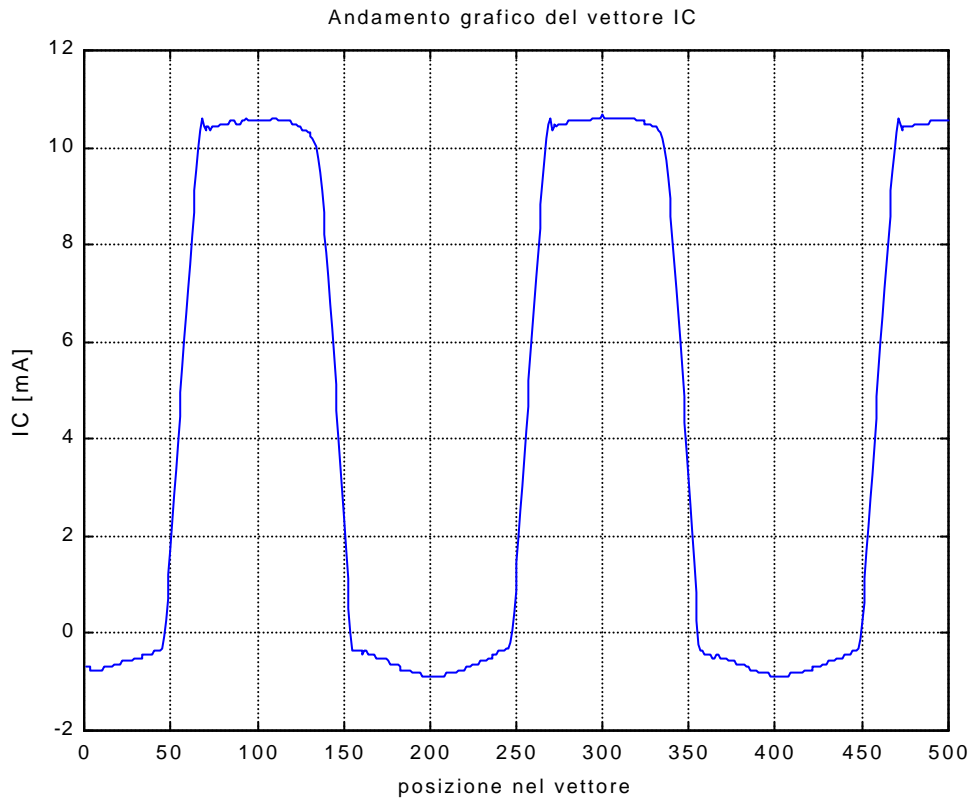
In questa interfaccia sono presenti tutti i risultati di interesse.

Questi sono predisposti in tre frame in modo da distinguerli in:

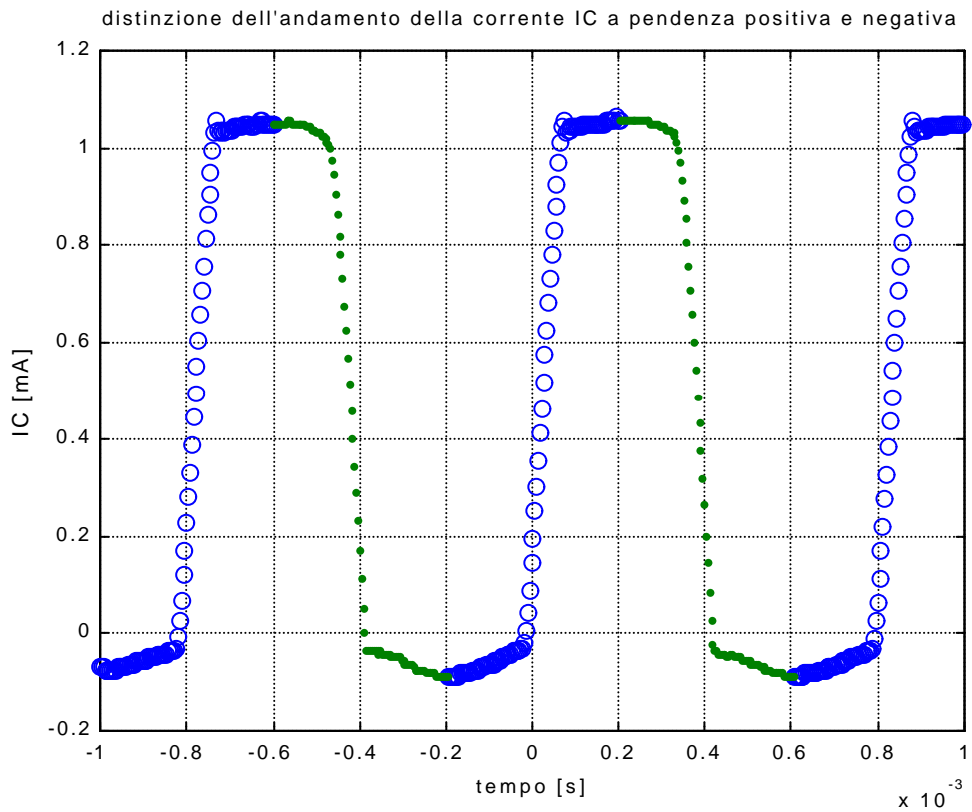
- dati di ingresso: forniti o ricavati facilmente dai valori misurati in laboratorio presenti nel file r96.txt (frame in alto e a sinistra).
- Risultati intermedi del modello (frame a destra). In questi risultati valutiamo il vettore Xp e Yp che rappresentano i punti in cui  $I_C$  assume alternatamente il valore di massimo e minimo
- Risultati finali del modello di Ebers-Moll (frame in basso a sinistra)

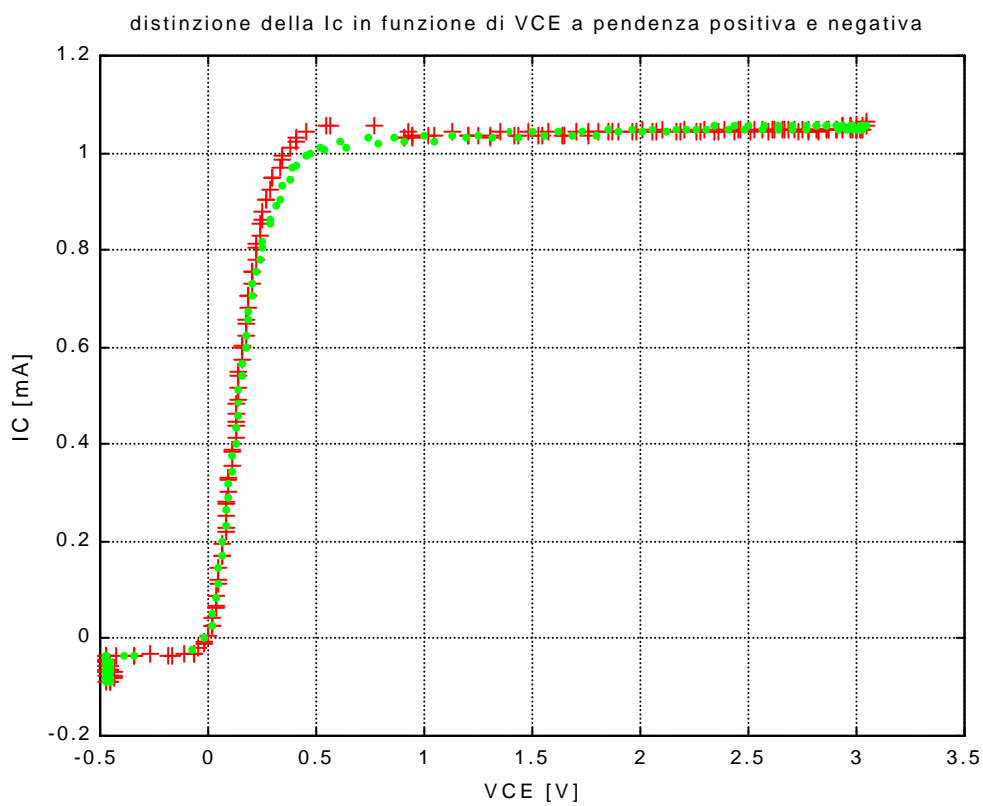
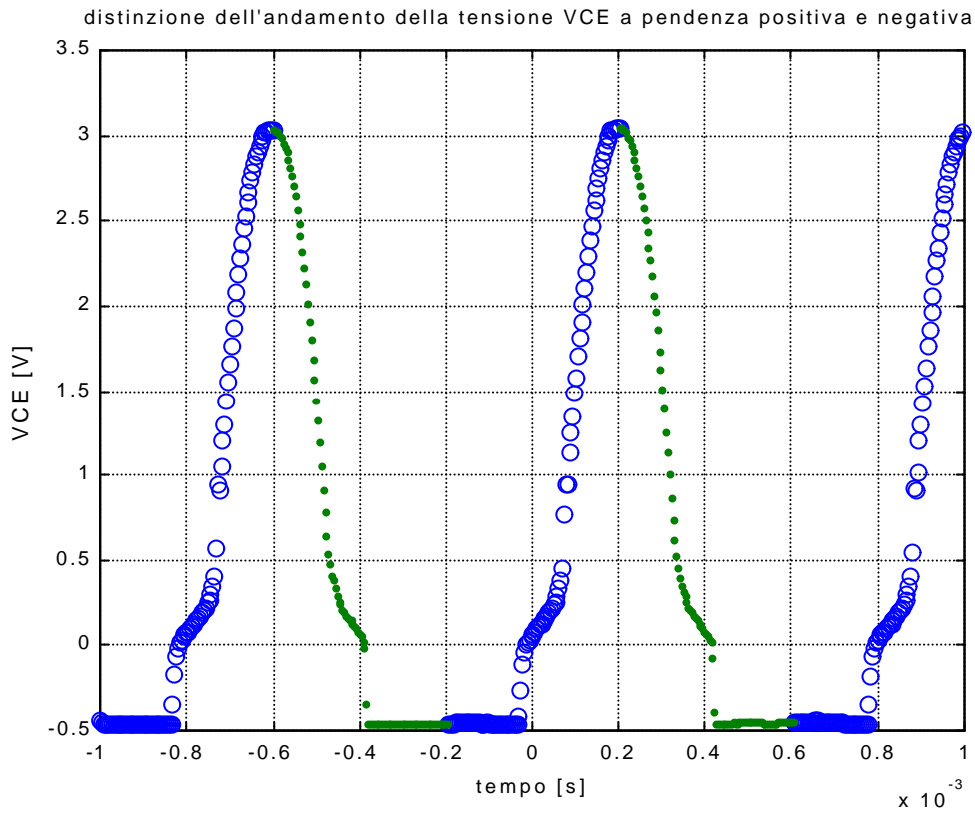
Visualizziamo adesso tutti i grafici determinati dal programma.



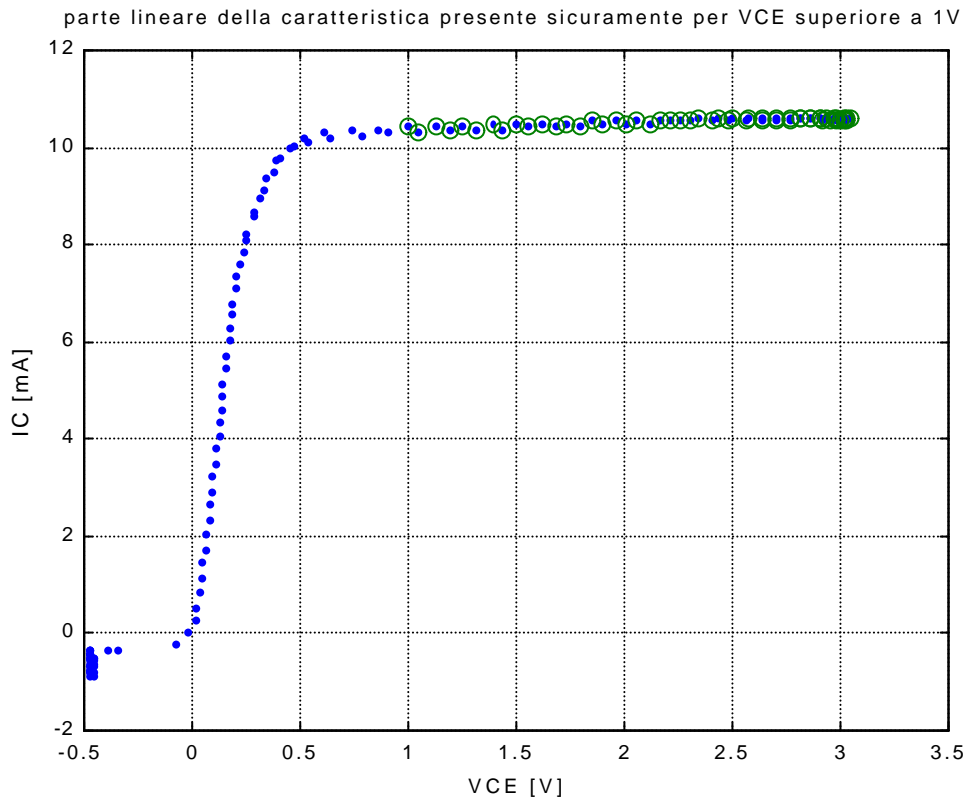


Si nota da questa figura come, una volta determinato l'intervallo in cui cadono i valori superiori a 10mA, il valor massimo case proprio al centro di tale intervallo.

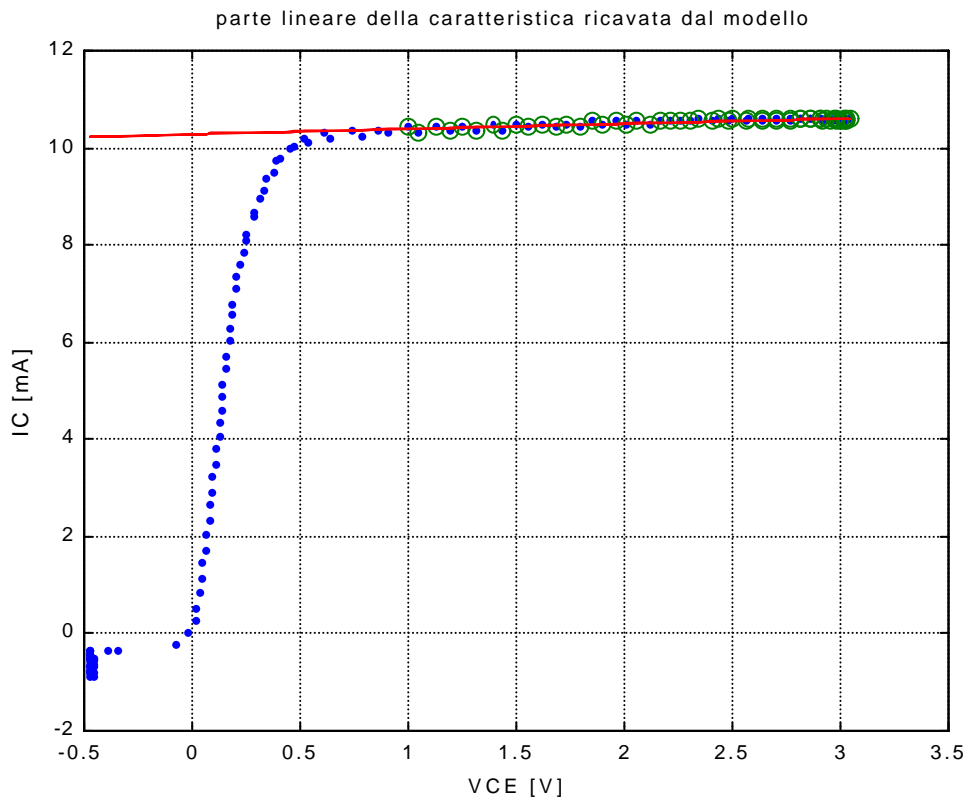


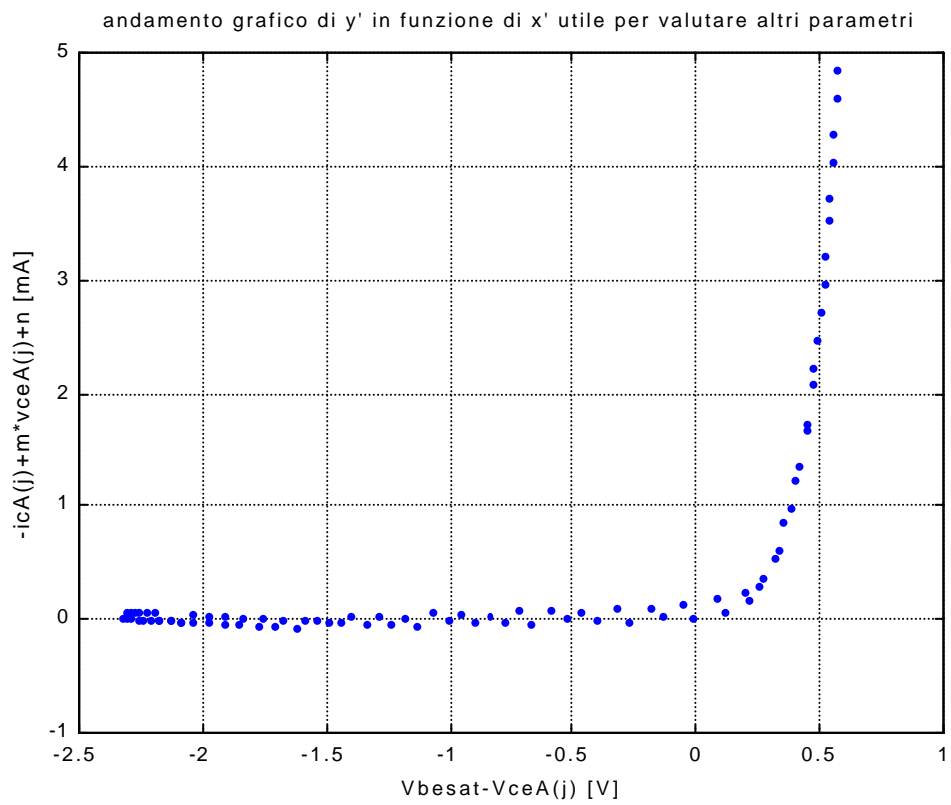
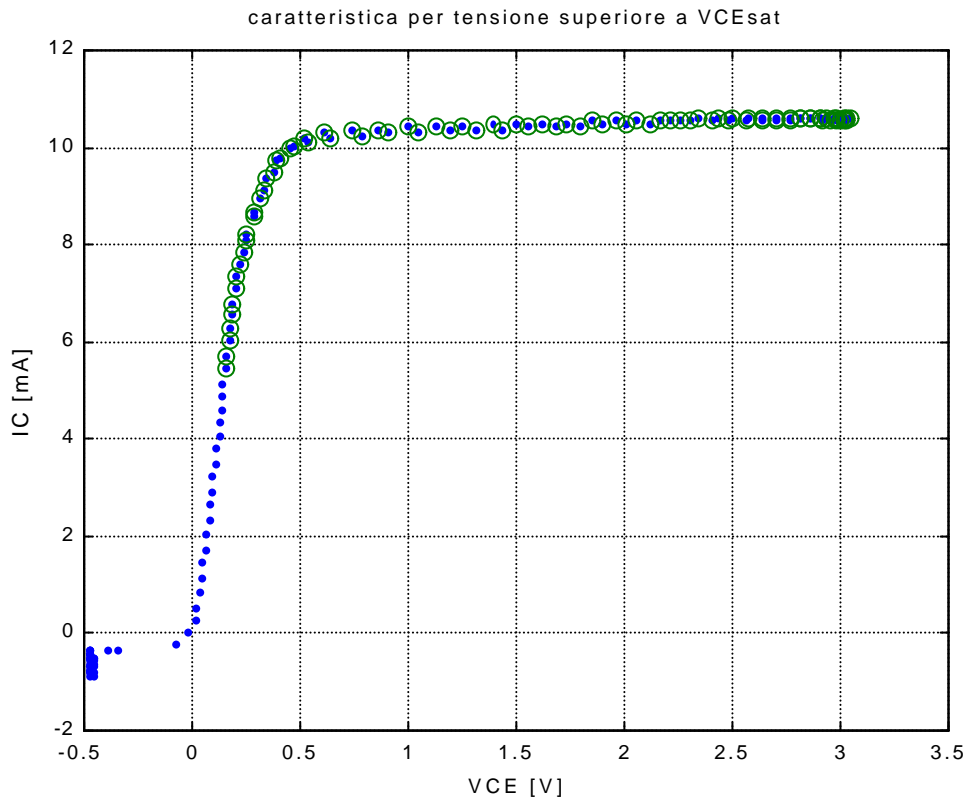


**Il tratto verde è quello in cui  $dV_{CE}/dt < 0$  cioè punti tracciati sull'oscilloscopio da destra verso sinistra. Come si può notare, questi punti sono meno soggetti a effetti dinamici**

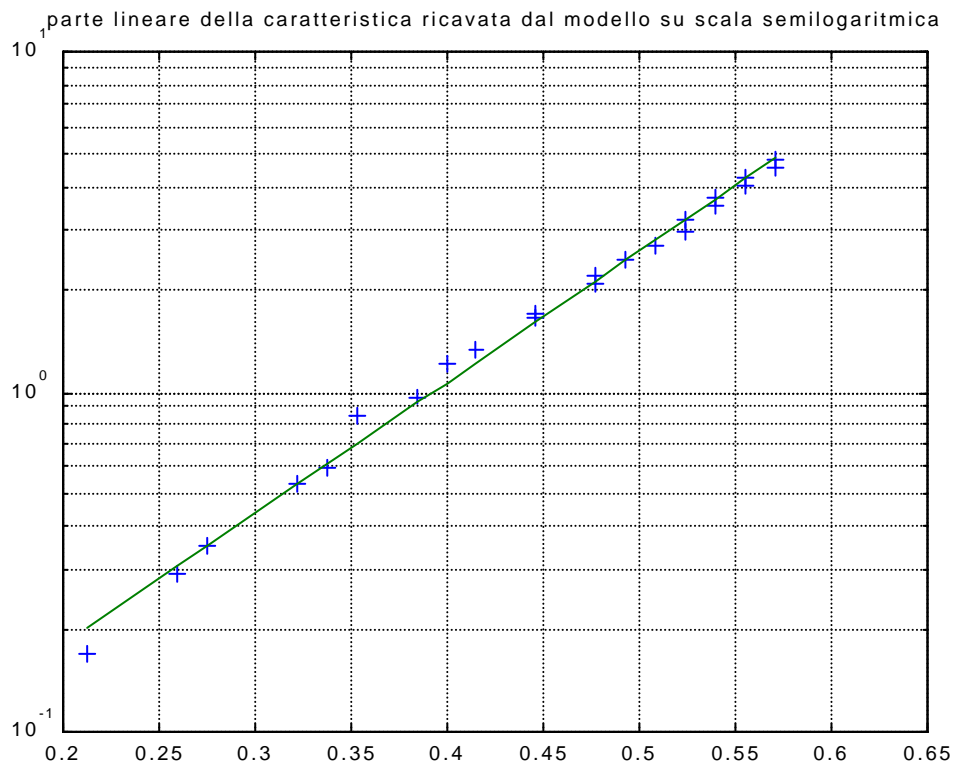
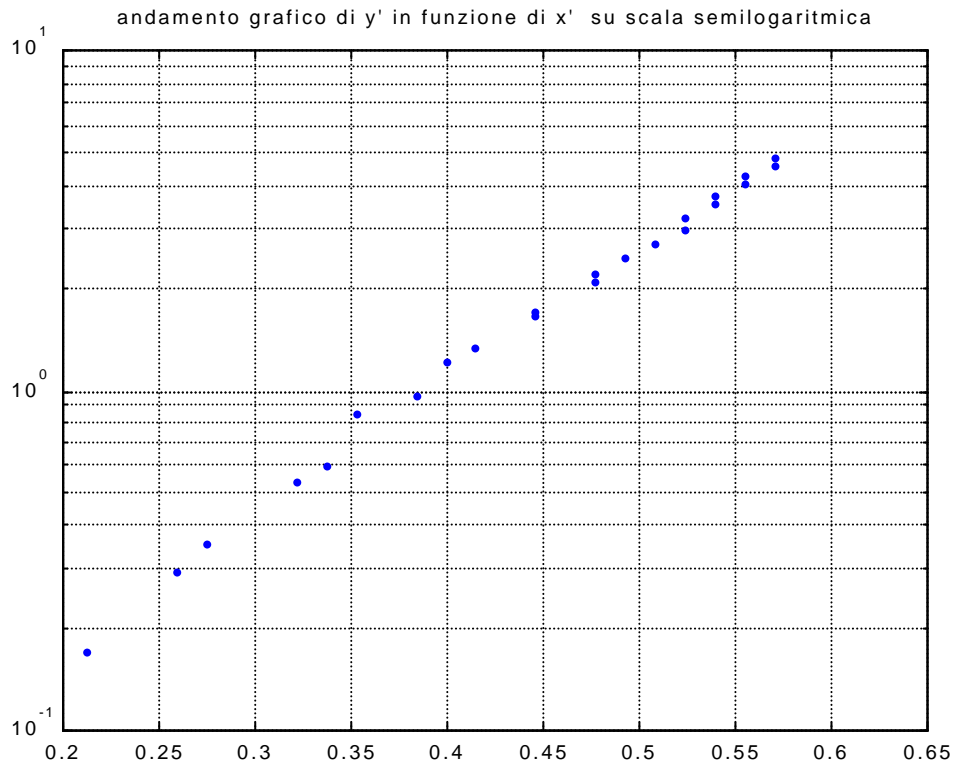


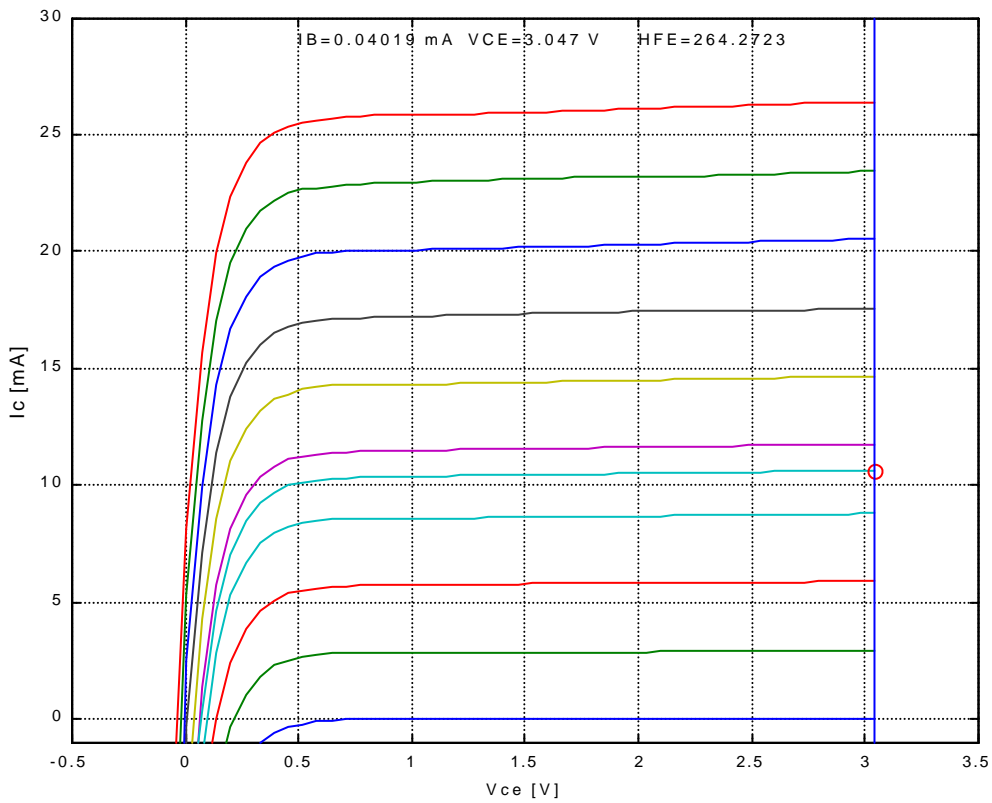
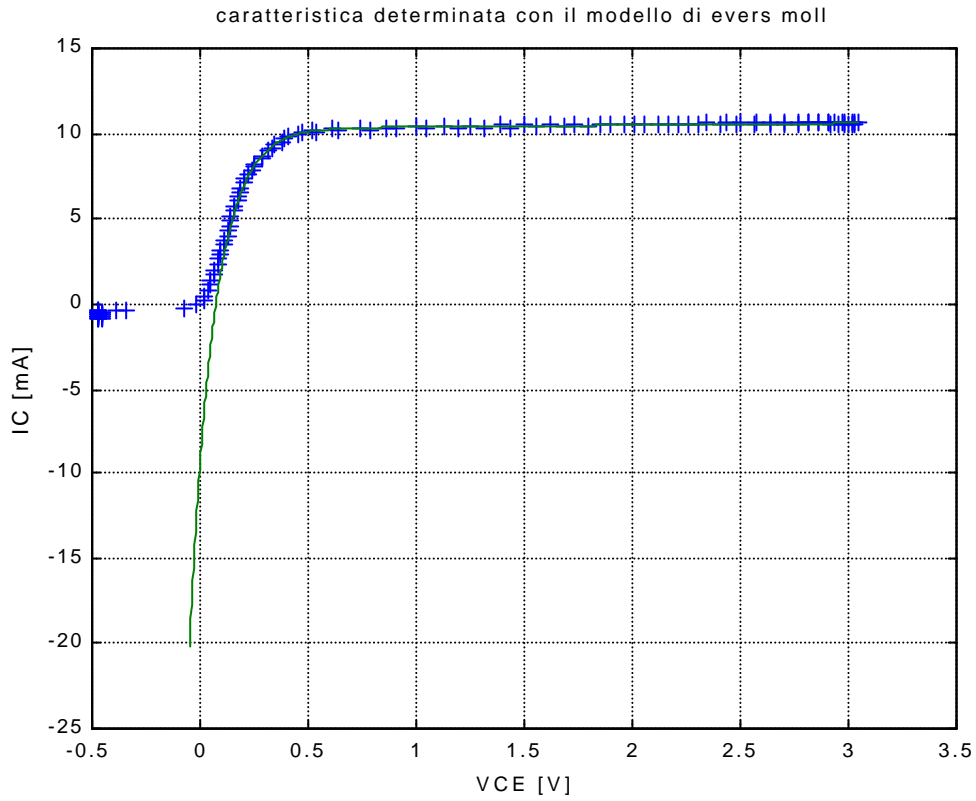
**La caratteristica si può considerare lineare per  $V_{CE} > 1V$**











**Il valore di  $h_{FE}$  per  $V_{CE}=V_{CEmax}$  coincide quasi con il valore determinato nella prima parte della relazione**

## Prova D

Questa prova consiste nel creare tramite il programma LABVIEW un analizzatore digitale di spettro. Dal progetto si può scegliere il tipo di forma d'onda di cui si vuole analizzare lo spettro. È possibile anche aggiungere una componente di rumore al segnale di ingresso e valutare come questa produca delle variazioni alle componenti dello spettro.

Prima di realizzare il progetto, bisogna realizzare i blocchi che saranno inseriti all'interno, se tali blocchi non sono presenti nelle librerie del LABVIEW.

In questo caso sono stati determinati i seguenti blocchi:

- GEN SEG: generatore di segnali
- GEN RUM: generatore di rumore
- WIN: determinazione di NPG, ENBW, e il vettore spettro del segnale
- PSD: stima dell'ampiezza e della frequenza partendo dallo spettro del segnale

Descriviamo brevemente i vari blocchi:

### GEN SEG:

Il generatore di segnali permette di determinare un vettore che descrive il segnale di ingresso. Questo segnale di ingresso può essere un'onda quadra, triangolare o sinusoidale. In quest'ultimo caso è interessante valutare lo spectral displacement fractional bin che poi lo ritroveremo come indicatore alla fine del nostro progetto.  $SDFB=f*N/f_c$  (in tal caso la frequenza data al blocco del segnale sinusoidale è  $f_s=f/f_c$ )

In ingresso a questo blocco devono essere forniti i seguenti dati:

- Frequenza di campionamento:  $f_c$
- Numero dei campioni: N
- Ampiezza: A
- Frequenza: f
- Fase:  $\phi$
- Duty cycle (utile per il segnale rettangolare)

### GENRUM:

Le caratteristiche del generatore di rumore sono simili a quelle del generatore di segnale. In tal caso si ottiene in uscita dal blocco un vettore che descrive il tipo di rumore che può essere uniforme o gaussiano bianco.

Gli ingressi in questo blocco sono:

- Numero di campioni
- Deviazione standard (utilizzato solo per il rumore bianco gaussiano)
- Ampiezza (utilizzato solo per il rumore uniforme)

All'interno del progetto finale, i vettori che si ottengono in uscita a questi 2 blocchi si sommano e il risultato oltre ad essere visualizzato su un grafico presente sul form, viene anche utilizzato come dato importante al blocco WIN.

**WIN:**

determina NPG, ENBW, e il vettore spettro del segnale.

Questo blocco permette di determinare lo spettro con la seguente formula:

$$\hat{S}_x(h\Delta f) = \frac{|\hat{X}(h\Delta f)|^2}{NPG}$$

dove  $\hat{X}(h\Delta f)$  rappresenta il segnale uscente dal blocco FFT presente all'interno di WIN

All'interno di questo blocco il vettore segnale più rumore fornito in ingresso viene opportunamente finestrato.

Le varie finestre utilizzate sono:

- Flat-top
- Blackman
- Blackman-Harris
- Hamming
- Rettangolare
- Hanning

Ad ogni finestra è associato un numero ENBW che oltre ad essere visualizzato tramite un indicatore sul form del progetto, va in ingresso al blocco PSD utile per ricavare le stime dell'ampiezza e della frequenza.

Il NPG è espresso nella seguente formula:  $NPG = \sum_{i=1}^N (finestra(1))^2$

dove *finestra(1)* rappresenta il segnale uscente dal blocco rappresentante delle varie finestre quando in ingresso è applicato un segnale le cui componenti sono sempre unitarie.

Il segnale uscente dal blocco win, dopo essere stato convertito in dB viene rappresentato sul un grafico presente sul form. In tal caso vengono elaborati per ogni N campioni prodotti, i primi N/2+1 (si crea quindi un vettore di N/2+1 elementi partendo da un vettore di N elementi). Questi campioni (vettore) vanno a finire anche nel blocco PSD.

**PSD:**

È un blocco che serve per stimare l'ampiezza e la frequenza partendo dal vettore formato da N/2+1 elementi che rappresenta lo spettro del segnale e dal valore di ENBW che come detto in precedenza è un valore che dipende dal tipo di finestra utilizzata.

Per utilizzare queste stime si sono utilizzate le seguenti formule:

$$stimA = \sqrt{\frac{4A \cdot ENBW}{N}}$$

$$stimF = index(A) \cdot \frac{f_c}{N}$$

dove:

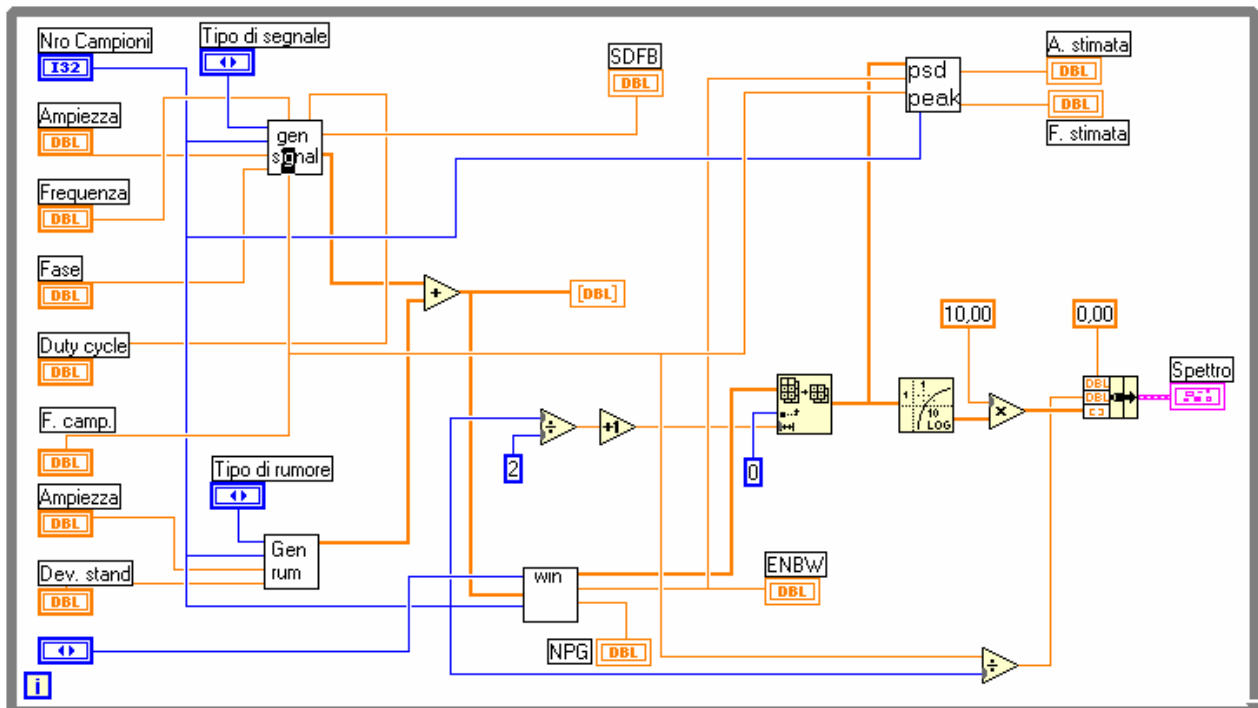
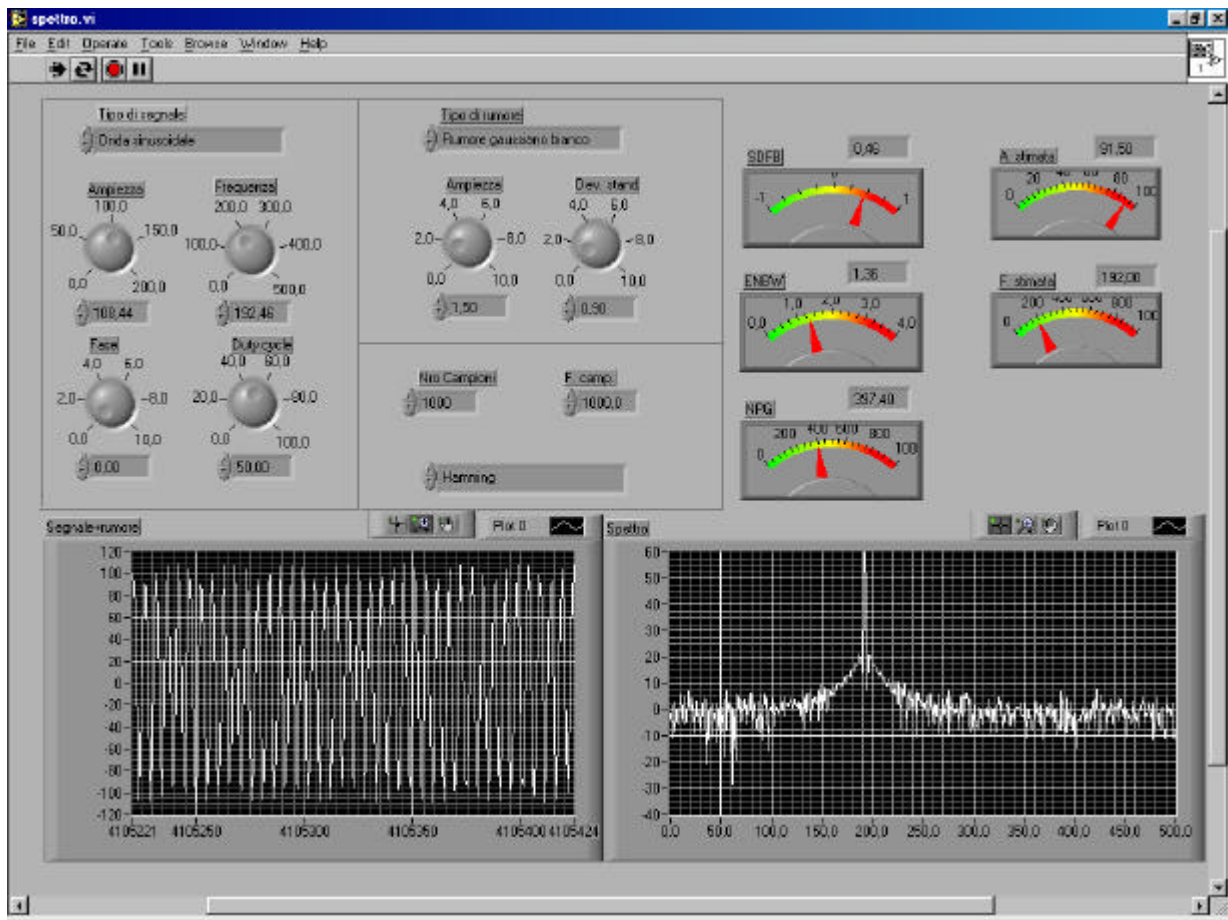
fc=frequenza di campionamento

A=valore massimo del vettore contenente gli B/2+1 campioni dello spettro

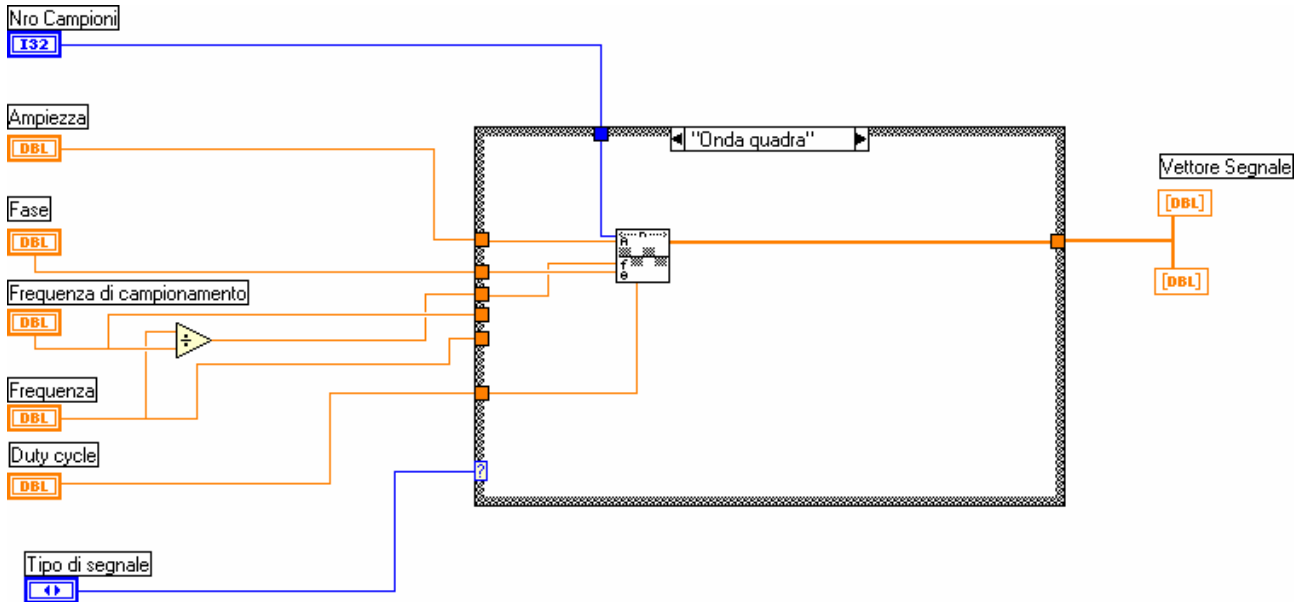
N=numero dei campioni

Index(A)=posizione del vettore in cui case il valor massimo

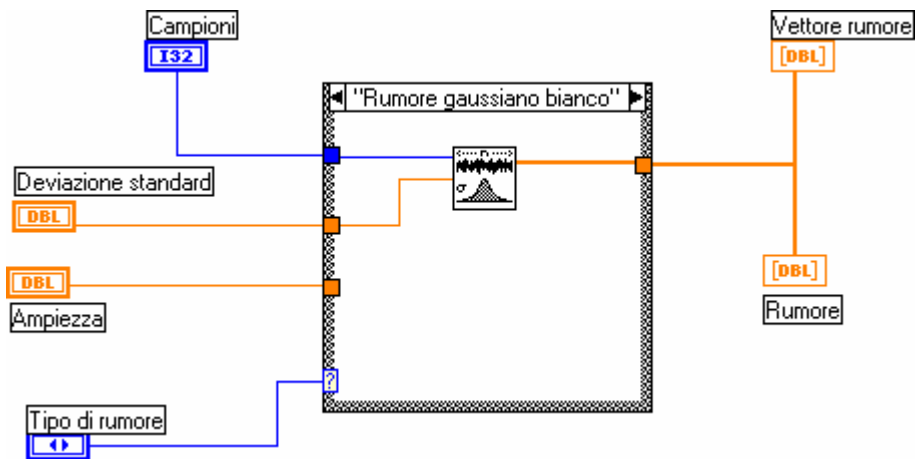
Visualizziamo adesso il form finale e i vari schemi che sono stati descritti.



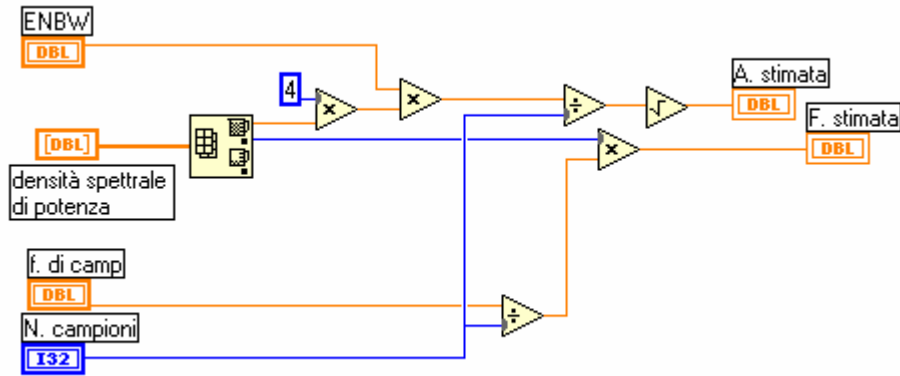
Schema dell'analizzatore digitale di spettro



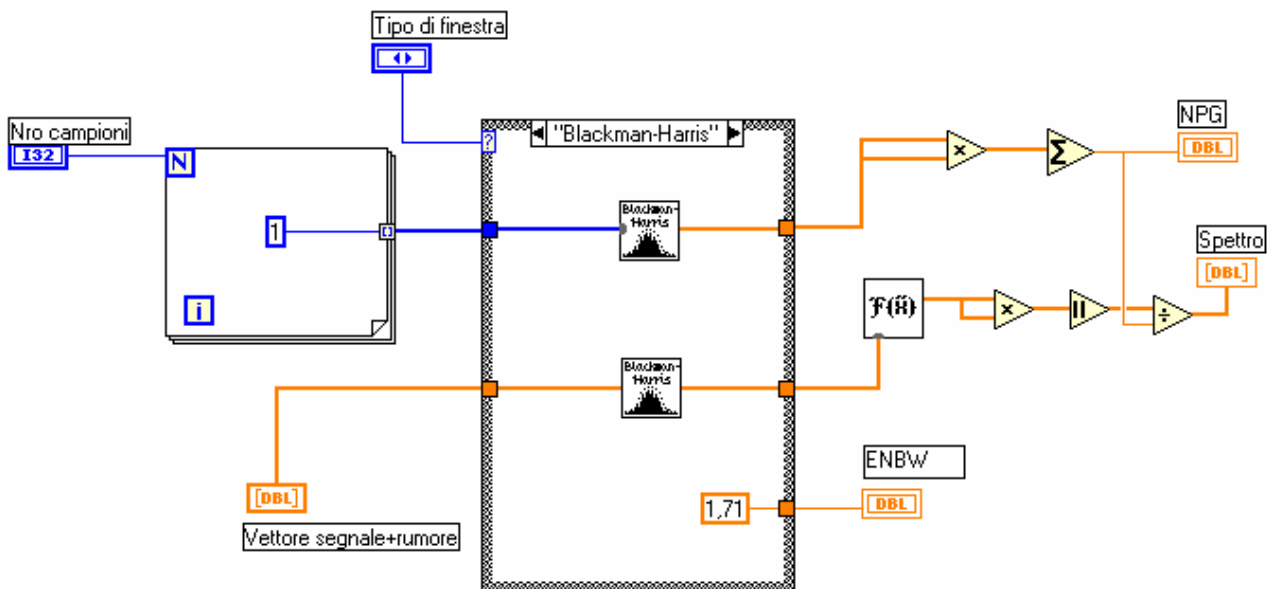
Schema del generatore di segnale: blocco GEN SEG



Schema del generatore di rumore: blocco GEN RUN



Schema del blocco PSD che stima l'ampiezza e la frequenza



Schema del blocco WIN

Nel dischetto allegato ci sono i file .VI che servono per far funzionare il progetto con il programma LABVIEW.

OSS: la versione del Labview utilizzato è la versione 6, pertanto credo che con versioni precedenti questo progetto non funzioni.