

# Esercitazione N.3: Misure DC su transistor e NOT TTL

Gruppo BF

Andrea Luzio, Gianfranco Cordella, Valerio Lomanto

20 Ottobre 2016

## 1 Scopo e strumentazione

Scopo dell'esercitazione è verificare i vari regimi di funzionamento di un transistor BJT. Si misurano i parametri rilevanti di tale componente come il guadagno in corrente. Si usa il transistor come amplificatore di corrente e come commutatore per realizzare un circuito not.

## 2 Materiali

Si è analizzato il funzionamento di un transistor 2N17711. Da datasheet si legge:

- massima tensione collettore-base:  $75V$
- massima tensione collettore-emettitore:  $50V$
- massima tensione base-emettitore:  $7V$
- massima corrente di collettore:  $500mA$
- massima potenza dissipata: circa  $1W$

Per come è pensato l'esperimento non è previsto andare oltre questi limiti.

## 3 Misure in DC sul transistor

### 3.1 b

Si è montato il circuito in figura (2). Per le caratteristiche del circuito ( $V_1 \simeq 10V$ ,  $R_1 \simeq 1k\Omega$ ) si ottiene la retta di carico in figura (1).

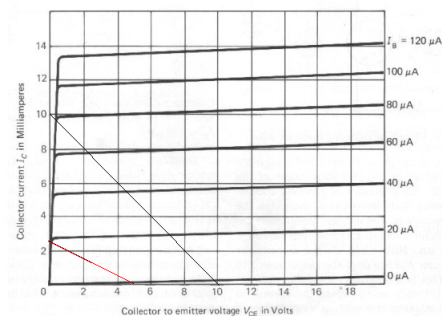


Figura 1: Retta di carico e curve tensione corrente.

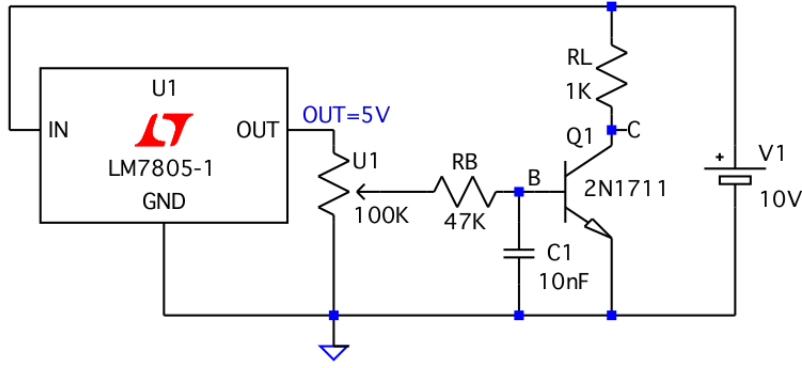


Figura 2: Circuito usato nella prima parte dell'esperienza .

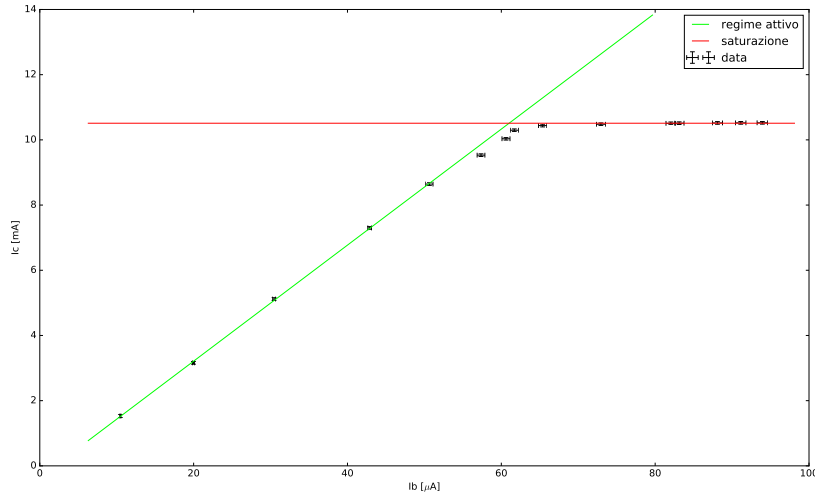


Figura 3: Fit di corrente di saturazione e di  $I_c$  vs  $I_b$  in zona attiva.

### 3.2 c

Si è misurata la corrente di collettore in funzione della corrente e della tensione di base (corrente di base misurata attraverso la caduta di potenziale su  $R_B$ , corrente di collettore attraverso la caduta su  $R_L$ ); i dati sono riassunti in tabella (1). In figura (3) si possono vedere i dati sperimentali della corrente di collettore in funzione della corrente di base. Le rette verde e rossa sono i rispettivi fit in regione attiva e regione di saturazione. Gli errori riportati dal grafico sono solo quelli di lettura. Per procedere con il fit solo questi sono stati considerati casualmente indipendenti, dunque utilizzati per la minimizzazione del  $\chi^2$ .

Il fit in regione è una retta affine ( $I_c = h_{fe}I_b + K_0$ , 2 parametri). Si è tagliato arbitrariamente i dati considerati in regione attiva a  $55 \mu A$ . Le caratteristiche fittate sono le seguenti:

$$h_{fe} = 178 \pm 3$$

$$K_0 = -0.35 \pm 0.05 mA$$

La correlazione lineare fra i due parametri è di 0.8, il  $\chi^2 = 3.25(3 \text{ dof})$ .

I risultati meritano un commento. In prima battuta si può pensare che  $K_0$  non sia compatibile con zero, ma alle misure fatte vanno ancora aggiunti gli errori sistematici. In particolare:

$$R_B = 46.2 \pm 0.5 k\Omega$$

$$R_L = 981 \pm 90 \Omega$$

errore calibrazione oscilloscopio: 3%

Propaghiamo dunque gli errori di calibrazione su questi parametri. Essendo  $h_{fe} = I_c/I_b$  basterà sommare in quadratura gli errori relativi su  $I_c$  e  $I_b$  (se ne prenderà un valore medio nel campione). Questo da un 6% di errore di calibrazione sul  $h_{fe}$ , che sommato (sempre in quadratura) con il risultato

$I_b[\text{mA}]$	$V_{be}[\text{mV}]$	$I_c[\mu\text{A}]$
$10.48 \pm 0.07$	$604 \pm 4$	$1.53 \pm 0.04$
$19.98 \pm 0.12$	$620 \pm 4$	$3.16 \pm 0.04$
$30.45 \pm 0.17$	$636 \pm 4$	$5.12 \pm 0.04$
$42.88 \pm 0.23$	$644 \pm 4$	$7.30 \pm 0.04$
$50.6 \pm 0.4$	$652 \pm 4$	$8.64 \pm 0.04$
$57.4 \pm 0.5$	$664 \pm 4$	$9.53 \pm 0.04$
$60.6 \pm 0.5$	$668 \pm 4$	$10.03 \pm 0.04$
$61.7 \pm 0.5$	$660 \pm 4$	$10.30 \pm 0.04$
$65.4 \pm 0.5$	$668 \pm 4$	$10.44 \pm 0.04$
$72.9 \pm 0.5$	$672 \pm 4$	$10.48 \pm 0.04$
$82.0 \pm 0.6$	$672 \pm 4$	$10.51 \pm 0.04$
$83.1 \pm 0.6$	$668 \pm 4$	$10.51 \pm 0.04$
$88.1 \pm 0.6$	$672 \pm 4$	$10.52 \pm 0.04$
$91.1 \pm 0.6$	$672 \pm 4$	$10.52 \pm 0.04$
$93.9 \pm 0.6$	$672 \pm 4$	$10.52 \pm 0.04$

Tabella 1: Dati raccolti variando la posizione del potenziometro.

del fit:

$$h_{fe} = 178 \pm 10$$

Per  $K_0$  bisogna procedere similmente. Le correnti  $I_c$  hanno un errore di calibrazione del 5%, dunque in media ( $6\text{mA}$ ) nel campione un errore di  $0.3\text{mA}$ .  $K_0 = -0.35 \pm 0.3\text{mA}$ . Si può procedere similmente per la zona di saturazione. Questa volta si è preferito fittare la retta costante (1 parametro), scegliendo come corrente di base di taglio  $70\mu\text{A}$ . I risultati del fit sono:

$$I_{c(sat)} = 10.51 \pm 0.02\text{mA}$$

con un  $\chi^2 = 0.8(5\text{ dof})$ . L'errore va naturalmente trattato come prima. In pratica si aggiunge un errore del 5%. Dunque:

$$I_{c(sat)} = 10.5 \pm 0.5\text{mA}$$

Chiaramente il  $\chi^2$  così basso non permette di dare significato statistico al primo errore dato.

Dal valore ottenuto per  $I_{c(sat)}$ , unitamente ai valori misurati per  $V_{cc}$  e  $R_L$  (rispettivamente  $10.46 \pm 0.04\text{V}$  e  $981 \pm 9\Omega$ ), si ricava il valore di  $V_{ce}$  in sona di saturazione:

$$V_{ce(sat)} = V_{cc} - R_L I_{c(sat)} = 0.15 \pm 0.10\text{V}$$

La corrente  $I_c$  massima erogabile dal transistor è data dall'intersezione tra la retta di carico e le curve caratteristiche del transistor in zona di saturazione; approssimando queste ultime a rette verticali (approssimazione non valida se si intende lavorare su rette di carico molto distanti, e in particolare molto più basse, di quella determinata dal circuito usato)  $V = V_{ce(sat)}$  si ha, in funzione delle altre caratteristiche del circuito,  $I_{max} = \frac{V_{cc} - V_{ce(sat)}}{R_L}$ .

### 3.3 e

Al variare della tensione di alimentazione  $V_{cc}$  la retta di carico viene traslata verticalmente: ci aspettiamo dunque che mantenendo  $I_b$  costante il punto di lavoro si sposti al variare di  $V_{cc}$  lungo la curva caratteristica corrispondente (che in zona attiva ci attendiamo sia approssimabile a una retta dal basso coefficiente angolare).

Portandoci a  $I_b = 33.8 \pm 0.4\mu\text{A}$  (in pieno regime attivo secondo quanto visto precedentemente), si sono presi al variare di  $V_{cc}$  i dati in tabella (2), riassunti dal grafico in figura (4); è stata poi fittata una retta (2 parametri) la cui intersezione con l'asse delle ascisse dà il valore di  $V_{Early}$  (l'errore è stato trattato come nei fit precedenti): si sono ottenuti valori di  $82 \pm 19\mu\text{A/V}$  per il coefficiente angolare e  $5.41 \pm 0.05\text{mA}$  per l'intercetta (coefficiente di correlazione  $-0.75$ ,  $\chi^2 = 14$  (8 dof)), che danno per  $V_{Early}$  un valore di  $-66 \pm 16\text{V}$ . Il  $\chi^2$  relativamente alto e l'andamento particolare dei dati nel grafico sono probabilmente dovuti a effetti di dipendenza della corrente di base (e dunque quella di collettore) dalla temperatura: durante la presa dati abbiamo infatti notato che mantenendo  $V_{cc}$  (e dunque di

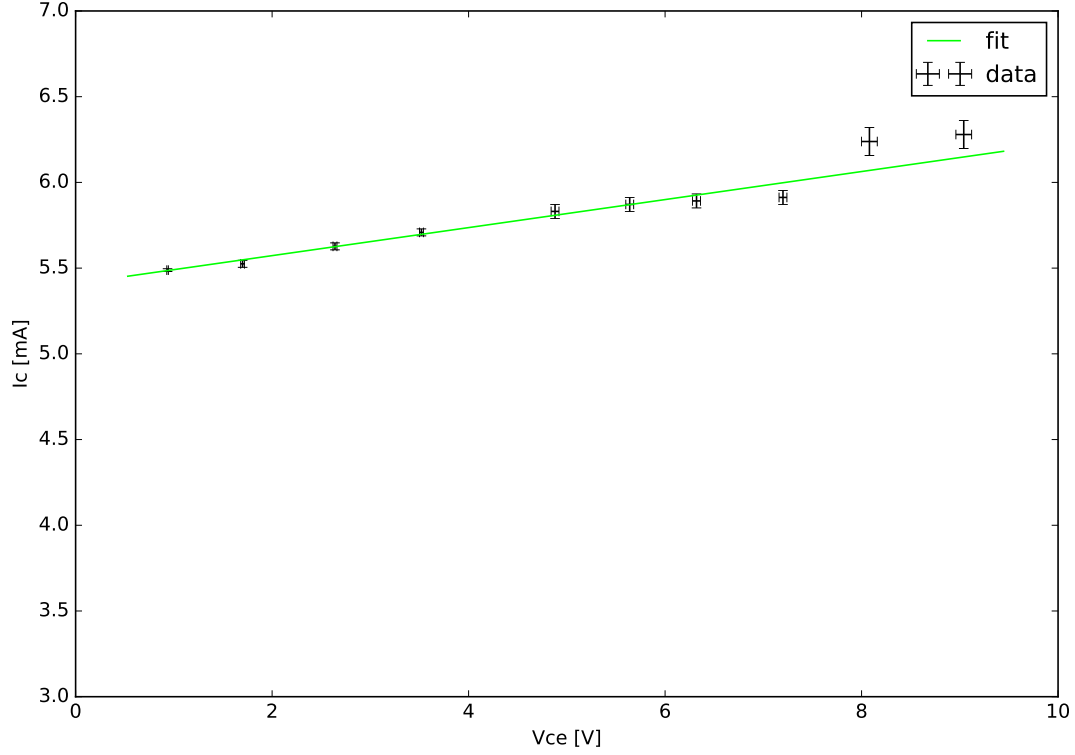


Figura 4: Fit della retta che approssima la curva caratteristica in zona attiva.

$V_{ce}$ ) a valori abbastanza alti (ma pur sempre entro i 15 V) la caduta di tensione su  $R_B$ , e con essa la corrente  $I_b$  variava in modo non trascurabile (0.5-1%), il che abbiamo ritenuto essere attribuibile alla variazione delle caratteristiche del circuito in seguito al leggero riscaldamento dei componenti attivi. Abbiamo cercato di minimizzare questo effetto (che ci avrebbe essenzialmente portato a prendere dati su curve caratteristiche relative a  $I_b$  diverse) alternando misure a  $V_{cc}$  più bassi e più alti, riuscendo a mantenere le variazioni di  $V_{R_B}$  sempre entro 1 digit della misura effettuata con il multimetro ( $\lesssim 0.1\%$ ), ma questo potrebbe non essere stato sufficiente.

### 3.4 $I_c$ vs $V_b$

Da questi dati si è provato a procedere con un fit in zona attiva (curva rossa), ma la scarsità di punti non ha permesso di ottenere risultati soddisfacenti (tensione termica  $v_t \simeq 5$  mV). La tensione di soglia sembra essere comunque dell'ordine dei 0.6 V

$V_{ce}$ [V]	$I_c$ [mA]
$0.936 \pm 0.008$	$5.488 \pm 0.008$
$1.700 \pm 0.020$	$5.525 \pm 0.020$
$2.640 \pm 0.020$	$5.627 \pm 0.020$
$3.520 \pm 0.020$	$5.708 \pm 0.020$
$4.88 \pm 0.04$	$5.83 \pm 0.04$
$5.64 \pm 0.04$	$5.87 \pm 0.04$
$6.32 \pm 0.04$	$5.89 \pm 0.04$
$7.20 \pm 0.04$	$5.91 \pm 0.04$
$8.08 \pm 0.08$	$6.24 \pm 0.08$
$9.04 \pm 0.08$	$6.28 \pm 0.08$

Tabella 2: Dati raccolti variando  $V_{cc}$  in zona attiva.

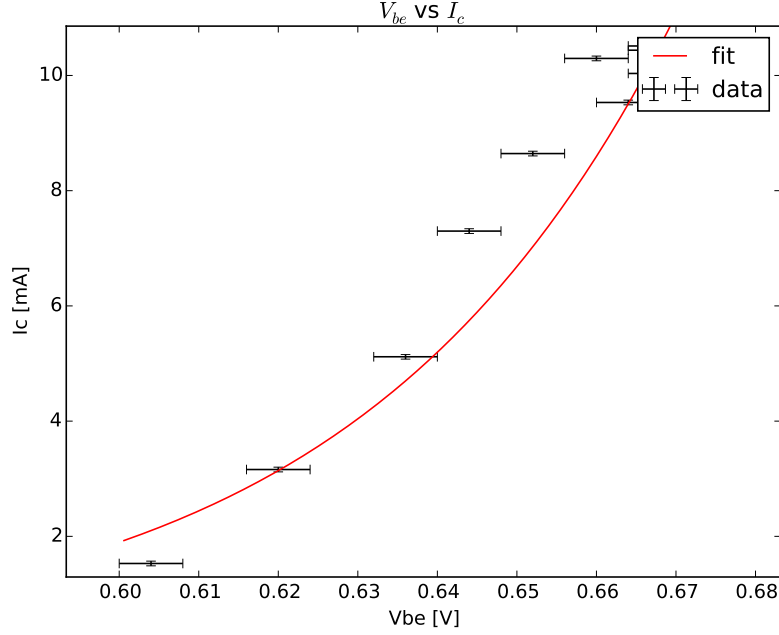


Figura 5: La curva rossa non approssima bene i dati sperimentali.

## 4 Circuito logico not

### 4.1 Controllo funzionamento circuito

Si è montato il circuito in figura (6) con i valori delle resistenze indicate. Si verifica il funzionamento del circuito not e quindi dei regimi di interdizione e saturazione del transistor. Si sono misurati la tensione ai capi della base  $V_b$  e del collettore  $V_c$  utilizzando i due canali dell'oscilloscopio. Da questi si deduce  $I_b = \frac{V_{in}-V_b}{R_1} - \frac{V_b}{R_2}$  e  $I_c = \frac{V_{in}-V_c}{R_L}$ . Al variare dell'ingresso alto (5V) o basso (0V) del generatore d'onda si ha:

Per l'ingresso alto  $V_c = 24mV$ ,  $I_b = 283\mu A$  e  $I_c = 2.2mA$ .

Per l'ingresso basso si ha  $V_c = 4.96V$ ,  $I_b = 0.1\mu A$  e  $I_c = 17.7\mu A$ .

Nel caso di ingresso alto si verifica che il transistor è in regime di saturazione in quanto per i valori delle correnti  $I_b$  e  $I_c$  e di tensione ai capi del collettore prima scritti, il punto di lavoro è a ridosso della parte sinistra della retta di carico in rosso in figura 1. Detto meglio la corrente  $I_b$  usata supera quella di soglia di  $22\mu A$ <sup>1</sup> oltre la quale il transistor è in saturazione. Allo stesso modo per l'ingresso basso si verifica che il transistor è in interdizione poiché il punto di lavoro si trova a ridosso dell'intersezione della retta di carico in rosso con l'asse delle ascisse. La corrente di soglia  $I_{b,int} = 3.9\mu A$ <sup>2</sup> è maggiore di quella usata  $I_b = 0.1\mu A$  per cui il transistor è interdizione.

### 4.2 Tempi di risposta del circuito

Si misurano i tempi di risposta del circuito sia per lo stato basso che alto del generatore usando i cursori dell'oscilloscopio. Si ha che  $T_{rd} = 210.0 \pm 0.6ns$  e  $T_d = 250.0 \pm 0.6ns$ . Mentre si ha  $T_{rs} = 4.760 \pm 0.004\mu s$  e  $T_s = 1.680 \pm 0.004\mu s$ . Gli errori sono stati valutati come riportato sul manuale dell'oscilloscopio. I grafici riportati dopo sono stati acquisiti utilizzando OpenChoice.

<sup>1</sup>Tale corrente di soglia si calcola nel seguente modo  $I_{b,sat} = \frac{I_{c,sat}}{h_{fe}}$ .  $I_{c,sat}$  corrisponde alla corrente di saturazione che scorre nel collettore quando il transistor è in tale regime ed è:  $I_{c,sat} = \frac{V_{in}-V_{ce,sat}}{R_L} = \frac{5-0.2}{2.2*10^3} = 22\mu A$ .

<sup>2</sup>Tale corrente corrisponde a quella di interdizione che scorre nel transistor quando entrambe le giunzioni sono polarizzate inversamente. Quindi imponendo che  $V_{be}$  sia al massimo  $0.7V$  si trova  $V_{in} = V_{be}(1 + \frac{R_1}{R_2}) = 0.8V$  da cui si deduce  $I_{b,int} = \frac{V_{in}-V_{be}}{R_1} - \frac{V_{be}}{R_2}$

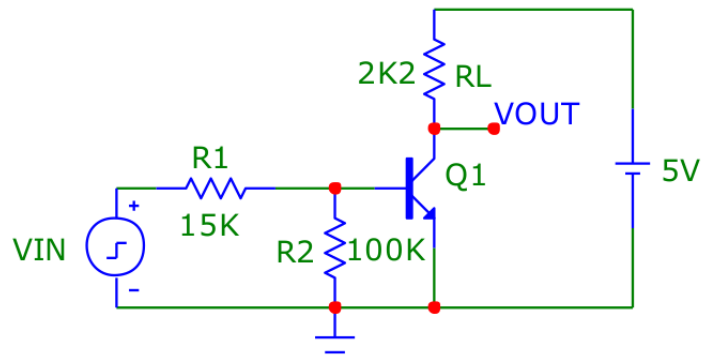


Figura 6: Circuito not usato nell'esperienza.

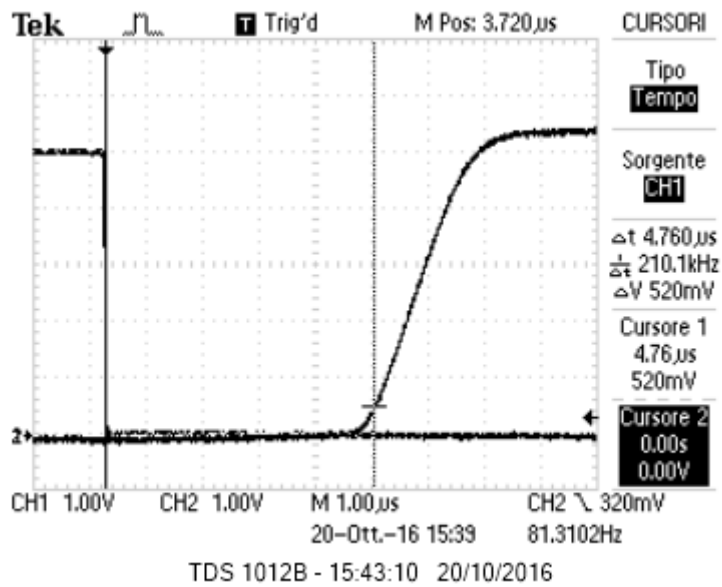


Figura 7: Tempo ritardo di salita per l'ingresso basso. È il valore  $\Delta t$  misurato tra i due cursori.

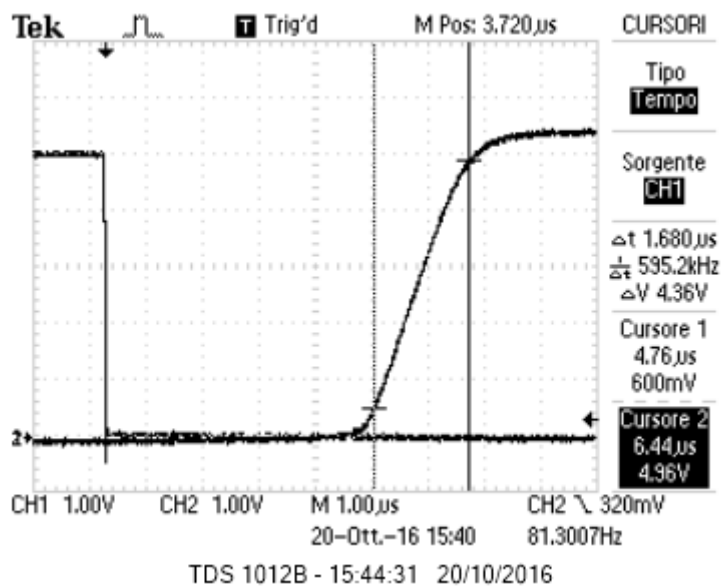


Figura 8: Tempo di salita per l'ingresso basso. È il valore  $\Delta t$  misurato tra i due cursori.

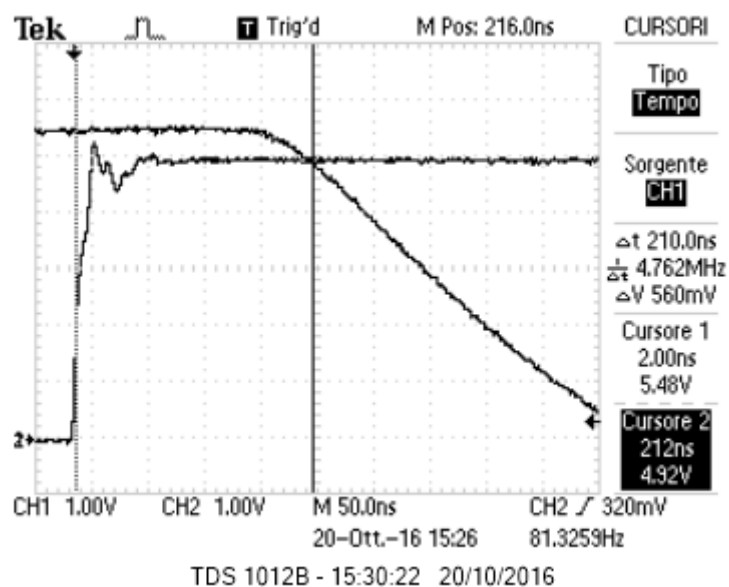


Figura 9: Tempo ritardo in discesa per l'ingresso alto. È il valore  $\Delta t$  misurato tra i due cursori.

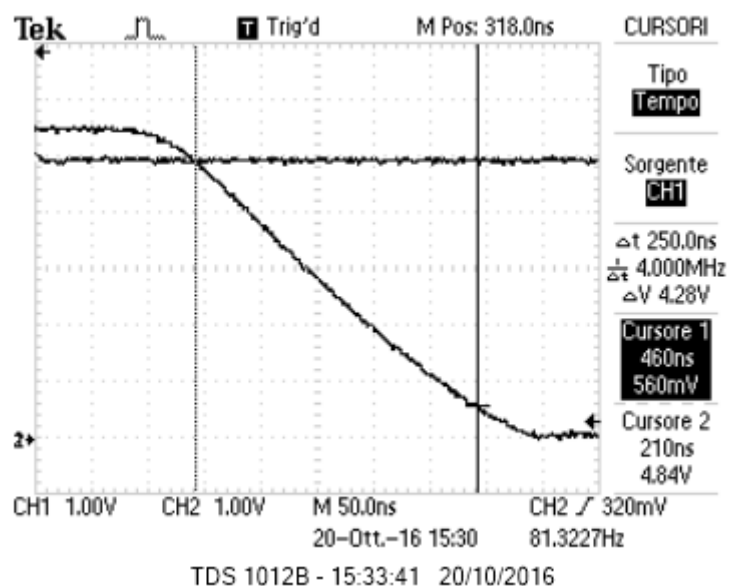


Figura 10: Tempo discesa per l'ingresso basso. È il valore  $\Delta t$  misurato tra i due cursori.

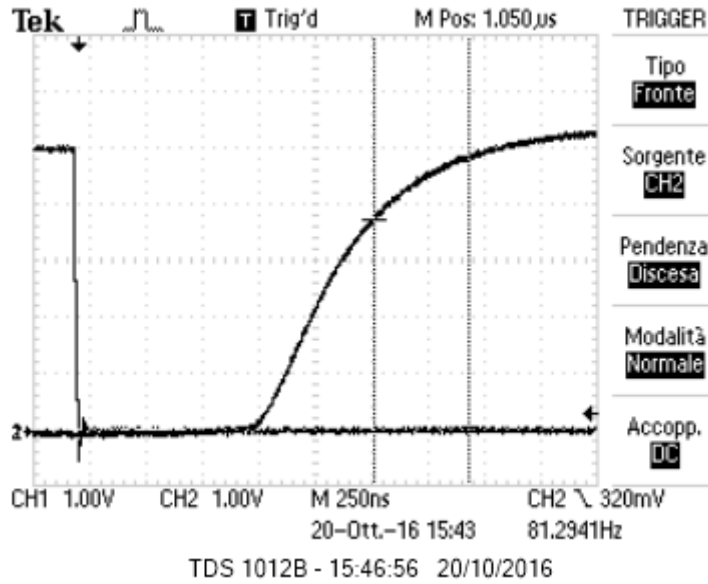


Figura 11: Acquisito con  $R_2 = 3.28k\Omega$ . Si osserva  $T_{rs} = 750ns$  e  $T_s = 1.2\mu s$

### 4.3 Discussione sui tempi

Si nota che  $T_{rs} \gg T_{rd}$ . Quando il transistor è in saturazione, la capacità della giunzione base-emettitore risulta essere molto maggiore della stessa quando si è in interdizione. Quindi non appena l'ingresso passa da alto a basso si deve scaricare un condensatore con costante di tempo ( $RC$ ) molto maggiore che nel caso l'ingresso passi da basso ad alto. Essendo  $R_2 \gg R_1$  si può considerare  $R_1$  in serie alla capacità della giunzione base emettitore. Considerando come costante di tempo  $T_{rs} = R_1 C_s$  si trova che  $C_s = 0.3nF$  e allo stesso modo da  $T_{rd} = R_1 C_d$  si trova che  $C_d = 0.02nF$ . Si nota anche che  $T_{rs} > T_s$  questo perchè quando l'uscita inizia a spostarsi verso lo stato alto, la capacità della giunzione base-emettitore risulta minore di un fattore 10 rispetto alla stessa quando la giunzione è in conduzione. Si osserva dai grafici in figura (11) (12) (13) che  $T_{rs}$  diminuisce al diminuire della resistenza  $R_2$  mentre  $T_{rd}$  aumenta.



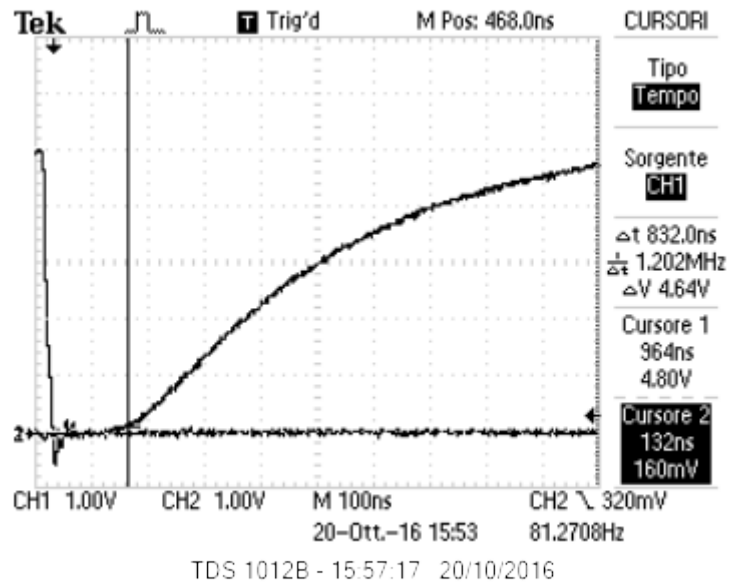


Figura 12: Acquisito con  $R_2 = 2.37k\Omega$ . Si osserva  $T_{rs} = 100ns$  e  $T_s = 700ns$

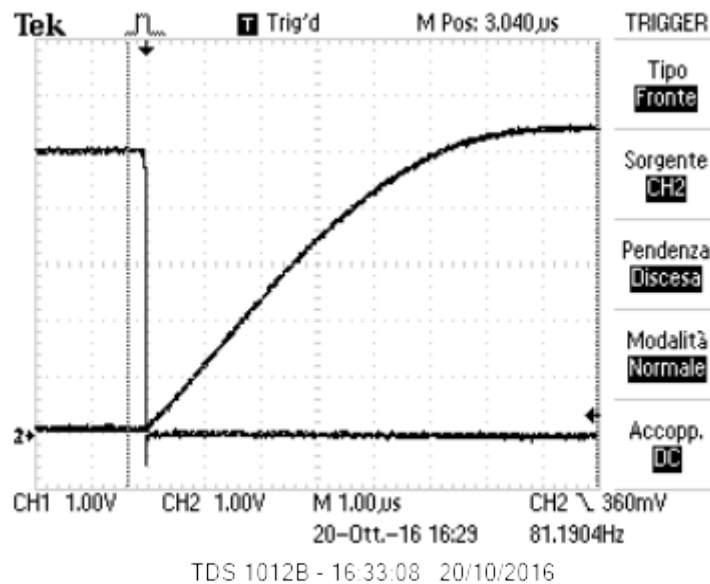


Figura 13: Acquisito con  $R_2 = 1.48k\Omega$ . Si osserva  $T_{rs} \approx 0ns$  e  $T_s = 4\mu s$ .

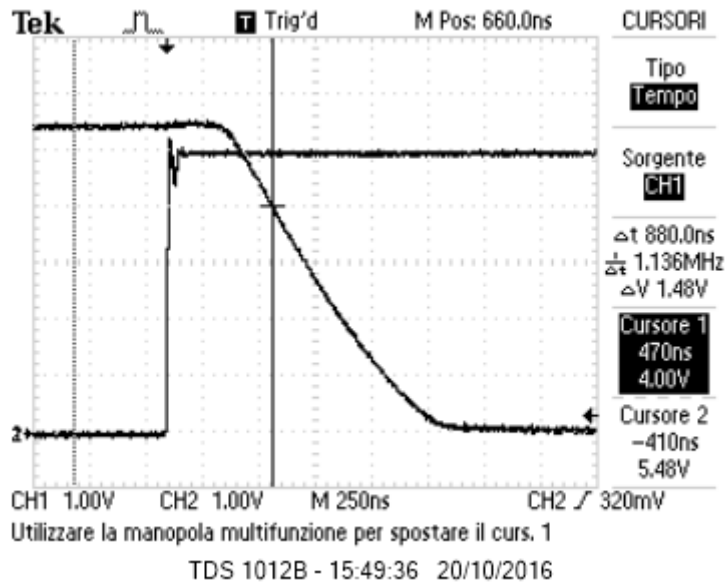


Figura 14: Acquisito con  $R_2 = 3.28k\Omega$ . Si osserva  $T_{rd} = 250ns$  e  $T_d = 650ns$ .

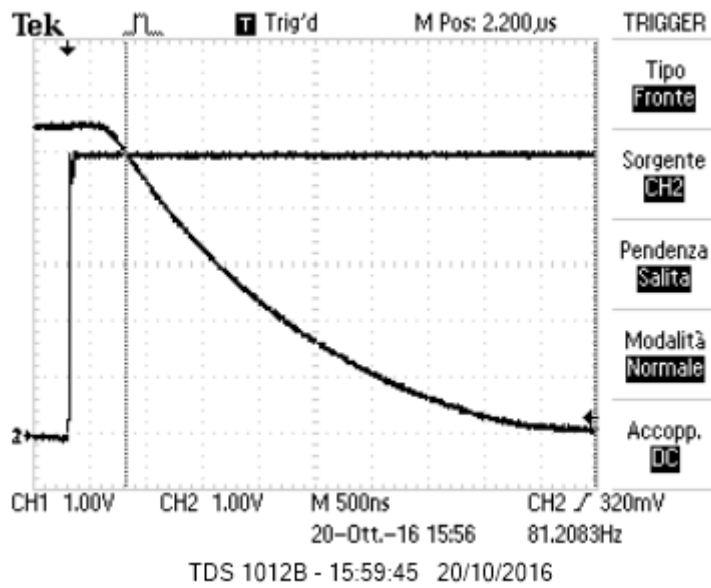


Figura 15: Acquisito con  $R_2 = 2.37k\Omega$ . Si osserva  $T_{rd} = 500ns$  e  $T_d = 1.3\mu s$ .