

Esercitazione 10 - Gruppo AC

Caratteristiche fisiche delle porte logiche

Marco Cilibrasi

Tommaso Pajero

26 marzo 2015

L'esperienza consiste nella misura delle principali caratteristiche statiche e dinamiche di una porta NOT contenuta nel circuito integrato DM74LS04 (*HEX inverter*, casa produttrice *National semiconductors*).

1 Caratteristiche statiche

1.1 Misura delle tensioni di operazione

Si è montato il circuito in figura 1 con $R_1 = 1.95 \pm 0.02 \text{ k}\Omega$ e $R_2 = 100.9 \pm 0.8 \Omega$, utilizzando la tensione $V_{CC} = 5.08 \pm 0.03 \text{ V}$ anche per l'alimentazione del circuito integrato. L'esperimento è stato svolto utilizzando solo una delle sei porte NOT presenti nell'IC DM74LS04 (quella relativa ai piedini A1-Y1).

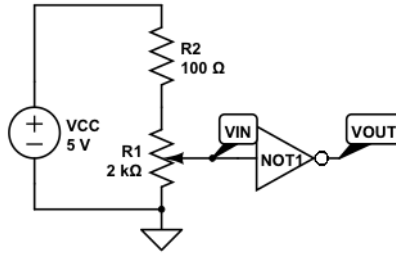


Figura 1: Circuito utilizzato per la misura delle tensioni di operazione della porta NOT del circuito integrato DM74LS04.

Si è presa una serie di misure della tensione in ingresso e in uscita alla porta, al variare della posizione del potenziometro, intensificando la presa dati in corrispondenza della transizione fra i due regimi asintotici. Le misure sono state eseguite avvalendosi del multimetro digitale (l'oscilloscopio, limitatamente alle misure di tensioni continue, è meno preciso ed è dotato di una resistenza interna minore). I risultati sono riportati in tabella 1 e graficati in figura 2.

Chiaramente la zona compresa tra $V_{in} = 1.0 \pm 0.1 \text{ V}$ e $V_{in} = 1.4 \pm 0.1 \text{ V}$ corrisponde alla transizione dello stato del circuito fra i due regimi predefiniti di funzionamento, e in questo intervallo il valore logico dell'uscita non è ben definito. In particolare, in tale zona l'andamento di V_{out} in funzione di V_{in} è esponenzialmente decrescente¹ (ciò fa sì che le dimensioni di tale intervallo siano ridotte, conformemente alle esigenze di funzionamento della porta), ed è probabilmente determinato dal passaggio di alcuni dei transistor dal regime di saturazione a quello di interdizione (e viceversa).

Si è stimato per le tensioni corrispondenti agli estremi delle due regioni a valore logico definito:

1. $V_{IL} = 0.9 \pm 0.1 \text{ V}$ (il valore è quello corrispondente all'inizio del ginocchio in figura 2, l'incertezza la differenza tra tale valore e quello della misura immediatamente successiva).
2. $V_{OH} = 4.1 \pm 0.1 \text{ V}$ (valore di V_{out} in corrispondenza di $V_{in} = V_{IL}$, l'incertezza, è calcolata analogamente al punto precedente).
3. $V_{IH} = 1.42 \pm 0.01 \text{ V}$ (primo valore di V_{in} in corrispondenza del quale V_{out} assume un valore prossimo a quello asintotico - e il suo andamento comincia ad essere approssimativamente costante -; l'incertezza, piuttosto elevata, tiene conto dell'incertezza strumentale sulla misura e del fatto che V_{out} cambia valore molto più bruscamente rispetto all'altro ginocchio).
4. $V_{OL} = 0.114 \pm 0.001 \text{ V}$ (media aritmetica delle V_{out} prese successivamente a $V_{in} = 1.422 \text{ V}$ inclusa; incertezza pari alla semidispersione delle misure).

¹Del tipo $V_{out} = 4.2 \text{ V} - \text{cost} \cdot e^{(V_{in} - V_0)/V^*}$.

Tabella 1: Tensioni in ingresso e in uscita alla porta NOT del circuito integrato DM74LS04 montato nel circuito in figura 1, al variare della posizione del potenziometro.

V_{in} [V]	$\sigma_{V_{in}}$ [V]	V_{out} [V]	$\sigma_{V_{out}}$ [V]
0.042	0.001	4.22	0.02
0.215	0.001	4.22	0.02
0.514	0.003	4.22	0.02
0.626	0.003	4.22	0.02
0.773	0.004	4.20	0.02
0.890	0.004	4.11	0.02
0.992	0.005	3.97	0.02
1.042	0.005	3.86	0.02
1.076	0.005	3.76	0.02
1.128	0.006	3.60	0.02
1.175	0.006	3.42	0.02
1.208	0.006	3.23	0.02
1.249	0.006	2.88	0.01
1.271	0.006	2.66	0.01
1.302	0.007	2.44	0.01
1.320	0.007	2.27	0.01
1.351	0.007	1.98	0.01
1.360	0.007	1.800	0.008
1.375	0.007	1.605	0.007
1.382	0.007	1.104	0.006
1.414	0.007	1.020	0.005
1.417	0.007	0.942	0.005
1.422	0.007	0.1151	0.0006
1.434	0.007	0.1138	0.0006
1.467	0.007	0.1126	0.0006
1.530	0.008	0.1144	0.0006
1.762	0.009	0.1142	0.0006
2.15	0.01	0.1146	0.0006
2.64	0.01	0.1148	0.0006
3.31	0.02	0.1148	0.0006
4.00	0.02	0.1142	0.0006
4.84	0.02	0.1142	0.0006

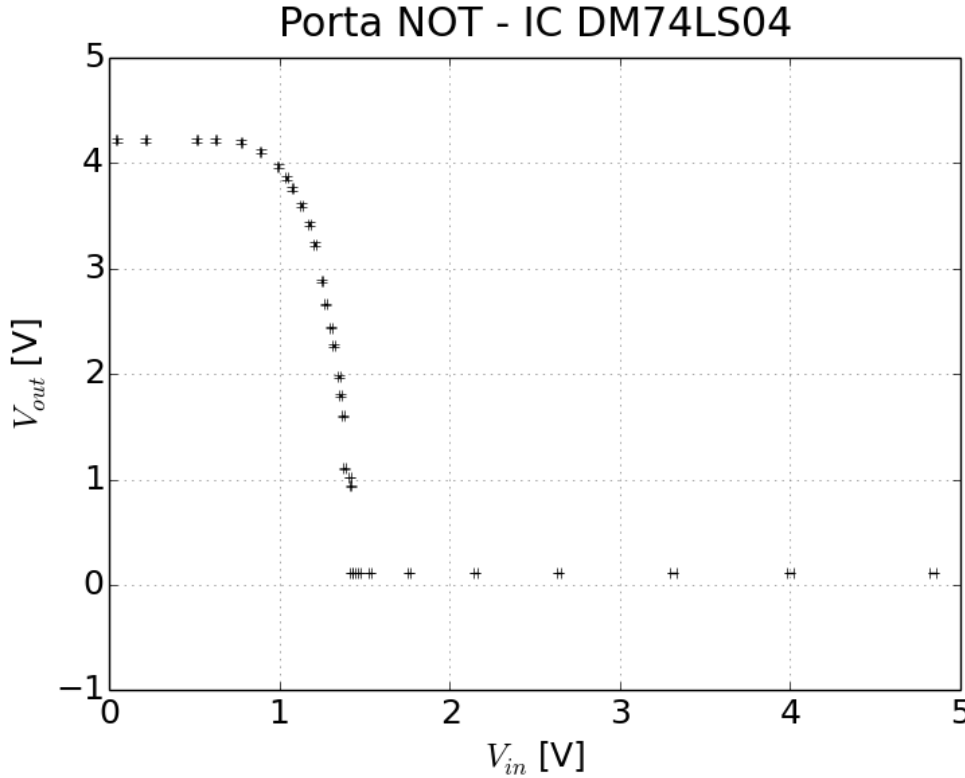


Figura 2: Tensioni in ingresso e in uscita alla porta NOT del circuito integrato DM74LS04 montato nel circuito in figura 1.

I valori dichiarati dal costruttore² rientrano abbondantemente entro quelli misurati, eccetto quello di V_{IL}^{max} , che coincide col valore misurato entro l'incertezza. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che le condizioni di corretto funzionamento garantite dal costruttore sono piuttosto restrittive, perché devono essere rispettate anche in diverse condizioni di operazione (temperature e/o tensioni di alimentazioni diverse ecc.)³. Al contrario, le nostre misure si limitano ad individuare le due regioni in cui i valori delle tensioni in uscita si stabilizzano, e lo fanno solo per un particolare temperatura e tensione di alimentazione.

1.2 Misura delle correnti in ingresso

Si è inserito l'amperometro analogico⁴ fra il potenziometro e l'ingresso della porta NOT nel circuito in figura 1. Quindi, si sono prese varie coppie di misure del potenziale in ingresso alla porta (eseguite come prima tramite il multimetro digitale) e dell'intensità della corrente in ingresso⁵. I risultati sono riportati in tabella 2 e graficati in figura 3.

Per spiegare l'andamento di I_{in} in funzione di V_{in} si può fare riferimento allo schema circuitale delle porte NOT dell'IC SN74LS04, riportato in figura 4⁶:

- Per bassi valori di V_{in} il diodo Shottky immediatamente a destra dell'ingresso si trova in conduzione. Trascurando la corrente di base proveniente dal transistor ancora più a destra e la quella relativa al ramo della resistenza da 12 k Ω ⁷, ci si aspetta che il modulo di I_{in} (che giunge nelle ipotesi fatte dal ramo della resistenza da 20 k Ω) sia inversamente proporzionale a V_{in} con costante di proporzionalità dell'ordine di 1/20 k Ω , in accordo con i dati sperimentali.
- Per alti valori di V_{in} il diodo è in interdizione e dunque I_{in} , entrante nel circuito, è dell'ordine della corrente di saturazione inversa (circa qualche μA).

² $V_{IL}^{max} = 0.8$ V, $V_{OH}^{min} = 2.7$ V, $V_{IH}^{min} = 2$ V, $V_{OL}^{max} = 0.5$ V.

³Inoltre, vi è probabilmente un'ulteriore restrizione tesa a rendere inattuabile da un punto di vista legale il prodotto dell'azienda.

⁴Si è scelto di utilizzare l'amperometro analogico poiché garantisce una precisione molto migliore (6 volte) di quello digitale per intensità di corrente dell'ordine della decina di μA , e una precisione quasi equivalente per intensità di qualche centinaio di mA (circa la metà).

⁵Si sono assunti, secondo la convenzione usuale, valori positivi per le correnti entranti nella porta NOT.

⁶Non si è riusciti a trovare lo schema dell'IC DM74LS04.

⁷La prima ipotesi è giustificata dal fatto che la corrente di base è generalmente molto minore di quella di collettore, che nel circuito in esame non è comunque maggiore di qualche centinaio di nA; la seconda dal fatto che l'output si trova circa a 0 V e dunque nella parte inferiore del circuito circolano correnti di intensità molto bassa.

Tabella 2: Corrente in ingresso in funzione della tensione in ingresso per la porta NOT del circuito integrato DM74LS04, montato nel circuito in figura 1.

V_{in} [V]	$\sigma_{V_{in}}$ [V]	I_{in} [μA]	$\sigma_{I_{in}}$ [μA]
0.0423	0.0008	-261	5
0.1543	0.0008	-258	5
0.297	0.002	-249	5
0.502	0.003	-239	5
0.643	0.003	-228	5
0.852	0.004	-213	5
1.152	0.006	-198	5
1.356	0.007	-189	5
1.368	0.007	-130	5
1.392	0.007	-65	5
1.403	0.007	-28.0	0.5
1.413	0.007	-13.5	0.5
1.454	0.008	-4.0	0.5
1.503	0.008	-0.5	0.5
1.642	0.008	0.0	0.5
2.13	0.01	1.5	0.5
2.78	0.01	2.0	0.5
3.45	0.02	3.0	0.5
4.13	0.02	4.0	0.5
4.84	0.03	5.0	0.5

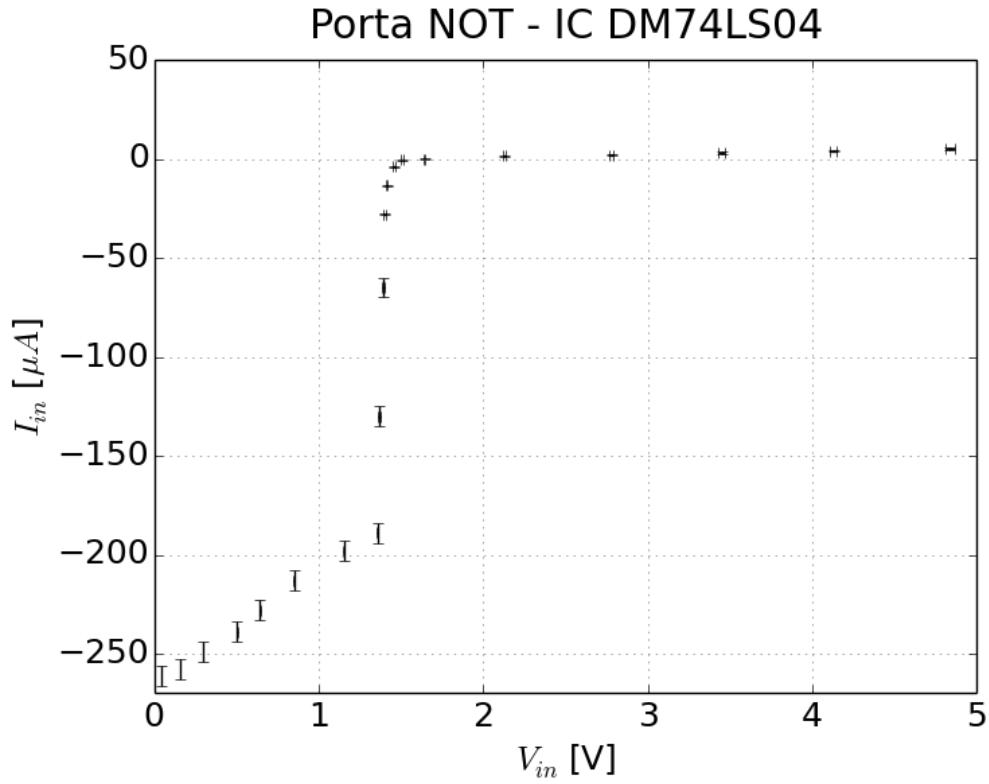


Figura 3: Corrente in ingresso in funzione della tensione in ingresso per la porta NOT del circuito integrato DM74LS04, montato nel circuito in figura 1.

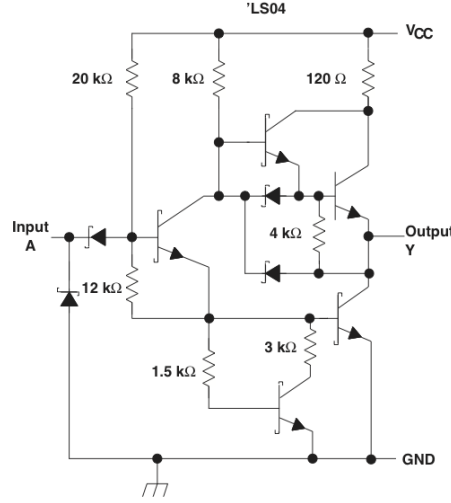


Figura 4: Schema circuitale della porta NOT dell'IC SN74LS04.

- Per valori intermedi di V_{in} I_{in} presenta un andamento crescente in maniera molto veloce, corrispondente alla zona di transizione descritta al punto 1.1.

Dalla figura 3 si vede subito che le correnti massime in ingresso relative ai due stati logici 0 e 1 si ottengono in corrispondenza della tensione in ingresso minima e massima. Dunque, si sono prese come stime di I_{IL} e di I_{IH} rispettivamente il primo e l'ultimo valore riportati in tabella 2, per i quali il potenziometro si trovava a fine corsa (in una e nell'altra direzione):

1. $I_{IL} = -261 \pm 5 \mu A$ (valore dichiarato dal costruttore: $I_{IL}^{max} = -0.36 \text{ mA}$);
2. $I_{IH} = 5.0 \pm 0.5 \mu A$ (valore dichiarato dal costruttore: $I_{IH}^{max} = 20 \mu A$);

Come si vede, i valori misurati rientrano abbondantemente in quelli riportati nel *datasheet* del circuito integrato. È verosimile che la corrente rilevante per il valore del *fan-out* sia I_{IL} , maggiore in modulo di I_{IH} di quasi due ordini di grandezza.

1.3 Misura delle correnti in uscita

Si è montato il circuito in figura 5 con $R_1 = 104.3 \pm 0.8 \text{ k}\Omega$ e $R_2 = 100.9 \pm 0.8 \Omega$ ⁸. Per tutta la durata della presa dati, si è osservata V_{out} all'oscilloscopio e si è misurata l'intensità di corrente uscente dall'IC indirettamente, registrando la caduta di potenziale ai capi di R_2 per mezzo del multimetro digitale.

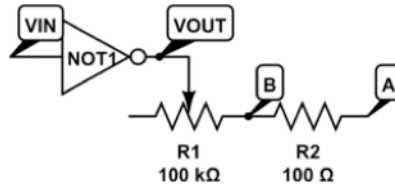


Figura 5: Circuito utilizzato per la misura delle correnti in uscita.

Inizialmente, si sono collegati V_{in} e il nodo A a V_{CC} . Agendo sul potenziometro, si è modificato il carico a valle della porta NOT, tenendo contemporaneamente d'occhio V_{out} all'oscilloscopio. Su tale canale, si è osservata una brusca transizione fra circa 480 mV e 2.24 V per una certa posizione del potenziometro. Si sono eseguite più misure di V_{BA}^{max} ⁹ corrispondenti allo stato inferiore di V_{out} ¹⁰, ottenendo come risultato $V_{BA}^{max} = -1.282 \pm 0.006 \text{ V}$ ¹¹. Riferendosi a tale misura, si è stimata:

$$I_{OL} = 12.7 \pm 0.01 \text{ mA}$$

⁸La tensione di alimentazione del circuito integrato era sempre $V_{CC} = 5.08 \pm 0.03 \text{ V}$.

⁹Il massimo è da intendersi sul valore assoluto della tensione.

¹⁰In questo modo si è cercato di ridurre l'errore sulla misura dovuto al fatto che non è possibile ottenere, agendo sul potenziometro, l'esatta posizione in corrispondenza della quale V_{BA} è massima.

¹¹L'incertezza dovuta alla precisione del multimetro è maggiore della differenza fra le due misure più alte che si sono prese.

Successivamente, si sono collegate V_{in} e il nodo A a terra. Stavolta, la transizione di V_{out} si poneva a cavallo tra i valori 2.24 V e 3.54 V. Procedendo analogamente al punto precedente, ma considerando solo il regime in cui V_{out} assumeva valori alti, si è misurato $V_{BA}^{min} = 199 \pm 1$ mV, corrispondente a:

$$I_{OH} = -1.96 \pm 0.02 \text{ mA}$$

In entrambe le misure, I_{out} assumeva il suo valore massimo a ridosso della zona di transizione fra i due stati della porta. La brusca variazione di corrente che avviene in tale regione si spiega col fatto che, come accennato al punto 1.1, essa corrisponde a una commutazione dello stato dei transistor presenti nel circuito dell'IC. In particolare, in questa zona alcuni transistor passano probabilmente dallo stato di interdizione a quello attivo, consentendo la circolazione di un'intensità di corrente molto maggiore nei loro collettori ed emettitori.

I valori delle correnti in uscita riportati sul *datasheet*, $I_{OL}^{max} = 8$ mA e $I_{OH}^{max} = -0.4$ mA, sono maggiori di quelli misurati, ma più o meno dello stesso ordine di grandezza. Questo fatto è probabilmente dovuto ai due motivi seguenti:

- Le misure di I_{OL} e I_{OH} sono state eseguite a ridosso della zona di transizione, la quale però aveva come limiti valori di V_{out} diversi da quelli misurati al punto 1.1. Perciò, se si seguono le convenzioni adottate al punto 1.1, in corrispondenza di tali misure lo stato dell'uscita della porta non era definito (ci si trovava cioè nella zona "proibita"). Addirittura, la misura di I_{OH} - quella in minor accordo con le attese - è stata eseguita in una zona non permessa neppure dalle convenzioni illustrate nel *datasheet* ($2.24 \text{ V} = V_{OH}^{exp} < V_{OH}^{min} = 2.7 \text{ V}$).
- I valori di I_{OL}^{max} e I_{OH}^{max} riportati sul *datasheet* non sono, fra l'altro, i valori massimi di I_{out} garantiti dal produttore. Al contrario, essi rappresentano il limite delle condizioni di operazione per le quali il produttore garantisce siano rispettati i valori illustrati nelle tabelle *Electrical characteristics* e *Switching Characteristics*.

1.4 Valutazione del *fan out*

Sfruttando i risultati ottenuti ai due punti precedenti, si è stimato il *fan-out*:

$$fan - out \simeq \min \left\{ \left| \frac{I_{OH}}{I_{IH}} \right|, \left| \frac{I_{OL}}{I_{IL}} \right| \right\} = 49 \pm 1$$

Questa stima è però molto grossolana. Infatti, a rigore il *fan-out* è uguale al minimo del rapporto fra intensità di corrente in uscita e in ingresso, che non coincide necessariamente con il rapporto fra il massimo dell'intensità della corrente in uscita e il massimo dell'intensità di corrente in ingresso. Dunque, per avere una stima più precisa, si sarebbero dovute misurare contemporaneamente le intensità di corrente in ingresso e in uscita al variare della tensione in ingresso¹².

2 Caratteristiche dinamiche

2.1 Montaggio di Arduino

Per generare le onde quadre utilizzate nel prosieguo dell'esperimento abbiamo montato il circuito impulsatore con il microcontrollore Arduino Nano con ATMEGA 328, secondo lo schema in figura 6.

Per il montaggio abbiamo utilizzato i componenti riportati in tabella 3.

Tabella 3: Componenti circuito

Componente	Valore
$C1$	$108 \pm 4 \text{ nF}$
$C2$	$104 \pm 4 \text{ nF}$
$R1$	$993 \pm 8 \Omega$
$R2$	$984 \pm 8 \Omega$
$R3$	$994 \pm 8 \Omega$
$R4$	$997 \pm 8 \Omega$
$R5$	$10.24 \pm 0.08 \text{ k}\Omega$

Abbiamo verificato che sui piedini Y1 e Y2 il circuito genera due onde quadre sfasate di 90° di frequenza variabile attraverso il trimmer. Per le successive misure abbiamo usato il piedino Y2 come V_{IN} della porta NOT e abbiamo impostato $V_{CC} = 5.19 \pm 0.03$ V agendo sul generatore e $f = 0.937 \pm 0.009$ kHz agendo sul trimmer.

¹²Ciò avrebbe richiesto la progettazione e il montaggio di un altro circuito e non è stato perciò realizzato.

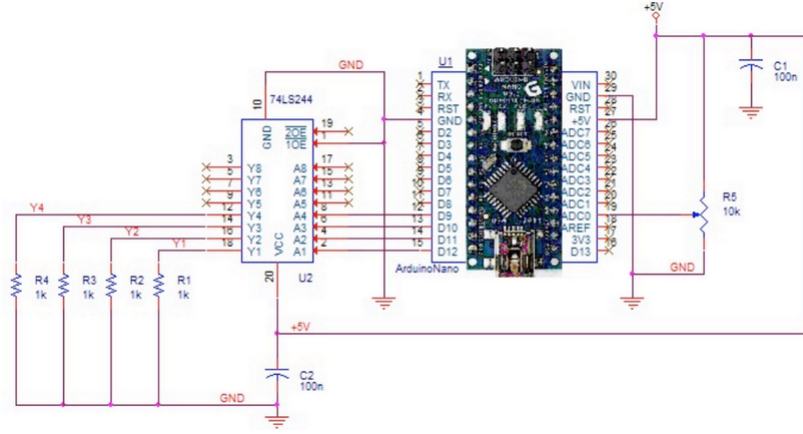


Figura 6: Circuito impulsatore realizzato con il microcontrollore Arduino Nano.

Abbiamo inoltre misurato l'ampiezza dell'onda quadra prodotta da Arduino¹³ ottenendo: $V_{INH} = 3.7 \pm 0.1$ V e $V_{INL} = 136 \pm 8$ mV. All'uscita della porta NOT abbiamo osservato, come atteso, un'onda quadra sfasata di 180° con $V_{OUTH} = 4.2 \pm 0.2$ V e $V_{OUTL} = 0.16 \pm 0.01$ V (cfr. figura 7).

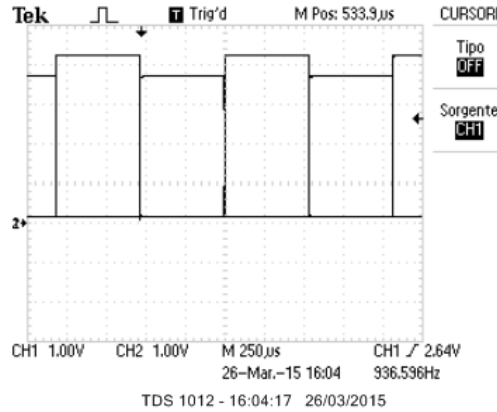


Figura 7: Ingresso e uscita della porta NOT (l'ingresso è generato dal circuito impulsatore della figura 6).

2.2 Misura dei tempi di propagazione

Per la misura dei tempi di propagazione t_{PLH} e t_{PHL} abbiamo usato la scala di misura più bassa possibile sull'oscilloscopio (5 nF). Abbiamo considerato come tempo di propagazione l'intervallo tra il momento in cui l'input raggiunge il valore medio tra V_{INL} e V_{INH} (in salita o in discesa) e quello in cui l'output raggiunge il valore medio tra V_{OUTL} e V_{OUTH} (rispettivamente in discesa o in salita). In questo modo abbiamo ottenuto i valori $t_{PLH} = 22 \pm 1$ ns (cfr. figura 8) e $t_{PHL} = 13.8 \pm 0.8$ ns (cfr. figura 9)¹⁴. La misura di t_{PHL} è in accordo con quanto indicato sul datasheet (valore massimo 15 ns), mentre la misura di t_{PLH} è superiore al massimo indicato dal datasheet (15 ns), ma comunque dello stesso ordine di grandezza.

Questa discrepanza è dovuta con ogni probabilità al fatto che il *datasheet* fornisce il valore di t_{PLH} misurato nelle condizioni rappresentate in figura 10, con $R_L = 2$ kΩ e $C_L = 50$ pF. Noi, al contrario, abbiamo eseguito la misura a uscita aperta, il che cambia le condizioni di lavoro del circuito integrato e, conseguentemente, il segnale alla sua uscita¹⁵.

2.3 Misura del tempo di salita e discesa

Infine, abbiamo misurato i tempi di salita e discesa con la definizione usuale¹⁶ ottendo i risultati in tabella 4.

¹³A partire da questo punto tutte le misure sono state effettuate per mezzo dell'oscilloscopio.

¹⁴Le incertezze tengono conto della forma irregolare dei segnali e della difficoltà della determinazione per mezzo dei cursori dei punti in cui il segnale assume il valore delle tensioni "medie" in ingresso e in uscita.

¹⁵Questo fatto è stato apprezzato al punto 1.3, nel quale il valore di V_{OH} era minore di quello misurato al punto 1.1.

¹⁶Tempo necessario affinché il valore della tensione passi dal 10% al 90% dei valori estremali.

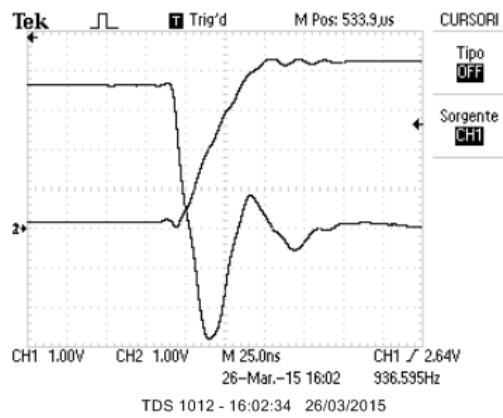


Figura 8: Forma dei segnali in ingresso e in uscita in corrispondenza della transizione L-H; in particolare, si osserva un *overshoot* del segnale in ingresso.

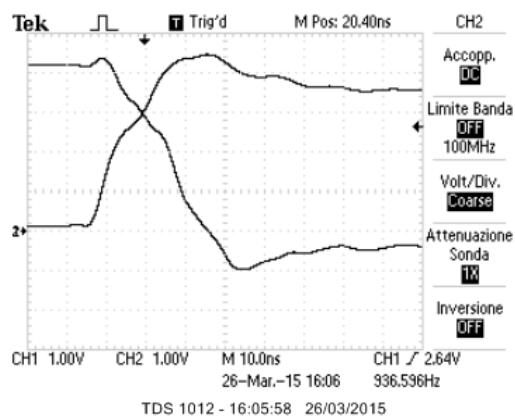


Figura 9: Forma dei segnali in ingresso e in uscita in corrispondenza della transizione H-L; in particolare, si osserva un evidente *overshoot* di entrambi i segnali.

Tabella 4: Tempi di salita e discesa

	Salita	Discesa
<i>Ingresso</i>	17.2 ± 0.6 ns	7.6 ± 0.4 ns
<i>Uscita</i>	38 ± 1 ns	25.6 ± 0.8 ns

L'incertezza è dovuta principalmente alla difficoltà di individuare con i cursori i punti corrispondenti ai valori 10% e 90% della tensione, ed è maggiore nel caso dei segnali in uscita, per i quali la pendenza del segnale è minore.

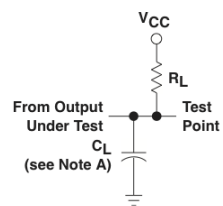


Figura 10: Condizioni di lavoro per le quali il costruttore fornisce i valori di t_{PHL} e t_{PLH} .