

# Esperienza 10: caratteristiche fisiche porte logiche

Gruppo BN  
Federico Belliardo, Lisa Bedini, Marco Costa

28 marzo 2017

## 1 Scopo dell'esperienza

Lo scopo dell'esperienza è misurare le caratteristiche statiche e dinamiche delle porte NOT dell'integrato SN74LS04.

## 2 Materiale occorrente

- Integrato IC SN74LS04;
- trimmer da 2 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$  e 100 k $\Omega$ ;
- Arduino Nano;
- Integrato IC SN74LS244;

## 3 Caratteristiche statiche

Abbiamo montato il circuito come in figura 1. I valori delle componenti sono  $R_1 = 1950 \pm 20 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 100 \pm 1 \Omega$ .

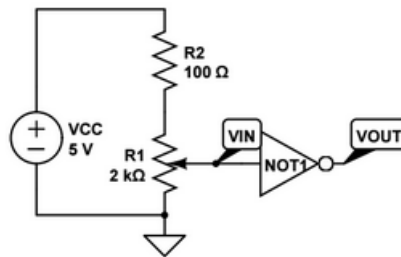


Figura 1: Circuito utilizzato.

Abbiamo eseguito le misure tramite multimetro digitale. Come incertezze abbiamo preso quelle riportate sul manuale dello strumento. Abbiamo misurato la tensione di alimentazione  $V_{CC} = 4.85 \pm 0.03 \text{ V}$  tramite multimetro digitale (incertezza riportata nel manuale), nei limiti di funzionamento riportati nel datasheet.

### 3.1 Misura delle tensioni di operazione

Per ottenere diversi valori di  $V_{in}$  abbiamo variato opportunamente il trimmer (che ha la funzione di partitore di tensione). Una volta fissata la sua posizione, abbiamo misurato tramite multimetro digitale<sup>1</sup>  $V_{in}$  e  $V_{out}$ . In tabella 1 e in figura 2 abbiamo riportato le misure ottenute.

Si osserva che  $V_{out}$  va da un massimo di  $V_{OH,max} = 4.3 \pm 0.1 \text{ V}$  fino a  $V_{OH,min} = 3.7 \pm 0.1 \text{ V}$ , valore subito dopo il quale si osserva una rapida variazione di  $V_{out}$ , dopo la quale si ha transizione al livello basso dell'Output. Come incertezza si è preso il range in cui si distinguono i due regimi. Si può considerare quindi che l'uscita della porta sia al livello alto nella fascia trovata. Pertanto abbiamo stimato  $V_{OH} = 3.7 \pm 0.2 \text{ V}$ <sup>2</sup>. Abbiamo stimato l'incertezza su questo valore come la differenza fra il primo punto per cui si è osservata la variazione e quello immediatamente precedente.

<sup>1</sup>E' lo strumento di misure di tensione in continua con maggiore resistenza interna.

<sup>2</sup>In accordo con la definizione data di  $V_{OH}$ .

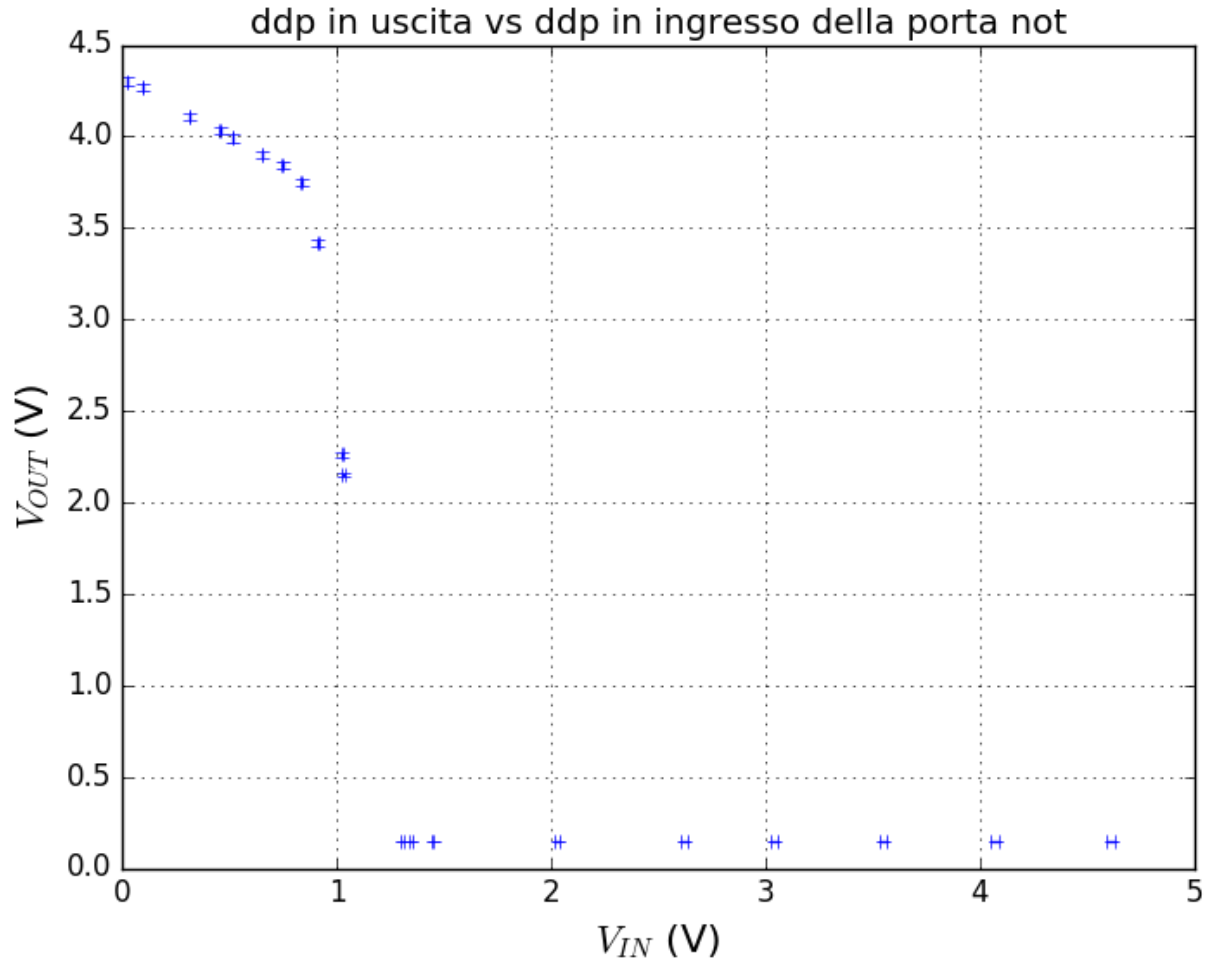


Figura 2:  $V_{out}$  in funzione di  $V_{in}$ .

$V_{in}$ (V)	$V_{out}$ (V)
$0.020 \pm 0.001$	$4.30 \pm 0.05$
$0.095 \pm 0.001$	$4.27 \pm 0.05$
$0.314 \pm 0.002$	$4.11 \pm 0.005$
$0.457 \pm 0.003$	$4.03 \pm 0.05$
$0.515 \pm 0.003$	$3.99 \pm 0.05$
$0.653 \pm 0.004$	$3.90 \pm 0.04$
$0.748 \pm 0.005$	$3.84 \pm 0.05$
$0.838 \pm 0.005$	$3.75 \pm 0.05$
$0.913 \pm 0.06$	$3.42 \pm 0.05$
$1.026 \pm 0.006$	$2.26 \pm 0.02$
$1.032 \pm 0.006$	$2.15 \pm 0.02$
$1.304 \pm 0.007$	$0.144 \pm 0.001$
$1.347 \pm 0.007$	$0.144 \pm 0.001$
$1.448 \pm 0.008$	$0.144 \pm 0.001$
$2.03 \pm 0.02$	$0.144 \pm 0.001$
$2.62 \pm 0.02$	$0.144 \pm 0.001$
$3.04 \pm 0.02$	$0.144 \pm 0.001$
$3.55 \pm 0.02$	$0.144 \pm 0.001$
$4.07 \pm 0.03$	$0.144 \pm 0.001$
$4.61 \pm 0.03$	$0.144 \pm 0.001$

Tabella 1: Misure dei potenziali  $V_{in}$ ,  $V_{out}$ .

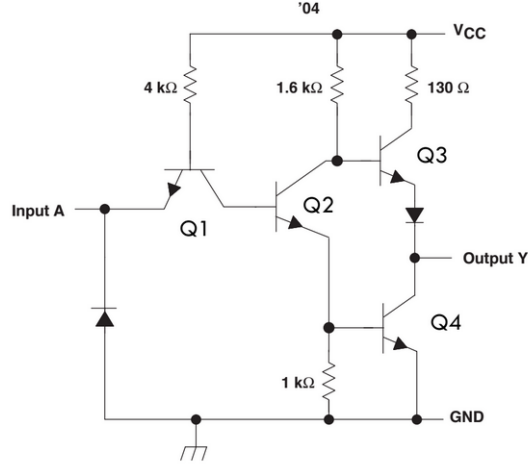


Figura 3: Schema circuitale di NOT TTL (presente negli '04).

Come stima di  $V_{OL}$  abbiamo preso  $0.14 \pm 0.05V$ , ossia il valore asintotico. Abbiamo tuttavia una grande incertezza su questa stima: in effetti abbiamo riscontrato difficoltà a prendere misure per valori di  $V_{out}$  poco superiori a  $0.144V$ ; in particolare, era sufficiente una leggera variazione della posizione del trimmer per portare  $V_{out}$  dal valore di  $2.15V$  a  $0.144V$ .

Per quanto riguarda le tensioni in ingresso, si osserva che esse vengono considerate dalla porta come valore basso in un range che va da 0 a  $0.8V$  circa, mentre alto da  $1.3V$  in poi. Per stimare i valori di soglia  $V_{IL}$ ,  $V_{IH}$ , abbiamo preso i valori di  $V_{in}$  per i quali si osserva l'inizio della transizione di  $V_{out}$  da un livello logico all'altro. Con i dati presi si è stimato  $V_{IL} = 0.8 \pm 0.1V$ , dove come incertezza abbiamo preso la differenza di  $V_{IL}$  dal primo valore di  $V_{in}$  per il quale  $V_{out}$  inizia a scendere bruscamente. In modo del tutto analogo si ha  $V_{IH} = 1.3 \pm 0.2V$ . I valori stimati risultano tutti in buon accordo con quanto riportato sul datasheet:  $V_{IL,att} = 0.8V$ ,  $V_{IH,att} = 2V$ ,  $V_{OL,att} = 0.25V$ ,  $V_{OH,att} = 3.4V$ .

Il comportamento che si osserva per valori di  $V_{in}$  compresi fra  $V_{IL}$  e  $V_{IH}$  può essere spiegato in termini del circuito in figura 3.

Quando si supera  $V_{IL}$  (ossia si passa da stato basso a alto), il transistor Q1 passa dal regime di saturazione a interdizione; conseguentemente Q2 e Q4 passano da regime di interdizione a saturazione (scorre corrente nella maglia che non contiene Q1) e l'output cambia stato. Dato che le transizioni nei transistor non sono immediate, ed è necessario che le varie giunzioni cambino polarità, si ha una fascia di  $V_{in}$  compresa tra  $V_{IL}$  e  $V_{IH}$  in cui si ha un  $V_{out}$  intermedio fra  $V_{OH}$  e  $V_{OL}$ .

### 3.2 Misura delle correnti in ingresso

Abbiamo inserito l'amperometro in serie all'ingresso del circuito di figura 1 e abbiamo misurato  $I_{in}$  al variare di  $V_{in}$ <sup>3</sup>. Per avere più sensibilità sulla misura di corrente si è usato il multimetro analogico e l'incertezza usata è quella riportata nel manuale. Il segno di  $I_{in}$  è positivo se entrante nella porta. I dati sono riportati in tabella 2 e in figura 4. Ci aspettiamo che per  $V_{in}$  a livello basso si abbia una corrente uscente (negativa), in quanto l'input è come se fosse collegato direttamente a  $V_{CC}$  tramite la giunzione polarizzata direttamente BE di Q1 (figura 3). Viceversa, se  $V_{in}$  è alto, Q1 è in interdizione e quindi si avrà una corrente entrante circa nulla. Si osserva che per  $V_{in}$  corrispondenti al valore logico basso, si ha una corrente  $I_{in}$  negativa e dell'ordine delle centinaia di  $\mu A$  (massimo sui  $260\mu A$ ), mentre per  $V_{in}$  su stato alto, si ha una corrente nulla entro l'errore. Abbiamo stimato i valori delle correnti di soglia in corrispondenza dei punti in cui si hanno variazioni brusche dell'andamento di  $I_{in}$ <sup>4</sup>. Si ha quindi  $I_{IH} = 0.0 \pm 0.5\mu A$  e  $I_{IL} = -180 \pm 20\mu A$ . I rispettivi valori massimi riportati sul datasheet sono  $I_{IL,att} = -0.4mA$ ,  $I_{IH} = 20\mu A$ . I valori stimati quindi rientrano nei limiti riportati dal costruttore.

### 3.3 Misura delle correnti in uscita

Per misurare la massima e minima corrente in uscita dalla porta, abbiamo montato il circuito<sup>5</sup> come in figura 5. Per ricavare  $I_{out}$  abbiamo misurato la caduta di potenziale  $V_{AB} = V_A - V_B$  ai capi della resistenza  $R_2$  tramite multimetro digitale e poi si è diviso per  $R_2 = 98 \pm 1\Omega$ . Si è preso il segno della corrente positivo se entrante nella porta. Per la misura di  $I_{OL}$  si collega l'uscita a  $V_{CC}$  e si varia il potenziometro  $R_1$  in figura

<sup>3</sup>La procedura per variare  $V_{in}$  è la stessa del punto precedente.

<sup>4</sup>Questi sono anche punti in cui  $V_{in}$  è prossimo a  $V_{IL}$ ,  $V_{IH}$ .

<sup>5</sup>Il circuito collegato all'ingresso della porta è lo stesso di prima.

$V_{in}$ (V)	$I_{in}$ ( $\mu$ A)
$0.042 \pm 0.001$	$-270 \pm 3$
$0.127 \pm 0.002$	$-263 \pm 3$
$0.396 \pm 0.005$	$-231 \pm 3$
$0.720 \pm 0.005$	$-185 \pm 2$
$1.000 \pm 0.006$	$-148 \pm 2$
$1.066 \pm 0.006$	$-65 \pm 1$
$1.100 \pm 0.006$	$-20.0 \pm 0.5$
$1.143 \pm 0.006$	$-2.0 \pm 0.5$
$1.220 \pm 0.007$	$0.0 \pm 0.5$
$1.270 \pm 0.007$	$0.0 \pm 0.5$
$2.12 \pm 0.02$	$2.0 \pm 0.5$
$3.16 \pm 0.02$	$3.0 \pm 0.5$
$4.00 \pm 0.03$	$4.0 \pm 0.5$
$4.64 \pm 0.03$	$4.0 \pm 0.5$

Tabella 2: Corrente in ingresso in funzione di  $V_{in}$

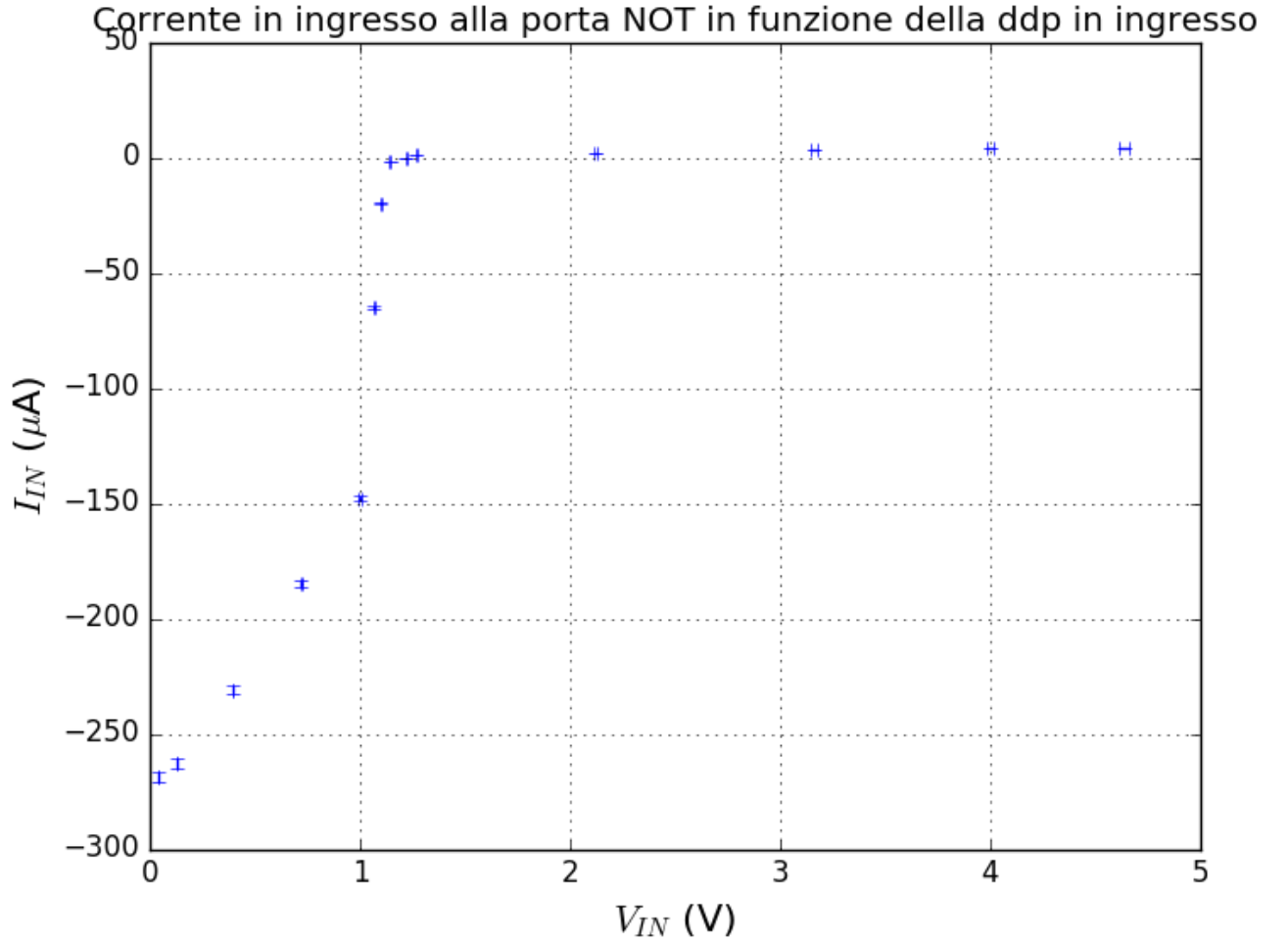


Figura 4: Corrente in ingresso alla porta NOT in funzione di  $V_{in}$ .

5 in modo che l'uscita sia in stato basso. Per verificare che l'uscita fosse effettivamente nello stato basso, si è controllato  $V_{out}$  tramite oscilloscopio. Abbiamo deciso di prendere la misura di corrente in corrispondenza del valore di  $V_{OL}$  stimato in precedenza. Tuttavia, in questo modo si ottiene  $V_{AB} = 4.60 \pm 0.4$  mV e quindi  $I_{out} = 47 \pm 1$   $\mu$ A, che risulta più basso del valore riportato sul datasheet  $I_{OL,att} = 8$  mA. Abbiamo quindi deciso di prendere una ulteriore misura, in corrispondenza del punto in cui si osservava una brusca variazione di  $V_{out}$  e  $V_{AB}$ . Ciò avviene per  $V_{out} = 380 \pm 3$  mV e  $V_{AB} = 700 \pm 7$  mV, da cui  $I_{out} = 7.1 \pm 1$  mA. Così si ottiene una stima più vicina al valore nominale. Abbiamo quindi scelto questo valore come  $I_{OL}$ . Un motivo per cui fallisce

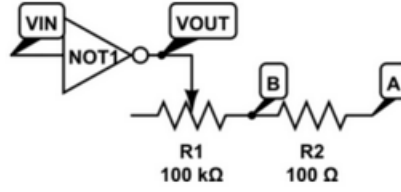


Figura 5: Schema del circuito utilizzato per la misura delle correnti di uscita.

il metodo di stimare  $I_{OL}$  come la  $I_{out}$  a  $V_{OL}$  è che nelle misure riportate nel grafico 2 non si è riusciti a ottenere misure di  $V_{out}$  che non fossero del valore limite 0.144V. In effetti, sempre facendo riferimento allo stesso grafico, si osserva che il  $V_{out}$  a cui è stata presa  $I_{OL}$  non è così lontano dalla zona in cui l'output è considerato basso. Per la misura di  $I_{OH}$  si collega l'uscita al ground facendo in modo che essa sia in stato alto. Abbiamo preso la misura in corrispondenza di  $V_{OUT} = 3.7 \pm 0.1V$ , ossia il valore stimato di  $V_{OH}$  (in corrispondenza di tale valore si aveva anche una brusca variazione della corrente e di  $V_{OUT}$ ). Così si ottiene  $V_{AB} = -13.8 \pm 0.2mV$  e quindi  $I_{OH} = -0.141 \pm 0.001mA$ , valore in accordo con quanto riportato nel datasheet  $I_{OH,att} = -0.4mA$ . La strategia di mettere  $V_{out}$  pari alla stima del valore di soglia ottenuto in questo caso funziona meglio perchè i dati del grafico 2 coprono un intorno sufficientemente grande del punto in cui avviene la variazione brusca di corrente. Una spiegazione della rapida variazione di  $I_{in}$  è che se diminuiamo troppo la resistenza di carico all'uscita della porta NOT, l'integrato deve erogare più corrente affinché ci sia la giusta differenza di potenziale fra  $V_{out}$  e  $V_A$  (il quale è tenuto a potenziale costante tramite opportuno collegamento). Se la corrente necessaria supera la corrente massima erogabile, il circuito non funziona più come NOT e quindi si ha una variazione della corrente. Con questi valori si è dato una stima del *fanout*. Le correnti che determinano tale valore sono  $I_{OL}$  e  $I_{IL}$ , in quanto  $I_{IH}$  è nulla (al più dell'ordine del  $\mu A$ ), e quindi si possono alimentare più facilmente porte quando si è nello stato alto. Si ha  $fanout = I_{IL}/I_{OL} = 39 \pm 2$ , mentre utilizzando le correnti di soglia nominali si ottiene  $fanout, att = 20$ . Il risultato ottenuto è dello stesso ordine di grandezza di quello stimato.

## 4 Montaggio di Arduino

Abbiamo montato il circuito pulsatore in figura 6. I valori delle componenti, misurate con multimetro, sono

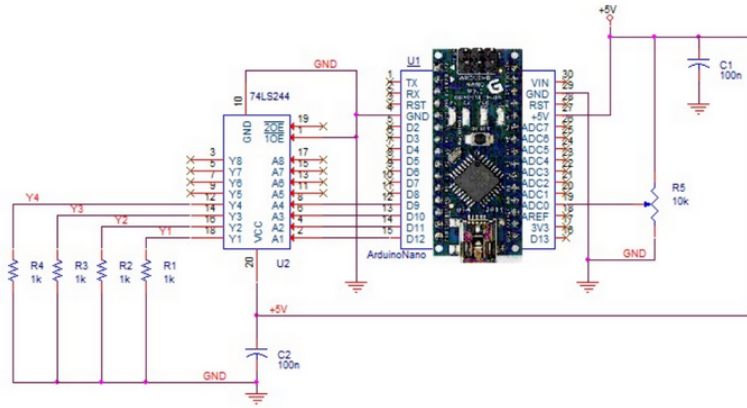


Figura 6: Schema del pulsatore utilizzato.

$R_1 = 0.98 \pm 0.01k\Omega$ ,  $R_2 = 1.00k\Omega$ ,  $R_3 = 0.98 \pm 0.01k\Omega$ ,  $R_4 = 0.99k\Omega$ ,  $R_5 = 9.9 \pm 0.1k\Omega$ ,  $C_1 = 100 \pm 20nF$ ,  $C_2 = 100 \pm 20nF$ . Successivamente abbiamo verificato il suo comportamento da generatore di onde quadre. La frequenza del segnale dipende dalla posizione del trimmer, e va da qualche Hz ai 50 kHz. L'ampiezza dell'onda picco-picco è pari a  $v_{pp} = 3.16 \pm 0.04V$ . In figura 7 si possono osservare i segnali (misurati tramite oscilloscopio) alle uscite  $Y_1$  e  $Y_2$ .

## 5 Caratteristiche dinamiche

### 5.1 Onda in ingresso

Si è generato tramite Arduino un segnale ad onda quadra di frequenza di circa  $1.01 \pm 0.01kHz$  di ampiezza da 0 a  $3.16 \pm 0.04V$ . In figura 8 si può osservare il corretto funzionamento della porta NOT. Si è effettuata la misura

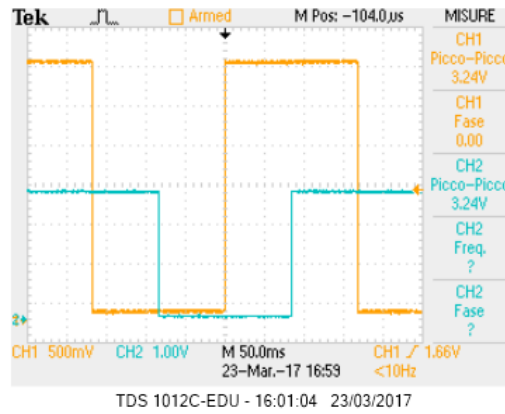


Figura 7: Onde sfasate di  $\pi/2$  in uscita a  $Y_1$ ,  $Y_2$ . L'ampiezza dei segnali è la stessa, si sono solo usate scale diverse per comodità grafica.

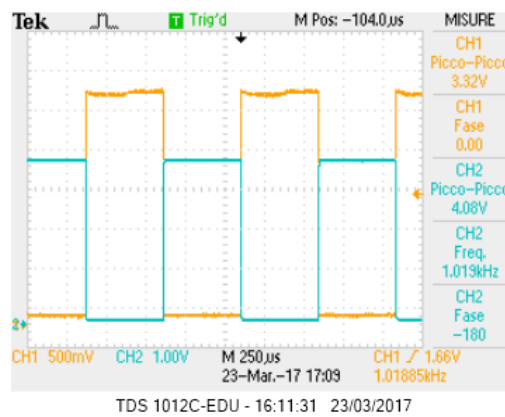


Figura 8: Segnale in ingresso(CH1) e segnale in uscita alla porta NOT (CH2)

tramite oscilloscopio. Le incertezze sui potenziali sono la sensibilità del cursore più il 3% di calibrazione, mentre sui tempi il massimo fra la sensibilità del cursore e la semidispersione dei valori plausibili.

## 5.2 Misura dei tempi di propagazione

Abbiamo eseguito una misura dei due tempi di propagazione, misurando il tempo fra i segnali in ingresso e in uscita in corrispondenza dei due punti a metà altezza della rampa in salita ( $t_{PLH}$ ) e discesa ( $t_{PHL}$ ) rispettivamente. In figura 9 e 10 si possono osservare il tempo di propagazione  $t_{PHL}$  e  $t_{PLH}$  rispettivamente.

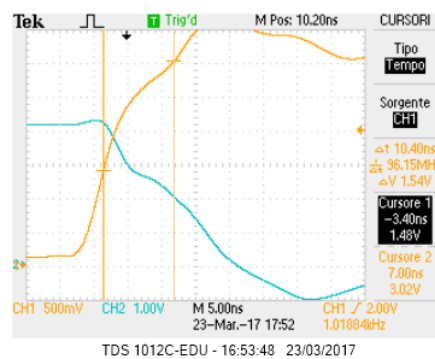


Figura 9: Tempo di propagazione  $t_{PHL}$ .

La misura di tempo è stata eseguita tramite oscilloscopio. L'incertezza sui tempi è dovuta sia alla sensibilità dei cursori, sia all'incertezza sul trovare i punti con il giusto potenziale. Per stimarla si è presa la semidispersione

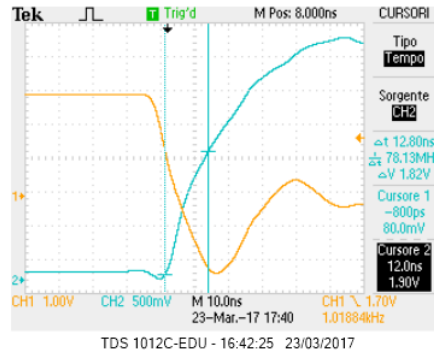


Figura 10: Tempo di propagazione  $t_{PLH}$ .

sui valori misurati nei punti con potenziale compatibile con la metà entro la sensibilità del cursore dei potenziali<sup>6</sup>. I valori riportati nel datasheet sono  $t_{PHL_{att}} = 10\text{ns}$  e  $t_{PLH_{att}} = 9\text{ns}$ <sup>7</sup>. I valori misurati sono  $t_{PHL} = 10.2 \pm 0.2\text{ns}$  e  $t_{PLH} = 12.8 \pm 0.4\text{ns}$ , pertanto sono in buon accordo con quanto riportato dal costruttore.

### 5.3 Misura del tempo di salita

Abbiamo misurato i tempi di salita  $t_s$  e discesa  $t_d$  del segnale in uscita e in ingresso, ossia il tempo necessario per passare dal 10% della  $v_{pp}$  massima<sup>8</sup> al 90% (il contrario per il tempo di discesa). In figura 11 abbiamo riportato il tempo di salita del segnale in ingresso per mostrare la procedura di misura utilizzata.

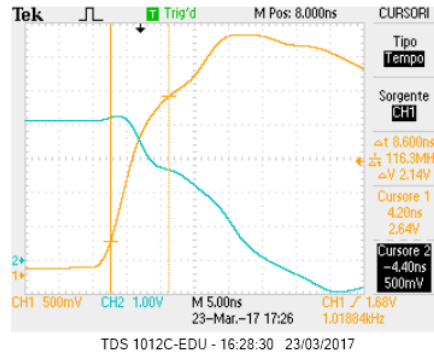


Figura 11: Tempo di salita del segnale in ingresso.

In tabella 3 sono riportati le misure:

Segnale	$t_s$ (ns)	$t_d$ (ns)
Ingresso	$8.6 \pm 0.2$	$6.0 \pm 0.2$
Uscita	$36.2 \pm 0.2$	$20.4 \pm 0.4$

Tabella 3: Tempi di salita e discesa all'ingresso e all'uscita della porta NOT.

## 6 Conclusioni

L'integrato si comporta come porta NOT entro i potenziali indicati dal costruttore. La stima delle correnti di soglia in uscita  $I_{OL}$ ,  $I_{OH}$  ha riportato alcune difficoltà, e i valori non sono in completo accordo con quanto riportato sul datasheet. Il comportamento dinamico del circuito presenta ritardi nella propagazione del segnale in uscita.

<sup>6</sup>L'oscilloscopio utilizzato consentiva di visualizzare contemporaneamente entrambe le coordinate del punto in cui si prendeva la misura.

<sup>7</sup>Valori tipici con resistenza di carico  $R_L = 2\text{k}\Omega$ .

<sup>8</sup>Ai fini dei calcoli si considera  $v_{pp}$  senza overshoot.