



RELAZIONE LABORATORIO DI ELETTRONICA

STUDENTE:

Flavio Della Calce 0612401796

INDICE RELAZIONE

- 1.** Misurazione della Caratteristica I-V dei diodi (1N4007, 1N4148, SB340).
- 2.** Estrazione dei parametri caratteristici dei diodi.
- 3.** Caratteristica del diodo Zener.
- 4.** Analisi del comportamento dinamico dei diodi.
- 5.** Caratterizzazione del BJT BD437.
- 6.** Regolatori di tensione.
- 7.** Introduzione all'elettronica digitale
- 8.** XOR con gli integrati SN7400, SN74LS00N, SN74HC00.
- 9.** Ring Oscillator.
- 10.** Caratterizzazione di una porta logica con un generatore di funzione.

1. Misurazione della Caratteristica I-V dei diodi (1N4007, 1N4148, SB340)

I diodi caratterizzati nel corso di Laboratorio di elettronica sono stati i diodi 1N4007, 1N4148 e SB340 di questi diodi è stata misurata la caratteristica corrente-tensione collegando il diodo in serie ad un generatore di tensione controllato in corrente in modo tale che nella maglia di misura non si avesse una corrente maggiore della corrente I_f specificata nel datasheet così da evitare di danneggiare i diodi.

1N4007



1N4148



SB340



STRUMENTI NECESSARI PER L'ESPERIMENTO:

- Diodo (1N4007, 1N4148, SB340)
- Alimentatore (Keysight E631A)
- Amperometro (Keithley 2110, Keithley 2400)
- Breadboard
- Cavi

Agilent E3631A
Triple-Power supply



Programmable DC Power Supply Specifications

Model Number	1	2	3
DC output	0 to -8 V, 0 to 8 V	0 to -25 V, 0 to 25 V	0 to -25 V, 0 to 1 A
Rating (0 to 40 °C)			
Line regulation	$\pm 0.005\%$	$\pm 0.005\%$	$\pm 0.005\%$
$\pm (\% \text{ of output} + \text{offset})$			
Line regulation	$\pm 0.005\%$	$\pm 0.005\%$	$\pm 0.005\%$
Ripple and noise (20 Hz to 20 MHz)			
Normal mode voltage			$< 350 \mu\text{Vrms}/2 \text{ mVpp}$
Normal mode current	$< 2 \mu\text{Arms}$	$< 500 \mu\text{Arms}$	
Accuracy ¹² (2000 h) ($25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, $\pm (\% \text{ of output} + \text{offset})$)			
Programming			
Voltage	$0.1\% - 5 \text{ mV}$	$0.05\% - 20 \text{ mV}$	
Current	$0.2\% - 10 \text{ mA}$	$0.15\% - 4 \text{ mA}$	
Readback ¹			
Voltage	$0.1\% - 5 \text{ mV}$	$0.05\% - 10 \text{ mV}$	
Current	$0.2\% - 10 \text{ mA}$	$0.15\% - 4 \text{ mA}$	

Strumenti di misura 4
Keithley 2400
Source-Measurement Unit
(SMU)



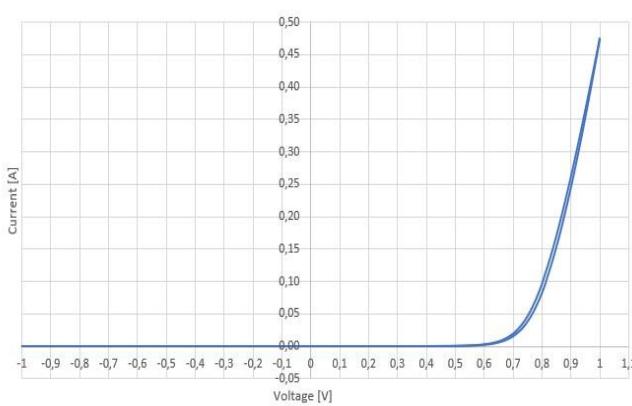
Current Accuracy (Local or Remote Sense)					
Model	Range	Programming Resolution	Measurement Resolution	Measurement Range	Source/Sink Limit
Keithley 2400-C	200.000 A	100 pA	$0.0001 \pm 0.005\%$	200.000 A	200.000 A
	2000.000 A	1 nA	$0.001 \pm 0.005\%$	2000.000 A	2000.000 A
	200.000 mA	100 pA	$0.0001 \pm 0.005\%$	200.000 mA	200.000 mA
	2000.000 mA	1 nA	$0.001 \pm 0.005\%$	2000.000 mA	2000.000 mA
	200.000 μA	100 pA	$0.0001 \pm 0.005\%$	200.000 μA	200.000 μA
	2000.000 μA	1 nA	$0.001 \pm 0.005\%$	2000.000 μA	2000.000 μA

Voltage Accuracy (Local or Remote Sense)					
Model	Range	Programming Resolution	Measurement Resolution	Measurement Range	Source/Sink Limit
Keithley 2400-C	200.000 V	100 pV	$0.0001 \pm 0.005\%$	200.000 V	200.000 V
	2000.000 V	1 nV	$0.001 \pm 0.005\%$	2000.000 V	2000.000 V
	200.000 mV	100 pV	$0.0001 \pm 0.005\%$	200.000 mV	200.000 mV
	2000.000 mV	1 nV	$0.001 \pm 0.005\%$	2000.000 mV	2000.000 mV

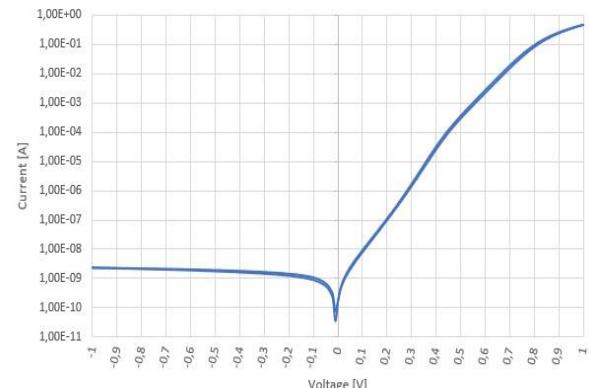
Nelle misurazioni effettuate dal Prof. Neitzert sono stati utilizzati i seguenti strumenti di misura:
Keysight E631A e Keithley 2400.

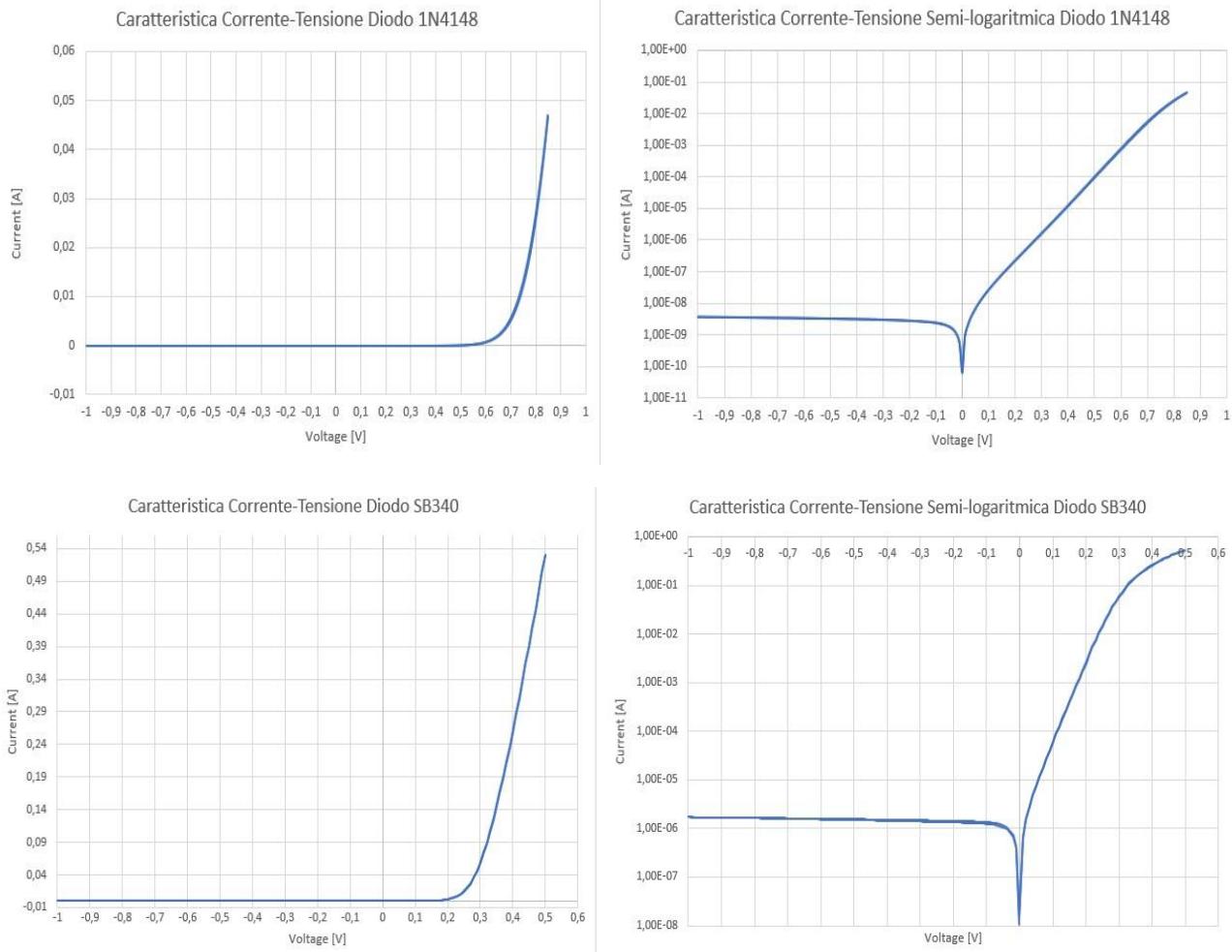
Le misure sono state effettuate fornendo ai diodi una tensione sempre crescente, i risultati come previsto dalla teoria, danno una caratteristica I-V esponenziale, ho usato Excel e le misure fornite dal prof. per graficare i risultati:

Caratteristica Corrente-Tensione Diodo 1N4007

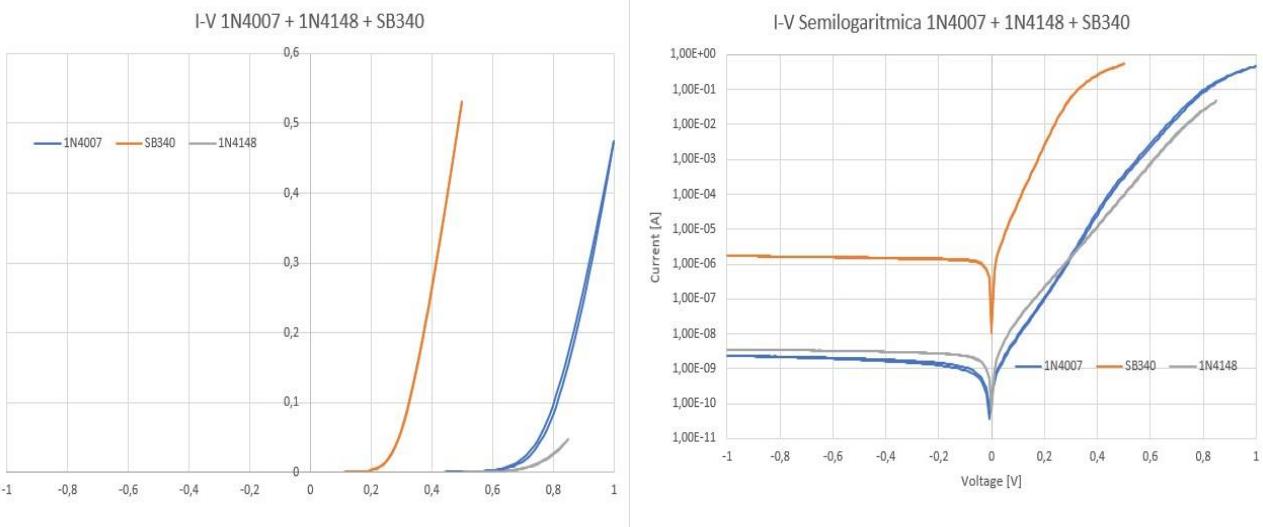


Caratteristica Semi-logaritmica I-V Diodo 1N4007





Il diodo 1N4007 è un diodo rettificatore molto utilizzato in elettronica per applicazioni generalpurpose a bassa potenza mentre il diodo 1N4148 è molto utilizzato per circuiti logici poichè è un diodo high-speed switching invece il diodo Schottky SB340 è usato come Inverters free Wheeling e come polarity protection in circuiti a bassa potenza. Si può notare come l'SB340 (diodo Schottky) ha una corrente in inversa più alta degli altri e una tensione d'accensione minore come dimostrato dalla teoria. Dai seguenti grafici è possibile estrarre dei parametri fondamentali con cui caratterizzare i seguenti diodi come: **Corrente di saturazione**, **Fattore d'idealità η** e **Resistenza serie**.



Unendo i grafici dei tre diodi misurati (1N4007, 1N4148, SB340) possiamo procedere ad un confronto diretto delle caratteristiche principali:

Il diodo 1N4007 è fisicamente più grande ed è progettato per avere una tensione di accensione maggiore (0.7V) rispetto all'1N4148 (0.6V), per questo motivo è conveniente limitare la corrente a 100mA per il diodo 1N4148 e a 1A per quello 1N4007. Invece il diodo SB340 (Schottky) è tecnologicamente diverso, infatti presenta una giunzione metallo-semiconduttore rispetto alla giunzione PN dei diodi precedentemente citati. Questo comporta che il diodo SB340 ha una tensione di accensione più bassa (0.3V) e presenta una corrente in inversa maggiore rispetto agli altri diodi. La corrente in un diodo Schottky è dovuta ai soli portatori maggioritari: in genere il semiconduttore della giunzione metallo-semiconduttore è di tipo N (perché la mobilità degli elettroni è maggiore rispetto a quella delle lacune) e applicando una tensione positiva al diodo, i portatori maggioritari nella regione N vengono iniettati nel metallo diventando così elettroni liberi di muoversi, eliminando il fenomeno della ricombinazione. Dal grafico semilogaritmico si è potuto osservare che in zona lineare sia il diodo 1N4007 che quello SB340 hanno una pendenza maggiore rispetto al diodo 1N4148, questo perché le loro resistenze differenziali sono entrambe più piccole di quella di quest'ultimo.

2. ESTRAZIONE DEI PARAMETRI CARATTERISTICI DEI DIODI

• CALCOLO DELLA CORRENTE DI SATURAZIONE:

La corrente di saturazione è dovuta alla diffusione dei portatori minoritari dalla regione quasi neutra alla regione di carica spaziale. Essa è idealmente nulla e vorremmo sia la più piccola possibile. Per la Corrente di saturazione basta guardare la caratteristica semi-logaritmica dei diodi in inversa e scegliere un valore che l'approssima:

DIODO 1N4007 : $I_s \approx 2\text{nA}$

DIODO 1N4148 : $I_s \approx 3.3\text{nA}$

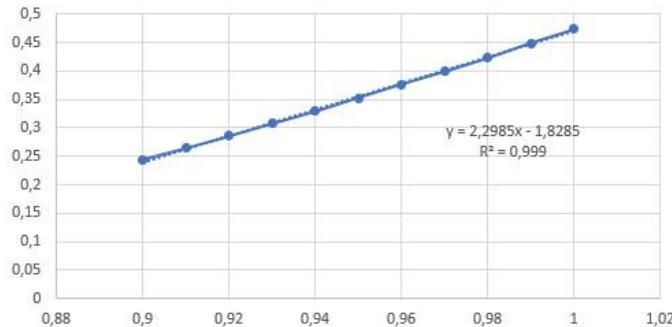
DIODO SB340 : $I_s \approx 1.6\mu\text{A}$

• CALCOLO RESISTENZA SERIE:

$$\text{La resistenza serie si può calcolare tramite la formula: } R_d = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{1}{\frac{\Delta I}{\Delta V}} = \frac{1}{I_s(e^{\frac{V}{V_T}} - 1) \frac{1}{V_T}} = \frac{V_T}{I}$$

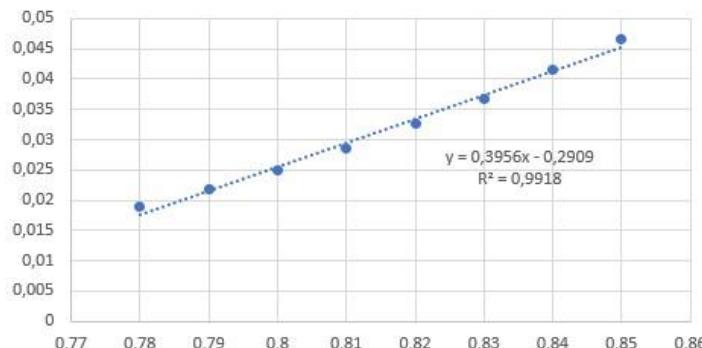
Questo valore esprime quanto veloce varia la corrente per piccole variazioni della tensione applicata, e possiamo calcolarlo utilizzando la formula della retta passante per due punti (i_d, v_d) per calcolare il coefficiente angolare per poi ricavare la resistenza serie, ma questo si può fare anche con Excel infatti per estrarre la resistenza serie ho utilizzato la funzione regressione lineare di Excel sul grafico della caratteristica I-V dei diodi dove la caratteristica è approssimabile ad una retta:

Resistenza serie diodo 1N4007



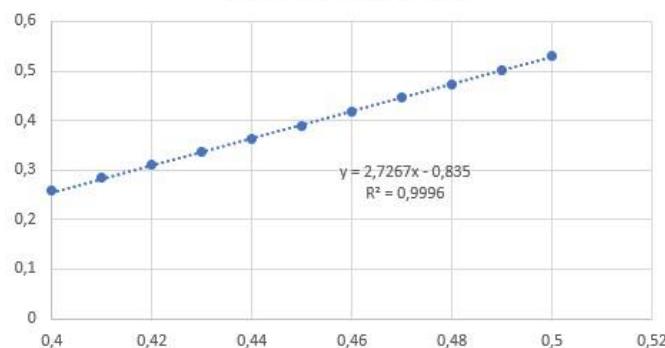
Nel caso del diodo 1N4007 la resistenza serie (o differenziale) è: **R_d: 0,435Ω**

Resistenza serie 1N4148



Nel caso del diodo 1N4148 la resistenza serie (o differenziale) è: **R_d: 2,528Ω**

Resistenza serie SB340



Nel caso del diodo SB340 la resistenza serie (o differenziale) è: **R_d: 0,367Ω**

- **CALCOLO DEL FATTORE D'IDEALITÀ:**

Il **fattore di idealità** tiene conto delle correnti di generazione e ricombinazione le quali amplificano la corrente che effettivamente fluisce nel diodo. Il valore di η è idealmente uguale a 1 e indica la prevalenza delle correnti di diffusione rispetto a quelle di ricombinazione, bilanciamento che cambia all'aumentare del fattore.

Equazione del diodo: $i_D = I_s(e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} - 1)$

Essendo il diodo acceso possiamo trascurare il “-1” rispetto all'esponenziale.

$$\ln i_D = \ln I_s + \ln e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} \Rightarrow \ln \frac{i_D}{I_s} = \frac{V_D}{\eta V_T} \Rightarrow \eta = \frac{\Delta V_D}{V_T \ln \frac{i_D}{I_s}}$$

Dove $\frac{1}{\eta V_T}$ è il **coefficiente angolare della caratteristica** ($\log i_D; V_D$)

$$m = \frac{1}{\eta V_T}$$

Calcoliamo il coefficiente angolare di un tratto della caratteristica del diodo 1N4007, che approssimiamo lineare, del grafico su carta semilogaritmica:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \rightarrow m = \frac{\ln(1.64 \cdot 10^{-7}) - \ln(1.26 \cdot 10^{-7})}{0.22 - 0.21} = 26.358$$

Quindi il fattore d'idealità per quel tratto è $\eta = 1.51$

Calcoliamo il coefficiente angolare di un tratto della caratteristica del diodo 1N4148, che approssimiamo lineare, del grafico su carta semilogaritmica:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \rightarrow m = \frac{\ln(8.56 \cdot 10^{-7}) - \ln(7.02 \cdot 10^{-7})}{0.27 - 0.26} = 19.833$$

Quindi il fattore d'idealità per quel tratto è $\eta = 2.02$

Calcoliamo il coefficiente angolare di un tratto della caratteristica del diodo SB340, che approssimiamo lineare, del grafico su carta semilogaritmica:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \rightarrow m = \frac{\ln(8.29 \cdot 10^{-5}) - \ln(5.63 \cdot 10^{-5})}{0.11 - 0.1} = 38.69$$

Quindi il fattore d'idealità per quel tratto è $\eta = 1.03$

Tabella di ricapitolazione caratteristiche fondamentali dei diodi:

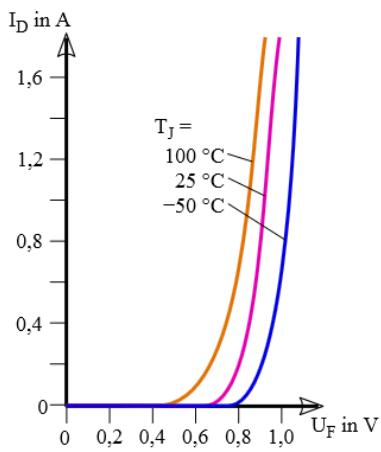
Parametri Diodi	1N4007		SB340	1N4148
Von (V)	0.57		0.2	0.63
Is (A)	$2 \cdot 10^{-9}$		$1,6 \cdot 10^{-6}$	$3.3 \cdot 10^{-9}$
Rd (Ω)	0,435		0,367	2,528
η	(0,1-0,4)V	(0,5-0,8)V	1,03	2,02
	1,51	2,01		

3. CARATTERISTICA DEL DIODO ZENER MISURATA IN AULA:



Il diodo Zener studiato in questa caratteristica è il diodo BZX55C 5V1, per evitare che il diodo si bruciasse in fase di caratterizzazione è stato messo un resistore da 100 Ohm in serie per evitare che per l'effetto di breakdown a valanga la corrente potesse aumentare in maniera esponenziale, anche perché è stato caratterizzato con un alimentatore USB non ideale perché la variazione minima della tensione è dell'ordine dei 100mV e quindi poco utile e impreciso per questa caratterizzazione. Il diodo BZX55C 5V1 presenta una $V_Z=5V$ e una $V_{ON}=0,7V$ è può dissipare 0.5W di potenza, quindi la I_z non deve superare i 100mA. Anche se non si può osservare in questo grafico ma il diodo ha una R_Z alta questo si può vedere in un prossimo paragrafo di questo capitolo quando lo utilizzeremo come regolatore di tensione in cui la tensione aumenta (anche se di poco) dalla V_Z .

• Dipendenza della temperatura



Come sappiamo dalla teoria, la corrente nel diodo dipende dalla temperatura.

$$i_D = I_s(e^{\eta V_T} - 1)$$

$$I_S = eA \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D}} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n} \frac{n_i^2}{N_A}} \right),$$

$$\mathcal{D}_m = \frac{kT}{6\pi r\mu}$$

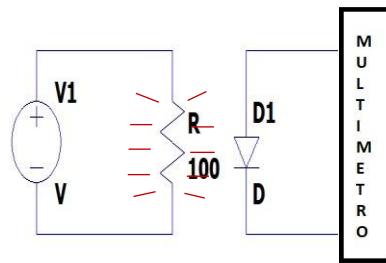
$$V_{TH} = \frac{K \cdot T}{q}$$

Ci proponiamo di calcolare il coefficiente di temperatura di un diodo BZX55C 5V1 tramite la formula:
 $V_{ON1} = V_{ON0} - T_k * (T_1 - T_0)$

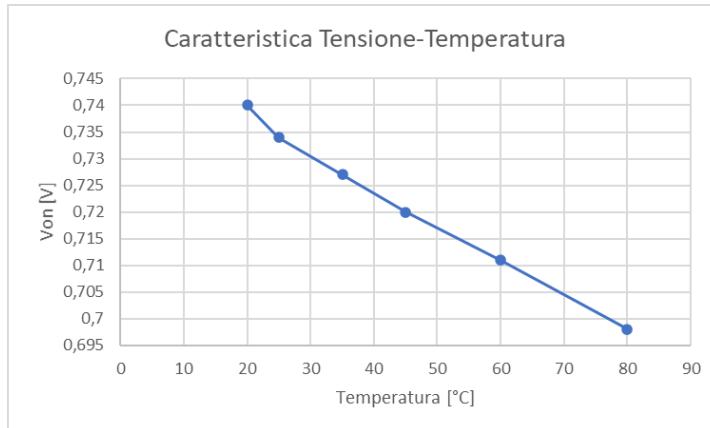
Dove V_{ON1} e V_{ON0} sono le tensioni di accensione del diodo alle temperature T_1 e T_0 . T_k è il **coefficiente di temperatura**.

Procediamo prima alla misurazione del coefficiente T_k :

R=100Ω, BZX55C 5V1, Termocoppia per Multimetri, Multimetro, Alimentatore USB 0-24V.



Per ottenere T_k ho creato un semplicissimo circuito costituito da un alimentatore variabile e da una resistenza $R=100\Omega$ aumentando la tensione, per effetto joule la resistenza si scalderà e ho sfruttato questo principio per far variare la temperatura del diodo Zener, misurando prima con una termocoppia la temperatura della resistenza con un multimetro così da avere una variazione della V_{ON} calcolata con la funzione diode-test di un multimetro.



Temperatura [°C]	V_{ON} [V]
20	0,74
25	0,734
35	0,727
45	0,72
60	0,711
80	0,698

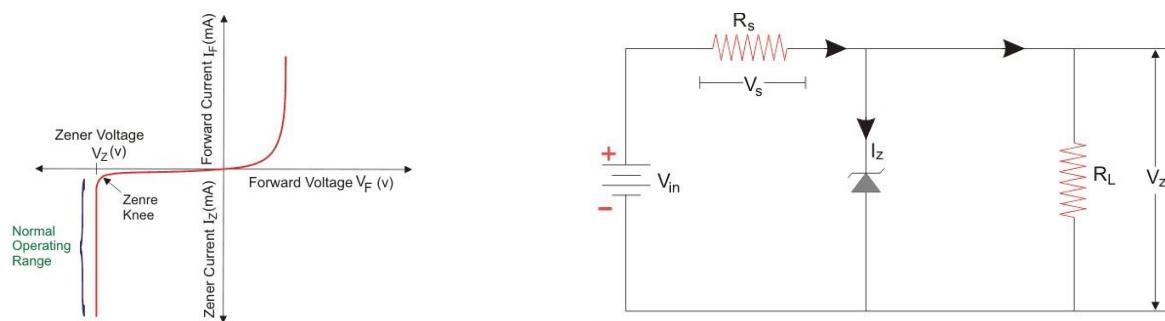
- La prima misura è stata fatta senza la resistenza cioè a temperatura ambiente sul diodo con la funzione Diodetest:

$$T_k = \frac{0,74[V] - 0,698[V]}{60[{}^{\circ}\text{C}]} = 0,7 \frac{[\text{mV}]}{{}^{\circ}\text{C}}$$

Quindi questo ci fa capire che un diodo può essere utilizzato anche come **sensore di temperatura**, poiché al variare della temperatura varia la sua V_{ON} , infatti la termocoppia utilizzata per calcolare la temperatura della resistenza è anch'essa formata da una giunzione e sfrutta l'effetto Seebeck. L'**effetto Seebeck** è un effetto termoelettrico per cui, in un circuito costituito da conduttori metallici o semiconduttori, una differenza di temperatura genera elettricità. Ciò è dovuto al fatto che i due metalli con diversa elettronegatività generano potenziali elettrici differenti nelle due regioni a differente temperatura dando origine a un flusso di corrente. Il valore della differenza di potenziale generata per effetto Seebeck è dell'ordine di alcuni μV per kelvin di differenza.

• DIODO ZENER COME REGOLATORE DI TENSIONE:

Prima dell'avvento dei regolatori di tensione integrati, tipo 780x, quando si voleva stabilizzare una tensione in un circuito elettrico o in parte di esso si utilizzava esclusivamente dei diodi Zener. Il diodo ad effetto Zener è un diodo che nel verso di conduzione è un diodo rettificatore classico, mentre nel verso inverso inizia a condurre quando la tensione applicata supera un livello di soglia caratteristico del diodo chiamata **tensione di breakdown** o **tensione Zener (V_z)** superata questa soglia il diodo ha la proprietà di mantenere la tensione costante fino a che non si raggiunge la tensione di rottura del componente. I diodi Zener sono prodotti con V_z diverse (1,2V200V) e con potenze diverse, questi sono i parametri caratteristici principali per scegliere quale dispositivo è ottimo per il nostro circuito. Il diodo Zener per effettuare la regolazione di tensione necessita di una resistenza di carico che stabilisca una determinata corrente attraverso esso. Per costruire il circuito dobbiamo prima conoscere la corrente I_z diodo (riportata nel datasheet), anche la corrente I_L assorbita dal carico. L'utilizzo del diodo Zener come regolatore di tensione è "ottimo" solo per bassi assorbimenti; quindi, per carichi che non necessitano correnti molto alte.



Qui il diodo Zener è collegato attraverso il carico R_L . Vogliamo che la tensione attraverso il carico sia regolata e non superi il valore di V_z . A seconda delle nostre esigenze, sceglieremo il diodo Zener adatto con una tensione di rottura Zener vicina alla tensione richiesta attraverso il carico. Colleghiamo il diodo Zener in condizioni di polarizzazione inversa. Quando la tensione attraverso il diodo supera la tensione di rottura Zener, una quantità significativa di corrente inizia a scorrere attraverso il diodo. Poiché il carico è parallelo al diodo, anche la caduta di tensione attraverso il carico è uguale alla tensione di rottura Zener. Il diodo Zener fornisce un percorso per il flusso di corrente e quindi il carico viene protetto da correnti eccessive. **Quindi il diodo Zener ha due scopi qui: Diodo Zener come regolatore di tensione così come protegge il carico da una corrente eccessiva.**

• STRUMENTI UTILIZZATI:

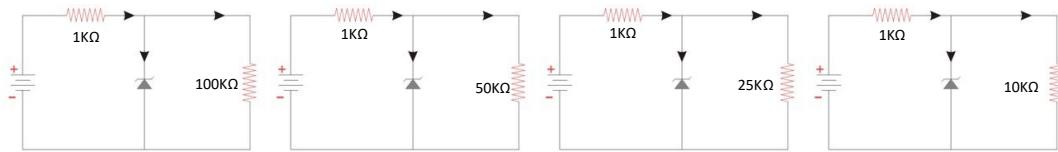
Multimetro

Alimentatore USB 0-25V

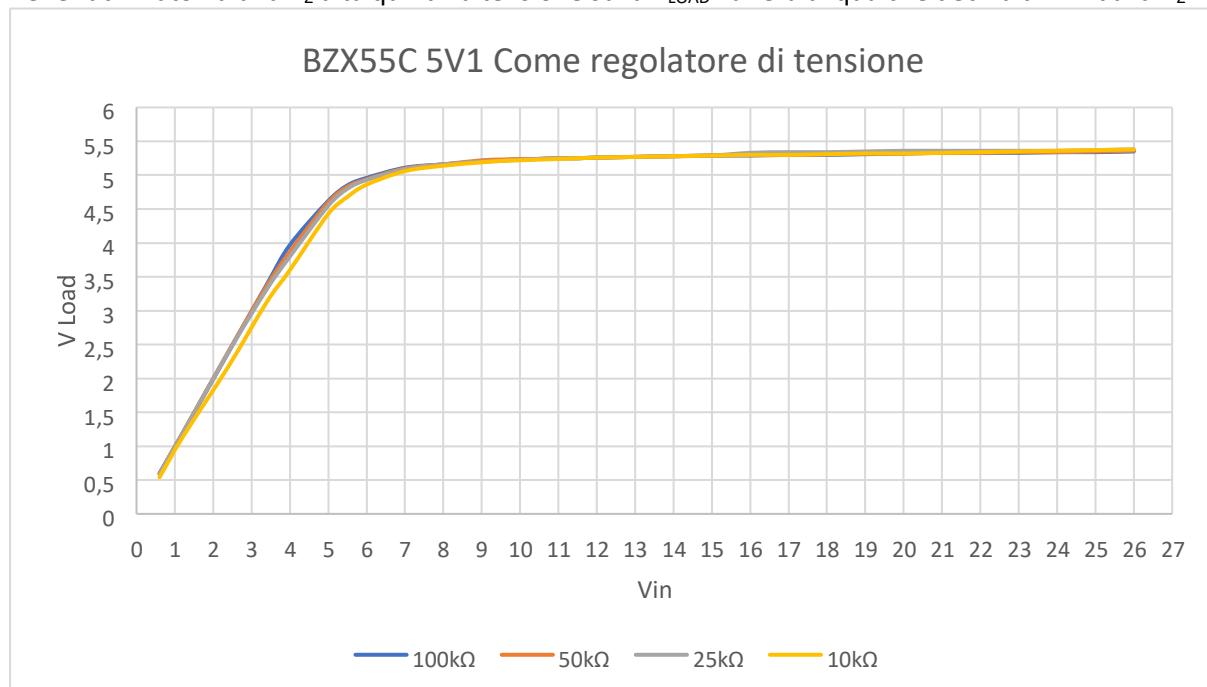
Resistori da $1\text{k}\Omega$, $10\text{k}\Omega$, $25\text{k}\Omega$, $50\text{k}\Omega$, $100\text{k}\Omega$



SCHEMA DEI CIRCUITI CARATTERIZZATI:



Per caratterizzare il diodo BZX55C 5V1 come regolatore di tensione ho studiato per 4 circuiti la caratteristica $V_{IN} - V_{LOAD}$ cambiando per ogni circuito la R_{LOAD} come già detto in precedenza il diodo Zener utilizzato ha una R_Z alta quindi la tensione sulla R_{LOAD} varierà di qualche decina di mV dalla V_Z

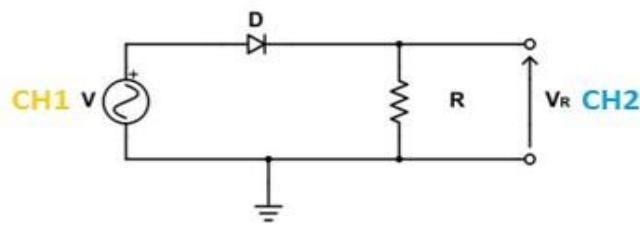


Come si evince dal grafico al variare della R_{LOAD} scelte le caratteristiche $V_{IN}-V_{LOAD}$ si differenziano solo di pochi mV, invece il diodo Zener utilizzato non è ideale per essere utilizzato come regolatore di tensione poiché la tensione V_{LOAD} cresce in maniera lineare (anche se con minima pendenza). Se si vuole replicare l'esperimento si consiglia di utilizzare una resistenza da $1\text{k}\Omega$ di potenza se si vuole usare tensioni maggiori di 26V poiché è l'unica parte del circuito sotto stress dato che la corrente nel diodo per $V_{IN}=26\text{V}$ non ha mai superato i 23mA.

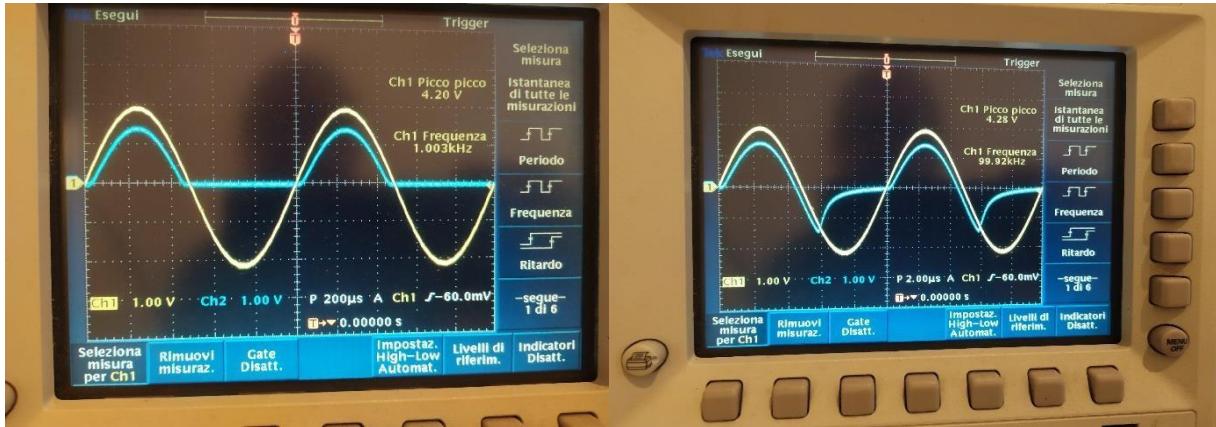
4. Analisi del comportamento dinamico di alcuni diodi.

La teoria sui diodi rende nota la presenza di alcuni fenomeni capacitivi, oggetto dell'esperienza di laboratorio di seguito descritta. Per questa esperienza vengono utilizzati il generatore di funzioni e l'oscilloscopio. L'analisi viene svolta realizzando un circuito schematizzato in Figura; il circuito è il più semplice (seppur poco efficace) circuito raddrizzatore e prende il nome di raddrizzatore a singola semionda. Il generatore tensione V in figura rappresenta il generatore di funzioni che risulta connesso in serie al diodo in analisi e ad un resistore di $10\text{k}\Omega$. In realtà, durante l'esperienza, all'uscita fisica del generatore di funzioni viene applicato un connettore a T in modo da poter collegare il singolo canale utilizzato del generatore di funzioni sia al circuito, sia al Canale 1 dell'oscilloscopio. Il Canale 2 dell'oscilloscopio viene, invece, utilizzato per visualizzare la forma d'onda corrispondente alla tensione

V_R che cade ai capi del resistore. La prima analisi viene svolta applicando un segnale di tipo sinusoidale al circuito tramite il generatore di funzioni; I diodi sotto esame sono l'1N4007, 1N4148 e SB340. Se il diodo fosse ideale, allora la tensione V_R sarebbe quella del carico di un raddrizzatore a singola semionda ideale (una sinusoide privata della semionda negativa), indipendentemente dalla frequenza del segnale di ingresso. Ciò nella realtà, ovviamente, non accade e, per frequenze maggiori di una certa frequenza di soglia, il diodo evidenzia dei comportamenti di tipo capacitivo che ne alterano l'ideale funzione raddrizzante. Di seguito vengono riportate delle fotografie scattate al display dell'oscilloscopio al fine di valutare il comportamento raddrizzante del diodo per diverse frequenze del segnale in ingresso. Il segnale impostato varia tra valori di $\pm 2V$, presenta un Duty Cycle del 50%, un Offset nullo ed una frequenza di volta in volta indicata.



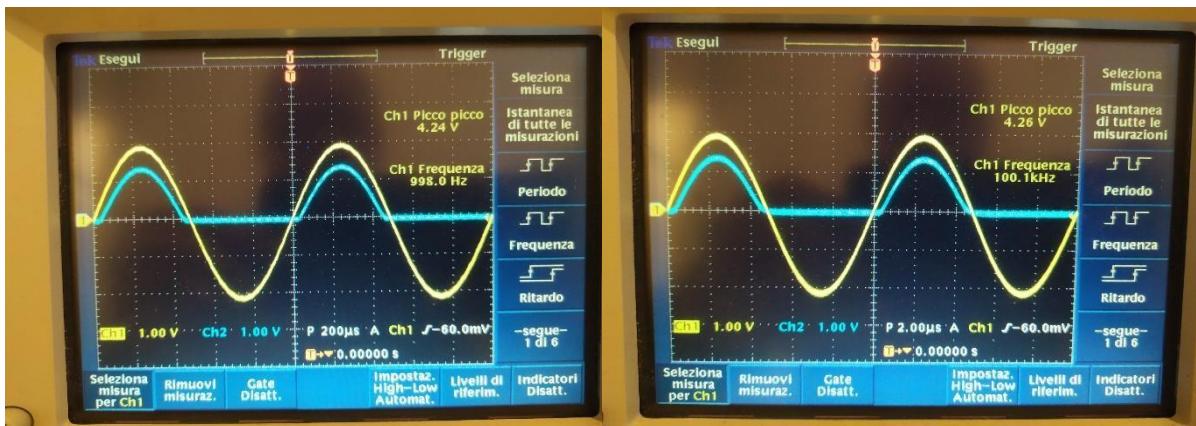
1N4007



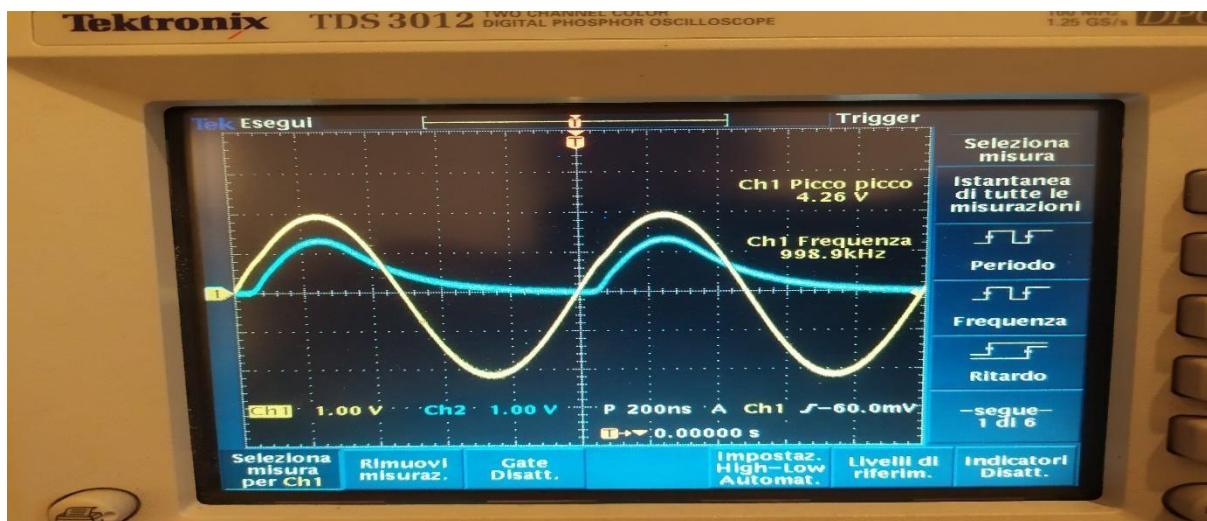
SB340



1N4148



1N4148



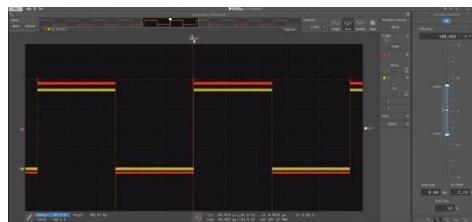
f=1MHz

Dalle prove effettuate con VirtualBench si osserva che il diodo 1N4007 comincia a non raddrizzare efficacemente a partire da frequenze prossime ai 10 kHz ovvero il diodo evidenzia dei comportamenti di tipo capacitivo che ne alterano l'ideale funzione raddrizzante, per poi sfociare nell'andamento descritto nella foto fatta a 100KHz e più si va avanti con la frequenza (ordine dei MHz) più la caratteristica del diodo tende a seguire l'andamento della funzione in ingresso; Stessa cosa per il diodo SB340 L'unica cosa che possiamo notare in più dalla foto è che questo diodo essendo un diodo Schottky ha una tensione di accensione più bassa.

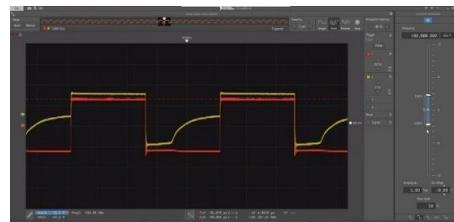
Ciò che succede con il diodo 1N4007 e SB340 non si ha con il diodo 1N4148 infatti possiamo notare che anche andando oltre la frequenza dei 100KHz riesce a mantenere la sua caratteristica raddrizzante questo perché come descritto nel datasheet è un diodo "High Conductance Fast Diode" ossia costruito per lavorare a frequenze maggiori di 100KHz per via delle capacità di giunzione e di diffusione più piccole rispetto l'1N4007 e l'SB340; Caratterizzando questo diodo per frequenze dell'ordine dei Mhz si può iniziare a notare che il diodo sta raggiungendo il suo limite di funzionamento in frequenza.

Si vuole, adesso, stimare il tempo di recupero inverso (reverse recovery time) τ_r del diodo in base all'ampiezza del segnale in ingresso al circuito. Quando un diodo è in regime di conduzione a seguito di una polarizzazione diretta della giunzione, la regione di carica spaziale è continuamente attraversata da portatori che determinano una certa carica Q_j . Quando un diodo, invece, è in regime di interdizione a seguito di una polarizzazione inversa della giunzione, la regione di carica spaziale è (in prima approssimazione) completamente svuotata di portatori, di conseguenza ad essa è associata una carica praticamente nulla. Quando la tensione ai capi di un diodo varia bruscamente portandolo dalla condizione di conduzione a quella di interdizione e/o viceversa, vi è un intervallo temporale in cui la regione di carica spaziale deve essere riempita o svuotata di portatori. Questo processo, che dipende anche dall'inerzia dei portatori stessi, avviene a spese dei centri di generazione e ricombinazione (la cui presenza è dovuta ai difetti presenti nel cristallo) e dà luogo a fenomeni di tipo capacitivo. In generale, il tempo necessario a svuotare la regione è maggiore di quello necessario a riempirla; è questo il motivo per cui i limiti in frequenza del diodo vengono dettati dal tempo che esso impiega nel commutare dalla conduzione all'interdizione (turn off).

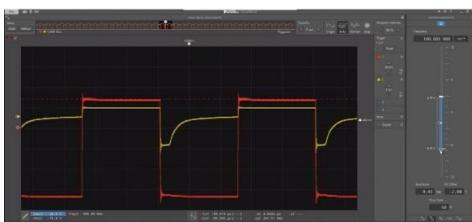
ECCO ALCUNI ESEMPI RICAVATI CON VIRTUALBENCH SUL DIODO 1N4007 CHE SPIEGANO IL FENOMENO CAPACITIVO AL VARIARE DELLA V_{IN} :



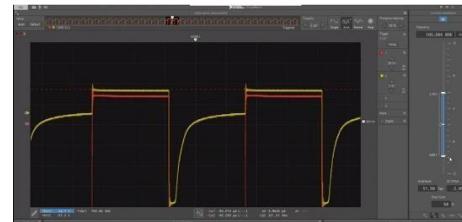
A 100Hz non c'è traccia del fenomeno capacitivo.



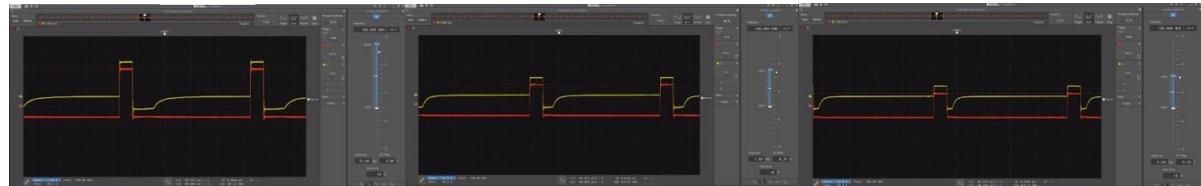
Invece a 100KHz possiamo osservare il fenomeno.



Al variare del rapporto (asimmetrico) dell'onda quadra (in questo caso con l'area negativa maggiore) varia il tempo di storage.

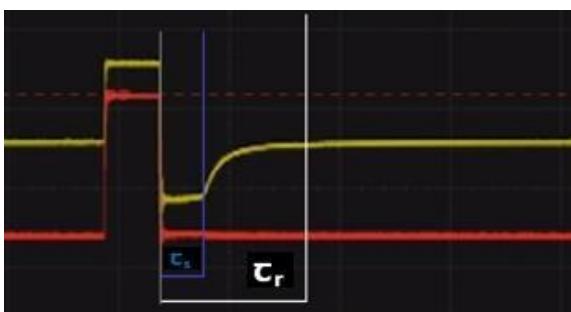


Nel caso in cui l'area positiva è maggiore dell'area negativa abbiamo un aumento del tempo di storage.



Nel caso in cui il Duty Cycle 10% con caratteristica d'ingresso asimmetrica.

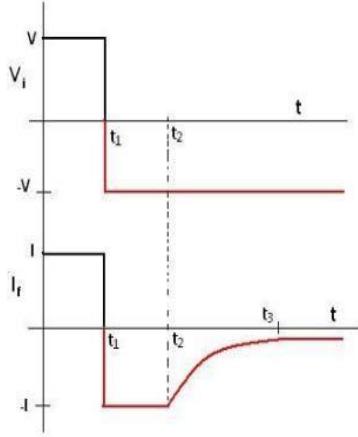
Tempo di storage e tempo di recovery per il diodo 1N4007.



Quando un diodo è in regime di conduzione a seguito di una polarizzazione diretta della giunzione, la regione di carica spaziale è continuamente attraversata da portatori che determinano una certa carica Q_j . Quando un diodo, invece, è in regime di interdizione a seguito di una polarizzazione inversa della giunzione, la regione di carica spaziale è (in prima approssimazione) completamente svuotata di portatori, di conseguenza ad essa è associata una carica praticamente nulla. Quando la tensione ai capi di un diodo varia bruscamente portandolo dalla condizione di conduzione a quella di interdizione e/o viceversa, vi è un intervallo temporale in cui la regione di carica spaziale deve essere riempita o svuotata di portatori. Questo processo, che dipende anche dall'inerzia dei portatori stessi, avviene a spese dei centri di generazione-riconversione (la cui presenza è dovuta ai difetti presenti nel cristallo) e dà luogo a fenomeni di tipo capacitivo. In generale, il tempo necessario a svuotare la regione è maggiore

conseguenza ad essa è associata una carica praticamente nulla. Quando la tensione ai capi di un diodo varia bruscamente portandolo dalla condizione di conduzione a quella di interdizione e/o viceversa, vi è un intervallo temporale in cui la regione di carica spaziale deve essere riempita o svuotata di portatori. Questo processo, che dipende anche dall'inerzia dei portatori stessi, avviene a spese dei centri di generazione-riconversione (la cui presenza è dovuta ai difetti presenti nel cristallo) e dà luogo a fenomeni di tipo capacitivo. In generale, il tempo necessario a svuotare la regione è maggiore

di quello necessario a riempirla; è questo il motivo per cui i limiti in frequenza del diodo vengono dettati dal tempo che esso impiega nel commutare dalla conduzione all'interdizione (turn off).



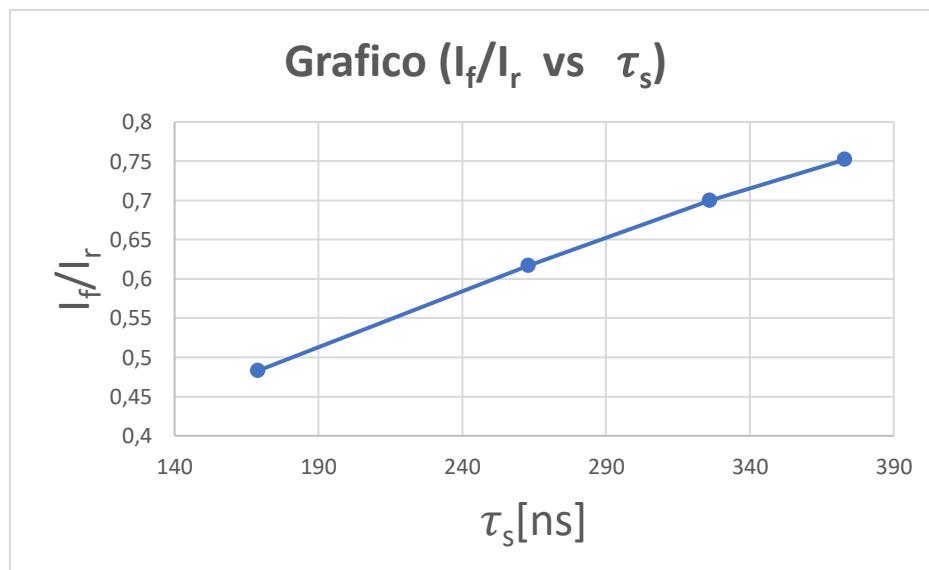
Utilizzando il circuito di Figura per un'analisi di questo transitorio e facendo riferimento alla figura a fianco, si evince che fin quando il diodo è direttamente polarizzato ($t < t_1$), all'interno della resistenza scorre una corrente I_F secondo la formula: $I_F = (V_i - V_y)/R$ dove V_i indica la tensione di ingresso, V_y rappresenta la tensione di accensione del diodo e R è il valore della resistenza. Quando l'ingresso commuta ($t = t_1$) e si porta ad un valore $V_i = -V$, la tensione ai capi del diodo è ancora V_y . Di conseguenza, la corrente che scorre nella maglia si inverte bruscamente e rimane costante per un certo periodo τ_s (time storage) ($t_1 < \tau_s < t_2$) in cui la tensione del diodo rimane V_y e la regione di carica spaziale comincia a svuotarsi. Successivamente vi è un nuovo intervallo di tempo τ_r (time recovery) in cui la tensione ai capi del diodo si porta (secondo una legge esponenziale) al valore della tensione di ingresso e la corrente all'interno del circuito si porta esponenzialmente al valore di corrente di saturazione inversa I_r che il diodo ammette (approssimabile ad un valore nullo). Il tempo di recupero inverso τ_r è dato dalla somma di $t_1 - t_2$ e $t_2 - t_3$.

Nell'esperienza di laboratorio affrontata, il segnale di ingresso che viene applicato al circuito tramite il generatore di funzioni, di VirtualBench, è un'onda quadra la cui ampiezza viene fatta variare ad ogni misurazione. Durante l'esperienza viene misurato l'intervallo di tempo τ_r e τ_s .

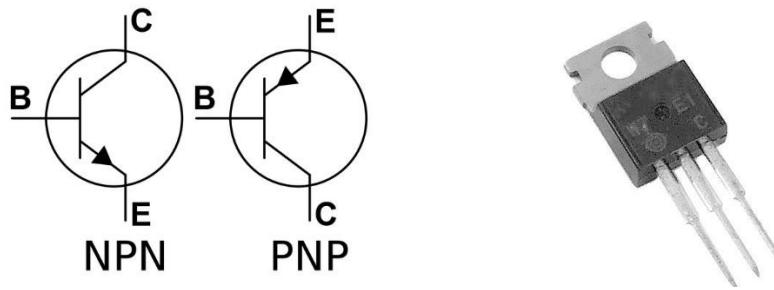
In sintesi, quindi: Se all'istante t_1 , il potenziale V_{IN} passa da +V a -V, il diodo risulta essere polarizzato inversamente e attraversato da una corrente I_r (che risulta essere maggiore di I_F), pertanto per un certo tempo τ_r rimarrà ancora in conduzione finché tutta la carica totale immagazzinata nelle capacità parassite non verrà rimossa portando la corrente del diodo al valore I_r .

I seguenti dati sono stati ricavati tramite Virtual-bench e riguardano il diodo 1N4007 e il suo tempo di storage, di recupero e la corrente in diretta e inversa del diodo. τ_s è l'intervallo in cui la corrente I_r risulta costante.

V_{IN} [Vpp]	I_F [mA]	I_r [mA]	τ_s [ns]	τ_p [us]	I_F/I_r
2	0,87	1,8	169	1,5	0,483
3	1,53	2,48	263	1,9	0,617
4	2,2	3,14	326	2	0,7
5	2,86	3,8	373	2	0,752

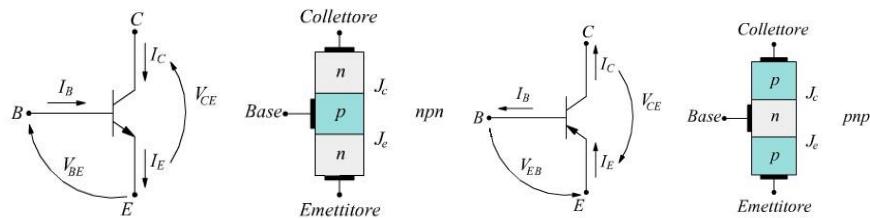


5. CARATTERIZZAZIONE DEL BJT BD437

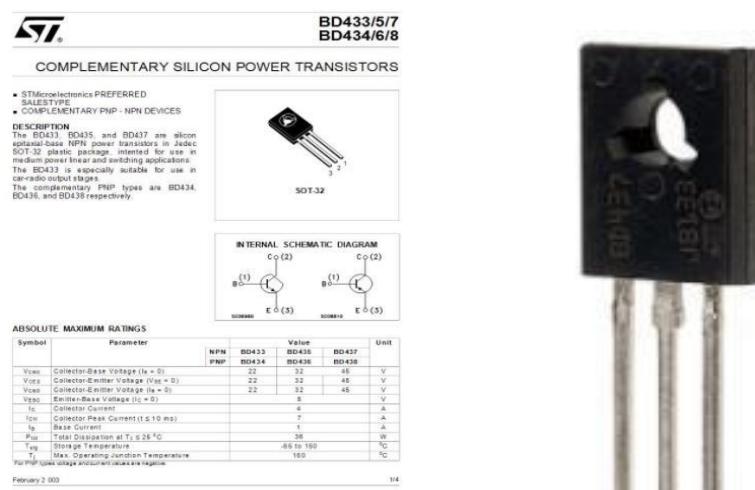


Caratterizzare il BJT significa individuare base, collettore ed emettitore dello stesso e calcolarne la tensione di Breakdown. Per individuare la Base misuriamo, tramite l'opzione Diode-Test del multimetro, la tensione tra 2 terminali. Ripetiamo l'operazione alternando i piedini del BJT finché non troviamo un potenziale positivo, che ci indica la base del dispositivo. Per individuare Emettitore e Collettore, tramite l'opzione diode test, misuriamo la tensione di accensione tra la base e gli altri due terminali. I valori ritrovati sono 0,67 [V] e 0,7 [V]. Sapendo dalla teoria che l'emettitore è il pozetto più drogato, per questo motivo la tensione base-emettitore sarà più alta in generale. Ho così individuato anche il collettore che sarà il terzo terminale rimasto.

La struttura di un transistor bipolare si riconosce perché costituita da tre regioni adiacenti (legate da giunzioni) di materiale semiconduttore drogato alternativamente n e p. In questo disegno sono rappresentate le due tipologie di BJT che si possono ottenere: il modello npn ed il modello pnp dove sono evidenziate le giunzioni di collettore J_c e di emettitore J_e .

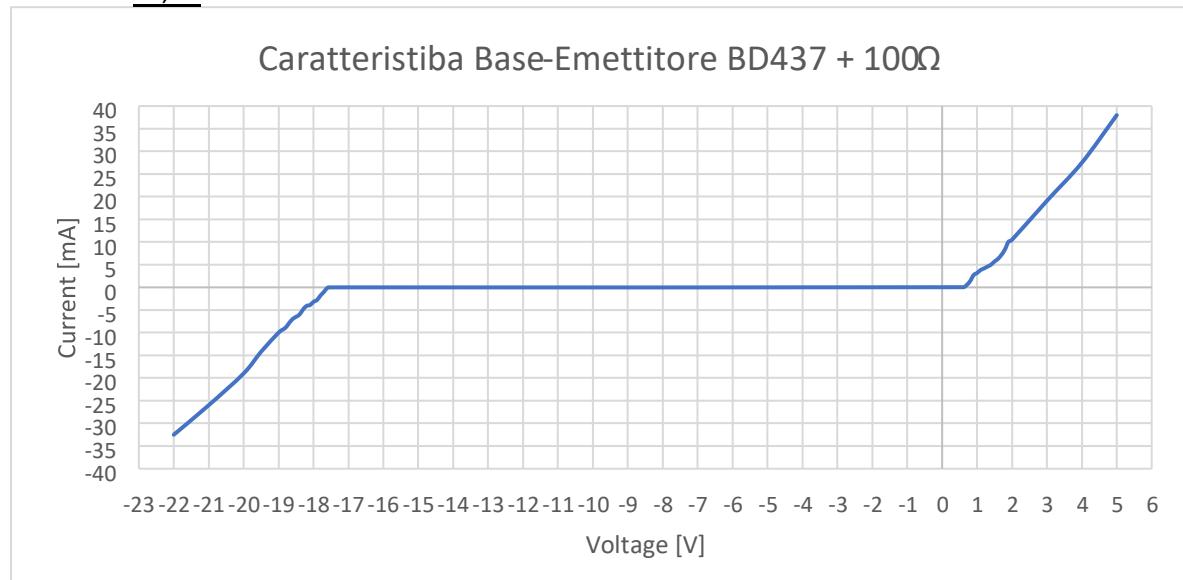


Teoricamente è come avere due diodi contrapposti, uno polarizzato direttamente percorso da una corrente diretta e l'altro polarizzato inversamente percorso da una corrente inversa piccola ma non trascurabile.



E C B

Per la giunzione base-emettitore ho trovato che la $V_{ON}=0.66V$, mentre la tensione di breakdown è intorno ai 17,5V.



- Questa caratteristica è stata determinata con il multmetro Lomvum T28C e un alimentatore USB 0-25V, quindi con strumenti di misura non di precisione.



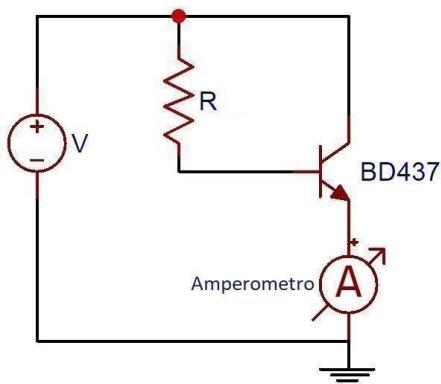
Con gli stessi strumenti di misure ho cercato di misurare il guadagno di corrente β_f del bjt BD437.

- Guadagno di corrente β_f

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad I_C = \beta I_B \quad \beta f = \frac{I_C}{I_B}$$

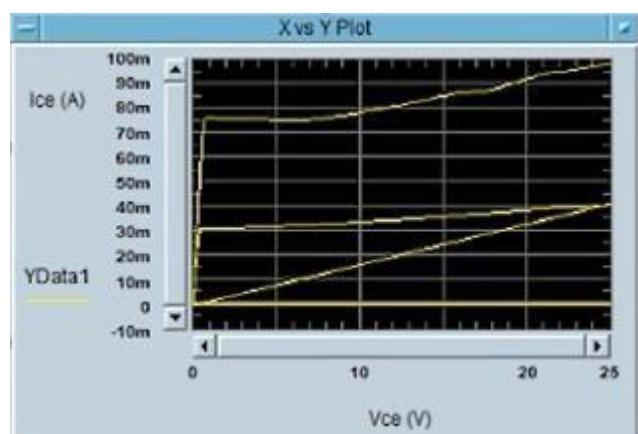
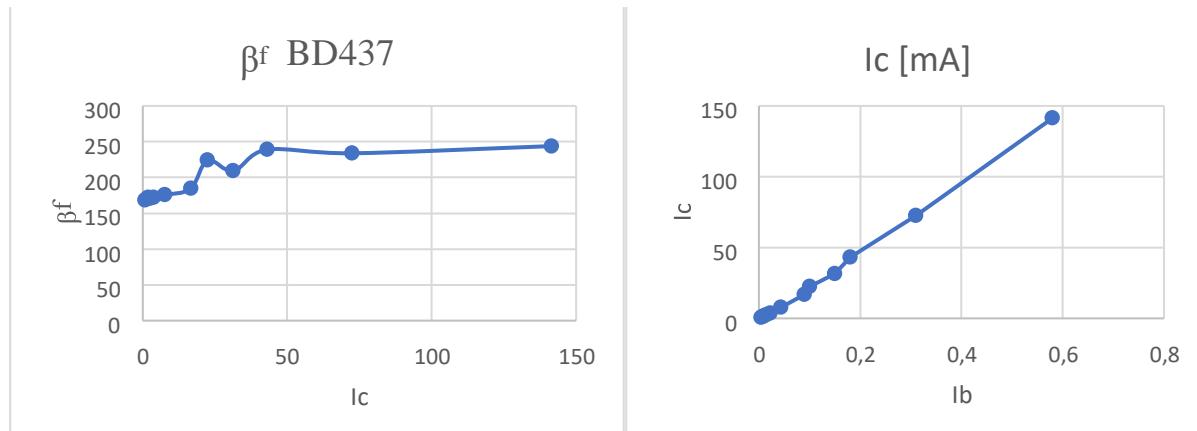
Il rapporto β_f fra la corrente che viene catturata dal collettore e quella che raggiunge la base è uno dei parametri fondamentali di qualunque transistor a giunzione bipolare; generalmente vale da 50 a 800 o più, cioè la corrente al collettore è da 50 a 800 volte più grande di quella alla base. Ho misurato il β_f applicando 5V alla base con una resistenza variabile, mentre ho applicato 5V come tensione V_{CE} e ho misurato mediante un multmetro

configurato come milliamperometro in serie all'emettitore per poter ricavare la I_E e ho ricavato la I_B sapendo che: $I_B = \frac{5V - 0,7V}{R}$.



Resistenza [Ω]	I_E [mA]	I_B [mA]	I_C [mA]	β_f
5k	142	0,58	141,42	243,8276
10k	72,8	0,31	72,49	233,8387
20k	43,2	0,18	43,02	239
30k	31,5	0,15	31,35	209
40k	22,5	0,1	22,4	224
50k	16,7	0,09	16,61	184,5556
100k	7,64	0,04327	7,59673	175,5657
200k	3,8	0,02197	3,77803	171,9631
300k	2,52	0,0147	2,5053	170,4286
400k	1,91	0,01105	1,89895	171,8507
500k	1,52	0,00886	1,51114	170,5576
1M	0,75	0,00443	0,74557	168,3002

Ho calcolato il coefficiente β_f per diversi valori di resistenza e in seguito tramite Excel ho ricavato i seguenti grafici:

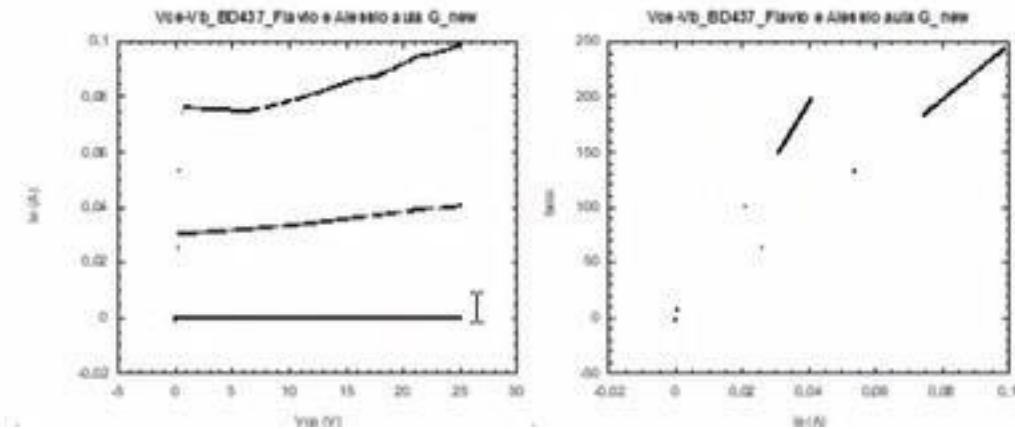


Questo grafico è stato ricavato a lezione dal prof. Utilizzando il programma **Keysight VEE Pro** e i strumenti di misura:

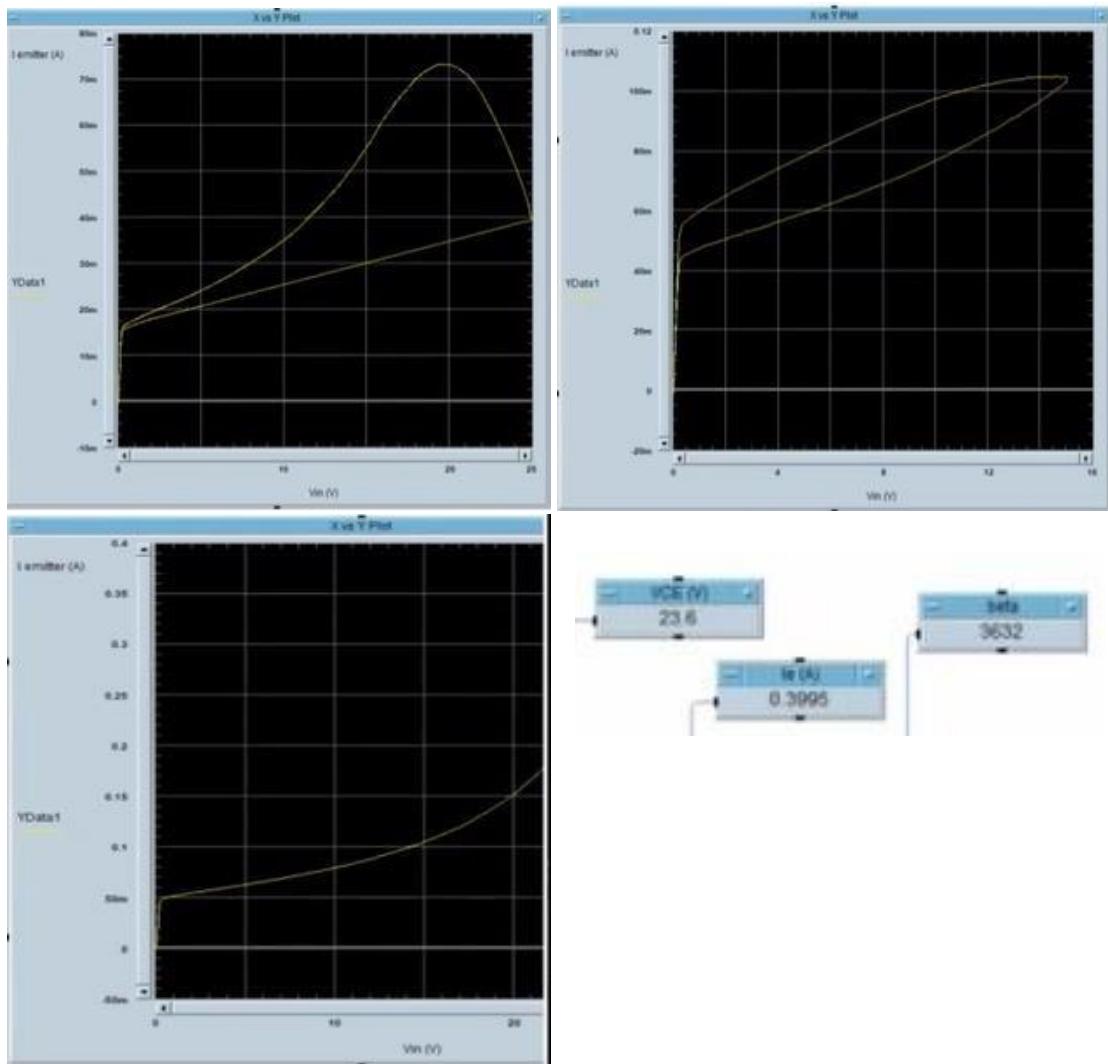
- Alimentatore (Keysight E631A)
- Amperometro (Keithley 2400)
- Cavi

Il beta ricavato da queste caratteristiche si aggira sui 200-250 più o meno in linea con i risultati ricavati con il nostro esperimento.

L'esperimento è stato effettuato calcolando 3 caratteristiche d'uscita del dispositivo BD437 una con $V_b=0,5V$ applicata alla resistenza di 10k inserita tra l'alimentazione e la base e facendo variare la V_{ce} da 0-25V, un'altra caratteristica è stata ricavata imponendo $V_b=2,5V$ e l'ultima con $V_b=4,5V$ sempre facendo variare la V_{ce} da 0-25V

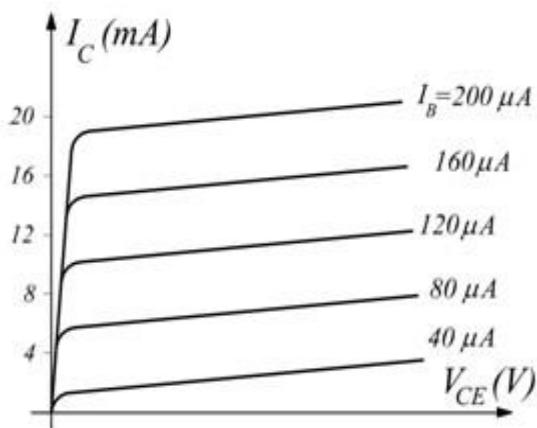


Ho riprovato a ricavare il grafico della caratteristica d'uscita del BJT ma il programma utilizzato o il dispositivo si è danneggiato perché ho ricavato i seguenti risultati:



C'è stato qualche problema nel riprovare l'esperimento di misura e stavamo anche per bruciare il fusibile dell'amperometro oltre al fatto che abbiamo maltrattato il BJT.

CARATTERISTICHE DI USCITA

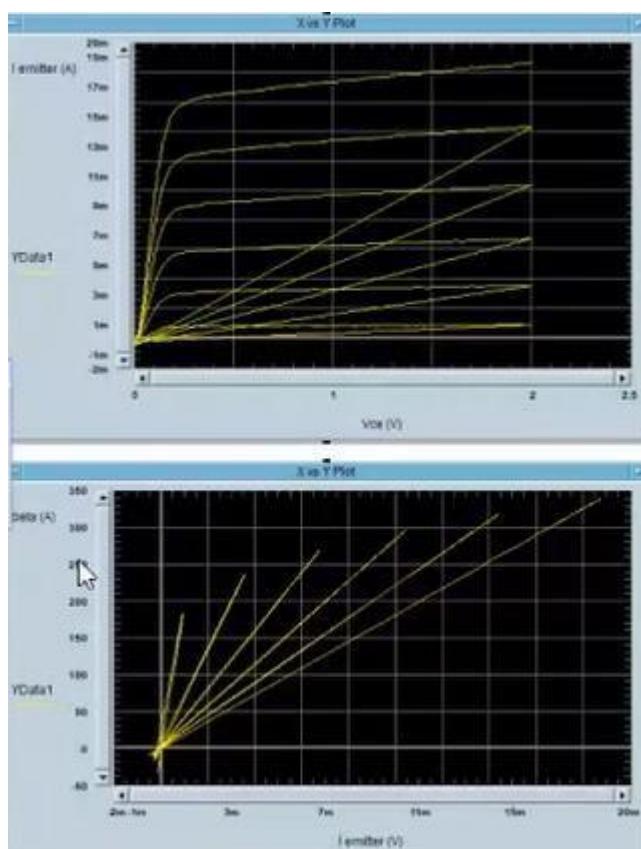


Ciò che avevamo dovuto ricavare dall'esperimento fatto a lezione sarebbe stato un grafico come quello in figura.

Esso rappresenta l'andamento della corrente I_C in funzione della V_{CE} per valori costanti di I_B .

Si tratta dunque, di una famiglia di curve. L'intersezione fra la retta di carico e la caratteristica di uscita (per un assegnato valore di I_B) individua il punto di lavoro del transistor che raggiunto quello stato si dice polarizzato.

Abbiamo rifatto l'esperimento da casa tramite VNC e ci siamo resi conto che la caratteristica del BD437 andava fuori specifiche con valori di V_{CE} alti, quindi abbiamo:



Ridotto il range V_{CE} da 0-2V con passo di 20mV:



Le caratteristiche sono state fatte con V_B variabile da 1-6V con passo di 1V:



È stata aumentata la R_B a 100kΩ dal prof.

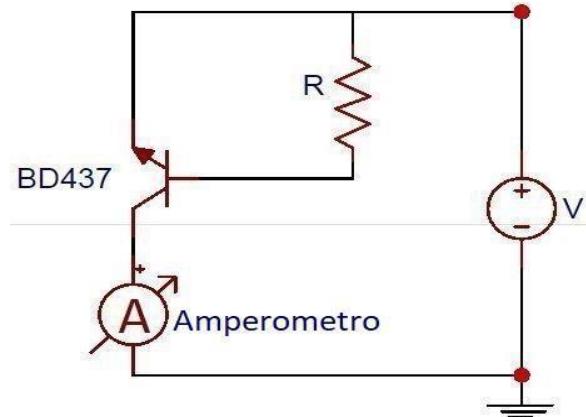
I risultati mostrano che il beta (guadagno di corrente) del BD437 varia al variare di I_B E V_{CE} e il suo valore varia da 180-350. Il nostro esperimento è stato fatto con una resistenza R_B diversa (variabile) e applicando 5V come V_B e

come V_{CE} fissa, quindi possiamo dire dato che i nostri valori del guadagno di corrente ricadono nel range ricavato con strumenti più professionali l'esperimento è stato effettuato in modo corretto.

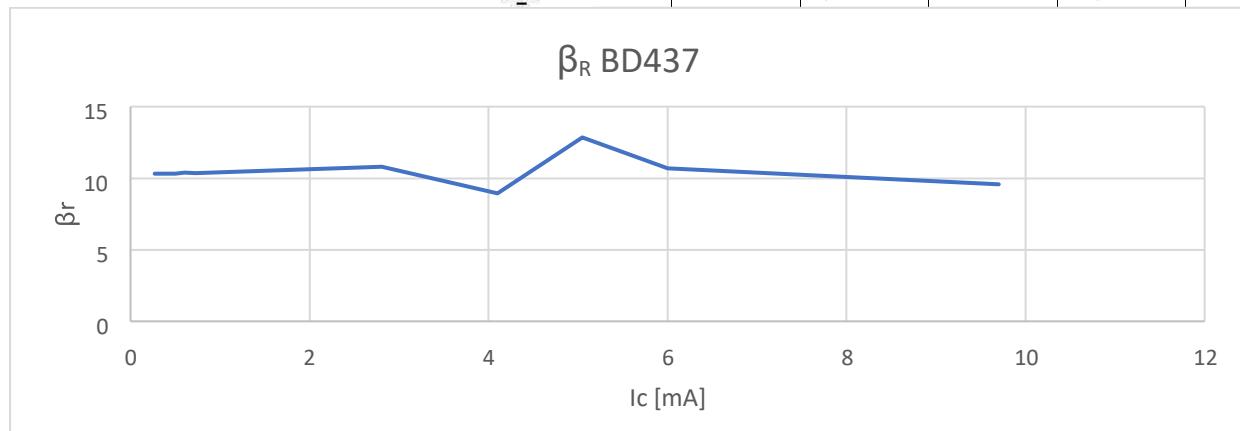
• GUADAGNO DI CORRENTE β_R

Il guadagno β_R può essere calcolato polarizzando inversamente il transistor, invertendo i collegamenti tra collettore ed emettitore (attiva inversa $V_{be} < 0$ $V_{bc} > 0$). Misuriamo I_C (I_B non più trascurabile).

Circuito utilizzato:



R [k Ω]	I_C [mA]	I_B [μ A]	β_R
4	9,7	1130	9,58
7	6	618	10,7
8	5,05	426	12,85
10	4,1	516	8,94
15	2,81	287	10,79
55	0,73	78	10,35
70	0,6	64	10,38
80	0,504	54	10,33
150	0,27	29	10,31

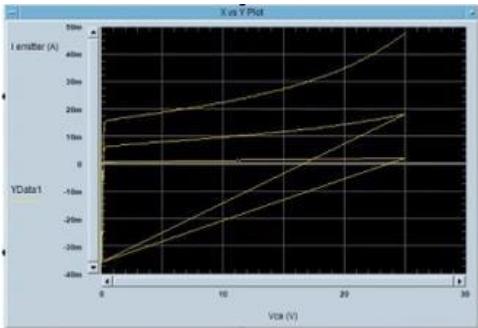


• Variazione della caratteristica I_E - V_{CE} e β_f - I_c in funzione della temperatura (BD437 con dissipatore).

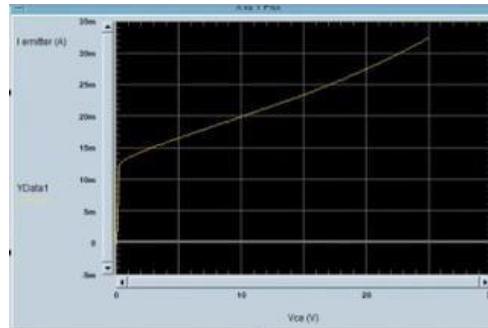


A lezione abbiamo effettuato un'altra misura della caratteristica d'uscita del BJT BD437 prima senza dissipatore e dopo con il dissipatore montato così da vedere come variava la caratteristica.

- $V_B=5V$; $R_B=100\text{ k}\Omega$; $V_{CE}=(0-25)\text{ V}$



SENZA DISSIPATORE $I_{E\text{MAX}}=47.9\text{ mA}$.



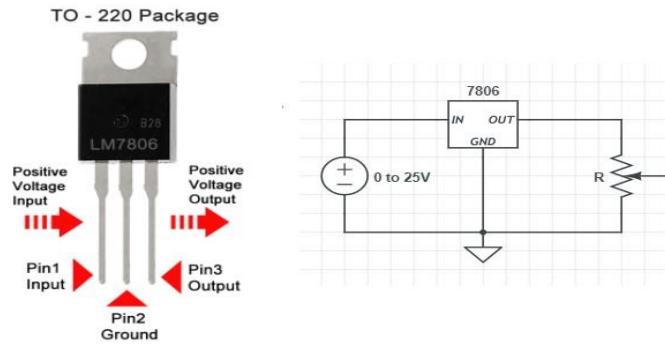
CON DISSIPATORE $I_{E\text{MAX}}=32.5\text{ mA}$.

Prendendo in esame l'ultima curva della caratteristica d'uscita, quella con $V_B=5V$ la corrente I_E è calata notevolmente da 47.9mA senza dissipatore a 32.5mA con dissipatore.

6. REGOLATORI DI TENSIONE.

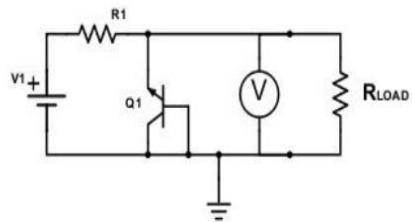
I regolatori di tensione sono circuiti estremamente comuni nell'elettronica e svolgono la funzioni di mantenere la tensione di uscita V_{OUT} costante ad un certo valore dichiarato dal costruttore sul datasheet o anche nel nome del dispositivo (integrato) come per esempio l'LM78XX in cui la sigla comprende una famiglia di integrati che si distinguono l'uno dall'altro tramite le ultime due cifre della sigla che indicano la tensione che erogano in uscita. Più precisamente, **un circuito regolatore di tensione è progettato per fornire una tensione di uscita costante, precisa ed indipendente da ogni possibile causa di variazione**, ossia indipendente dalla corrente assorbita dal carico, dalla tensione di ingresso, dalle condizioni ambientali e dall'invecchiamento. Nel mio caso ho caratterizzato l'LM7806 che mantiene una tensione costante di 6V in uscita al variare della tensione V_{IN} .

Sono state effettuate le misurazioni su un circuito che l'LM7806 collegato ad un alimentatore variabile e ad una R_{LOAD} . Ho ricavato la caratteristica $V_{IN}-V_{OUT}$ per il circuito mostrato in figura:



• REALIZZAZIONE DI UN REGOLATORE DI TENSIONE

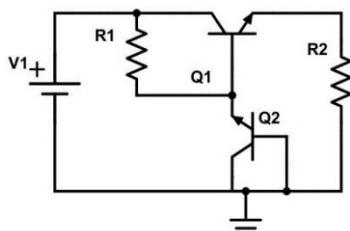
Nel corso di Laboratorio di Elettronica abbiamo realizzato e caratterizzato diversi regolatori di tensione, abbiamo visto come un diodo zener messo in parallelo ad una resistenza di carico stabilizzava la tensione V_{OUT} all'aumentare della tensione V_{IN} nell'intorno della tensione di breakdown V_Z , abbiamo caratterizzato un vero e proprio voltage regulator l'LM7806 e ora ci prefissiamo l'obiettivo di costruire dei regolatori di tensione utilizzando anche i transistori bipolari.



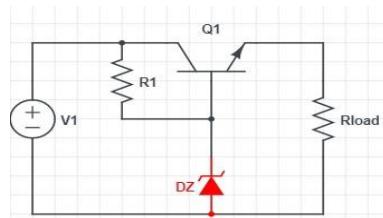
Uno dei circuiti più semplici voltati a regolare la tensione d'uscita è raffigurato in figura ed è analogo al regolatore di tensione fatto con solo un diodo zener posto in parallelo al carico, infatti in questo circuito si sfrutta la giunzione base-emettitore proprio come se fosse un diodo zener poiché essa è polarizzata inversamente e

ciò consente alla V_{OUT} di restare costante al variare di V_{IN} .

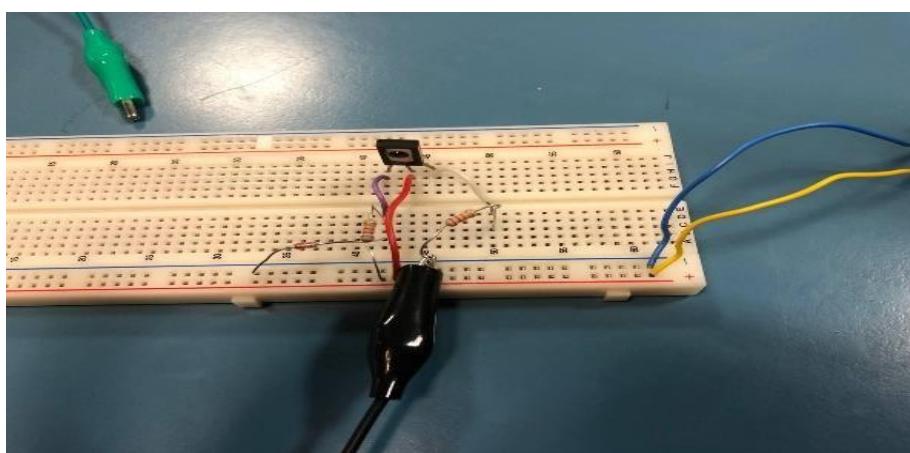
Tuttavia, questo circuito non è ottimale in quanto la tensione d'uscita può risentire leggermente della corrente assorbita dal resistore. Per questo motivo si utilizza questo circuito:



OPPURE



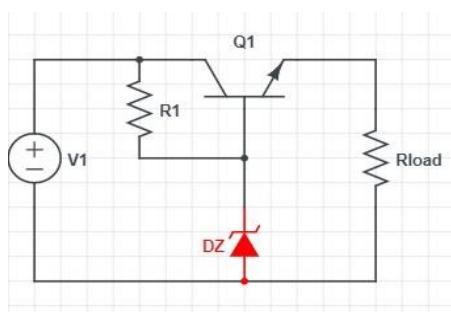
la tensione d'uscita sarà $V_{OUT} = V_{EB2} - V_{BE1}$ o $V_{OUT} = V_Z - V_{BE1}$.



Il circuito studiato comprende una resistenza da $10\text{ k}\Omega$, BJT BD437 e un diodo zener BZX55C + resistenze di carico variabili.

REGOLATORE DI TENSIONE CON BD410 E DIODO ZENER BZX55C

Ho realizzato un regolatore di tensione che utilizza un diodo zener e un bjt messo in questa configurazione:



Componenti utilizzati:

BD410 (con $V_{BE}=0,7V$)

BZX55C 5V1 ($V_z=5V$)

$R_1=10\text{ k}\Omega$

$R_{load}=25\text{k}\Omega$

Circuito a vuoto

V_{in} [V]	V_{out} [V]
0,6	0,21
1,0	0,60
1,5	1,11
2,0	1,58
2,5	2,03
3,0	2,54
3,5	2,93
4,0	3,25
4,5	3,49
5,0	3,66
5,5	3,80
6,0	3,88
6,5	3,97
7,0	4,04
7,5	4,10
8,0	4,15
8,5	4,18
9,0	4,22
9,5	4,25
10,0	4,28
10,5	4,31
11,0	4,33
11,5	4,35
12,0	4,37

Circuito con carico da $25\text{k}\Omega$

V_{in} [V]	V_{out} [V]
0,6	0,11
1,0	0,46
1,5	0,97
2,0	1,42
2,5	1,91
3,0	2,40
3,5	2,79
4,0	3,08
4,5	3,36
5,0	3,55
5,5	3,68
6,0	3,78
6,5	3,87
7,0	3,93
7,5	4,00
8,0	4,04
8,5	4,09
9,0	4,12
9,5	4,15
10,0	4,19
10,5	4,21
11,0	4,24
11,5	4,26
12,0	4,28
12,5	4,30
13,0	4,31
13,5	4,32
14,0	4,34
14,5	4,35
15,0	4,36

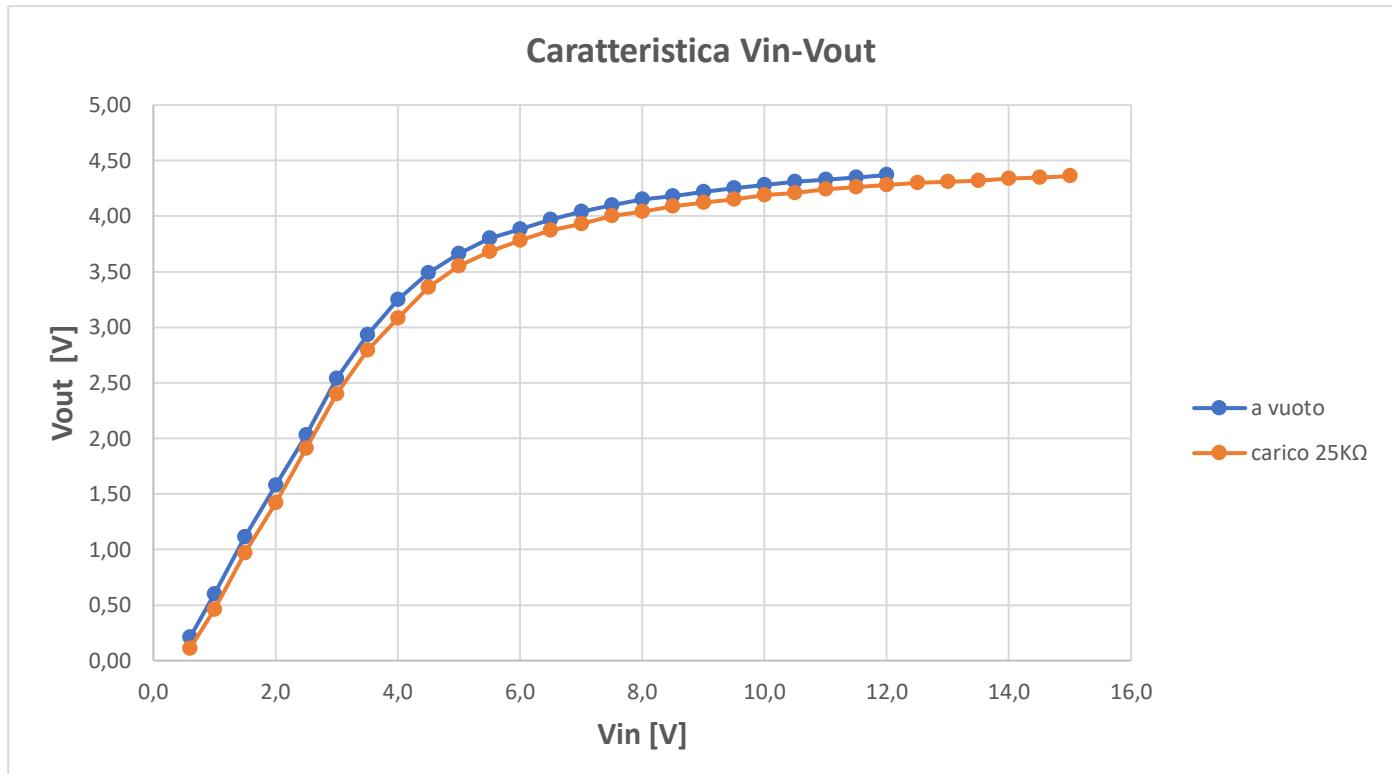
Efficienza di un regolatore di tensione:

L'efficienza di un regolatore di tensione si calcola con questa formula:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

Dove P_{out} è la potenza fornita dal carico, mentre P_{in} è quella erogata dal generatore.

$\eta (\%) = 57$ con un carico da $25\text{k}\Omega$



Come si può evincere dai grafici ottenuti la tensione d'uscita è stabilizzata ed è mantenuta ad un valore quasi costante (aumenta leggermente a causa della resistenza interna del diodo zener) che si aggira intorno a $V_Z - V_{BE}$ ovvero $5\text{V} - 0,7\text{V} = 4,3\text{V}$.

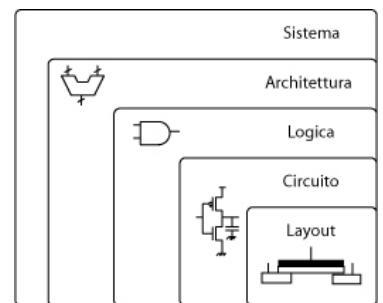
7. INTRODUZIONE ALL' ELETTRONICA DIGITALE

L'**elettronica digitale** è quella branca dell'elettronica che si occupa di gestire ed elaborare informazioni di tipo digitale. Il termine digitale deriva dal termine inglese *digit* (cifra), per il fatto che i calcolatori elettronici operano mediante l'elaborazione di quantità numeriche elementari, i *bit*. Il termine è una contrazione della parola inglese *digit*, che significa *cifra/numero*.

L'elettronica digitale ha a che fare con circuiti e sistemi che funzionano gestendo due soli possibili stati di funzionamento, ad esempio due livelli di tensione, oppure due diversi livelli di corrente. Nei sistemi digitali i due diversi stati servono a rappresentare numeri, simboli, caratteri, colori, immagini, suoni e altre informazioni. Nei sistemi numerici a due stati, detti sistemi binari, le due cifre sono 0 e 1, e ciascuna di esse costituisce ciò che viene appunto chiamato *bit*.

Livelli di astrazione:

Un sistema elettronico digitale può essere visto a diversi livelli di astrazione.



- **Livello di sistema:** il sistema è composto da vari elementi di processo (processing elements) che interagiscono tra di loro (utilizzando protocolli di comunicazione). Il linguaggio formale con cui è scritto il sistema è il SystemC.
- **Livello Architetturale:** il sistema elettronico è un insieme di componenti più o meno standard (registri, ALU, multiplexer) connessi fra di loro.
- **Livello Logico:** ogni componente dell'architettura è una rete logica che svolge compiti diversi. Una rete logica è un insieme di connessioni di porte logiche (AND, OR, XOR, NOT, ecc.).
- **Livello circuitale:** ogni porta logica viene realizzata tramite un circuito (il cui elemento base è il transistor). Si possono avere vari stili di realizzazione delle porte logiche a seconda del tipo di transistori che vengono utilizzati.
- **Livello layout:** è il livello più basso, in cui vengono specificate nel dettaglio le dimensioni di ogni singolo transistore e di ogni connessione.

Livello Logico

Si distinguono due categorie di reti logiche: reti combinatorie e reti sequenziali. Le reti combinatorie sono reti per cui le uscite dipendono solo dagli ingressi che dalla "storia" del sistema (memoria).

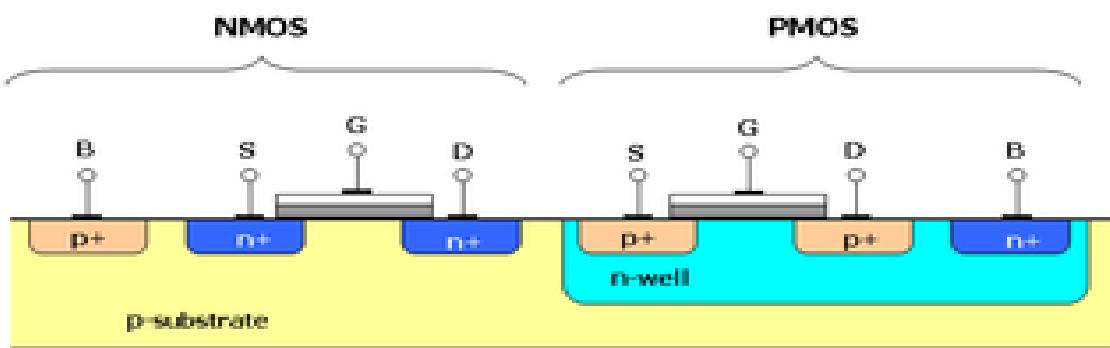
Con le reti combinatorie si sintetizzano le funzioni logiche. Le funzioni logiche sono delle funzioni matematiche avente come "ingressi" e come "uscite" dei segnali logici. Le funzioni logiche possono essere espresse mediante le tavole della verità.

"Esiste un teorema (**teorema di Shannon**) che afferma che **QUALSIASI** funzione logica può essere espressa come somma di prodotti degli ingressi, intendendo per somma l'operazione logica elementare OR e con prodotto l'operazione logica AND."

È possibile quindi ridurre funzioni logiche complesse a combinazioni di funzioni logiche elementari. Questo tipo di sintesi si chiama AND-OR. Per le leggi di De Morgan, è possibile fare sintesi OR-AND, NAND NAND ecc. In seguito vedremo che la sintesi più utilizzata è la NAND NAND.

MOSFET

Il MOSFET (acronimo di metal-oxide-semiconductor field-effect transistor), in elettronica spesso conosciuto come transistor, è composto da un substrato di materiale semiconduttore drogato, solitamente, silicio al quale sono applicati tre terminali: gate, source e drain. L'applicazione di una tensione al gate permette di controllare il passaggio di cariche tra il source e drain. A seconda che il droggaggio del body sia di tipo n o p il transistor prende rispettivamente il nome di pMOSFET o nMOSFET, abbreviati in pMOS e nMOS, questo per via del canale che si viene a formare nel substrato.



Con il passare del tempo la scoperta del MOSFET ha cambiato radicalmente l'architettura dei calcolatori e dell'elettronica in generale principalmente quella digitale dando vita alla CMOS un tipo di tecnologica tutt'ora utilizzata grazie alla sua efficienza sia in frequenza che per quanto riguarda i consumi energetici.

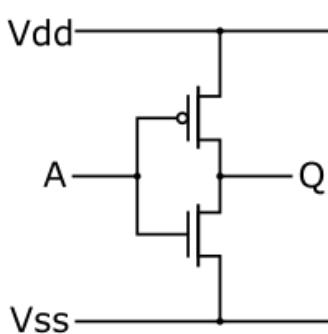
CMOS

La CMOS (acronimo di complementary metal-oxide semiconductor) è un tipo di tecnologia utilizzata in elettronica digitale per la progettazione di circuiti integrati, alla cui base sta l'uso dell'Invertitore a transistor MOSFET. Si tratta di una struttura circuitale costituita dalla serie di una rete di "Pull-Up" ed una di "Pull-Down": la prima s'incarica di replicare correttamente il livello logico alto **LL1** mentre alla seconda è destinata la gestione del livello logico basso **LL0**. La rete di Pull-Up è costituita da MOSFET a canale P, che si "accendono" solo se la tensione presente sul *gate* (misurata rispetto al *source*) è minore della tensione di soglia. Inversamente la rete di Pull-Down è costituita da MOSFET a canale N che si accendono solo se la tensione presente sul *gate* (misurata rispetto al *source*) è maggiore della tensione di soglia.

Uno dei principali vantaggi della logica CMOS è di avere una potenza statica dissipata idealmente nulla.

Questa caratteristica è dovuta alla complementarità del pull-down (n-Mos) e del pull-up (p-Mos); ossia, quando è acceso il pull-up, è spento il pull-down, e viceversa. In realtà ci sono piccole correnti di perdita (per caricare/scaricare le capacità parassite, la corrente di cortocircuito durante la commutazione di stato, per perdite alle giunzioni e per le correnti di sottosoglia), trascurabili se il numero dei MOS è relativamente piccolo, ma che può diventare particolarmente sentito, in particolare le correnti di sottosoglia sono responsabili di circa la metà della dissipazione di potenza nelle attuali realizzazioni VLSI.

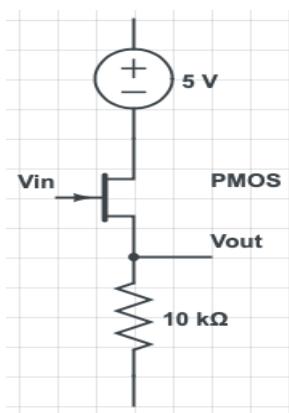
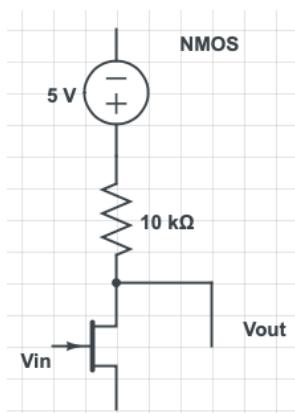
INVERTER



Si tratta di una struttura circuitale costituita dalla serie di una rete di "Pull-Up" ed una di "Pull-Down": la prima s'incarica di replicare correttamente il livello logico alto mentre alla seconda è destinata la gestione del livello logico basso. Tale topologia circuitale fu inventata da Frank Wanlass nel 1967. La rete di Pull-Up è costituita da MOSFET a canale P, che si "accendono" solo se la tensione presente sul *gate* (misurata rispetto al *source*) è minore della tensione di soglia. Inversamente la rete di Pull-Down è costituita da MOSFET a canale N che si accendono solo se la tensione presente sul *gate* (misurata rispetto al *source*) è maggiore della tensione di soglia.

Particolarità di questa porta logica è di avere una dinamica logica d'uscita piena, cioè pari alla massima tensione applicata, V_{cc} ; inoltre né la rete di pull-up né la rete di pull-down soffre di effetto body. La componentistica realizzata in questa tecnologia è caratterizzata da un consumo di corrente estremamente basso.

L'inverter si può costruire anche con un solo nMOS o pMOS e questi sono gli schemi circuitali:

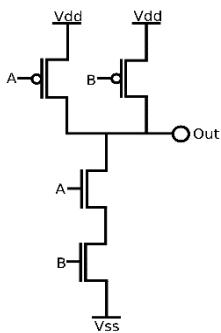


Infatti nel corso abbiamo utilizzato un solo nMOS per creare un solo inverter. Con l'uso dei MOSFET si possono creare qualsiasi porta logica, però alcune porte logiche come per esempio le porte NAND o NOR sono le più usate poiché si può affermare che gli elementi base per costruire qualsiasi funzione logica sono:

- **NAND** realizzata con una rete di pull-up costituita da due pMOS in parallelo e una rete di pull-down costituita da due nMOS in serie.
- **NOR** realizzata con una rete di pull-up costituita da due pMOS in serie e una rete di pull-down costituita da due nMOS in parallelo.

Ogni funzione logica binaria può essere espressa in termini di questi due operatori e quindi di conseguenza implementata anche circuitalmente.

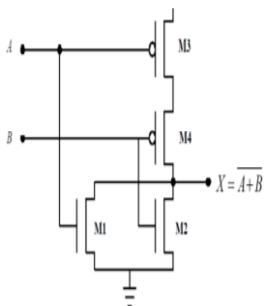
NAND



A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

La porta NAND è definita la porta logica costituita da due (o più) ingressi e un'uscita che restituisce FALSO solo quando tutti gli ingressi sono nello stato di VERO. La porta NAND possiede la proprietà di **Completezza Funzionale**. Questo significa che ogni altra funzione logica (AND, OR etc.) può essere implementata utilizzando solamente porte NAND. Questa caratteristica è presente anche nelle porte NOR, rendendo la NAND e la NOR **porte logiche universali**.

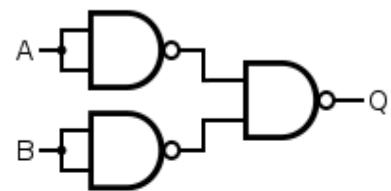
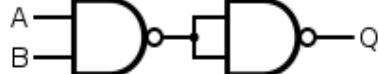
NOR



A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

La porta NOR restituisce VERO solo quando tutti i valori in ingresso sono nello stato logico FALSO. Anche la NOR gode della proprietà di Completezza Funzionale. Infatti è possibile creare qualsiasi altra porta logica a partire dalla NAND e dalla NOR, sotto ne segue una dimostrazione.

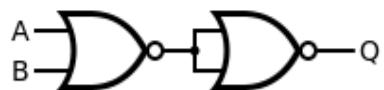
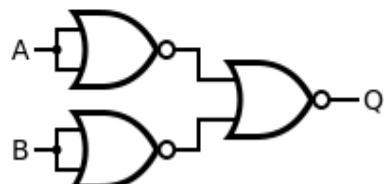
NAND e NOR porte logiche universali:



NOT

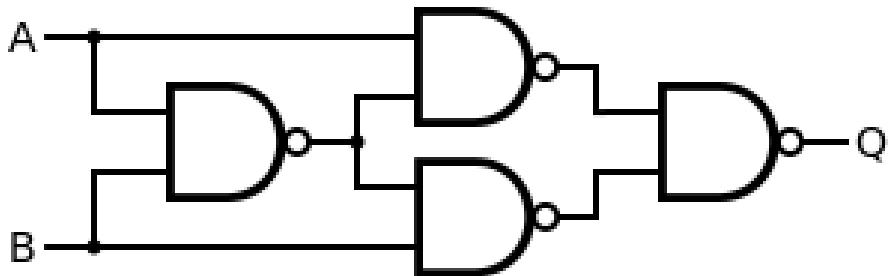
AND

OR

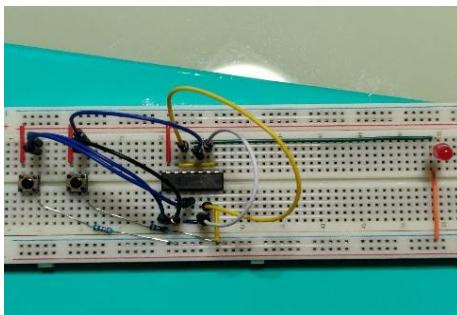
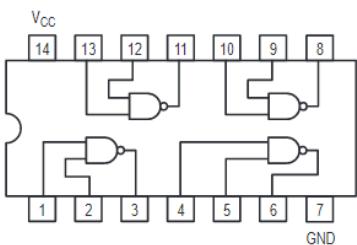


Queste sono alcune delle diverse semplificazioni delle porte logiche con le porte NAND o NOR. Nell'ultima parte del corso abbiamo ricreato una porta XOR a partire da una famiglia di integrati (SN7400) che si presentano con un case 646 con 14 pin e al loro interno sono state realizzate quattro porte NAND a due ingressi.

8. XOR CON SN7400, SN74LS00N, SN74HC00



Ho ricreato una porta logica XOR tramite una famiglia di integrati “Quadruple 2-input positive NAND gates” ognuno caratterizzato da un’architettura diversa e ci prefissiamo il compito di studiare le varie tecnologie TTL, TTL LS, CMOS e di discutere dei loro lati positivi e negativi tramite 3 integrati costruiti con diverse tecnologie.



Componenti utilizzati:

2 Resistenze 330Ω

2 Interruttori

1 Alimentatore USB 0-25V

1 LED Rosso

1 SN7400 o SN74LS00N o SN74HC00

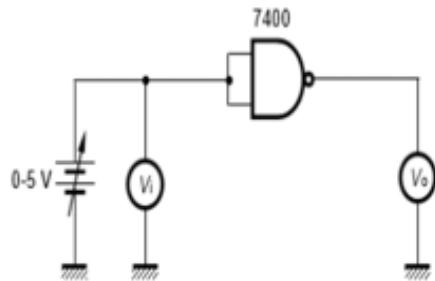
L’integrato SN74LS00N ha delle NAND costruite con tecnologia TTL LS e si può vedere poiché anche se l’uscita logica è nulla c’è comunque potenza statica dissipata stessa cosa per quanto riguarda la TTL, invece per quanto riguarda la CMOS la potenza statica dissipata è estremamente piccola che la si può considerare nulla

SN7400 (V _{cc} =5V)		
A	B	V _{out}
0	0	60 mV
0	5	3,96 V
5	0	3,96 V
5	5	61 mV

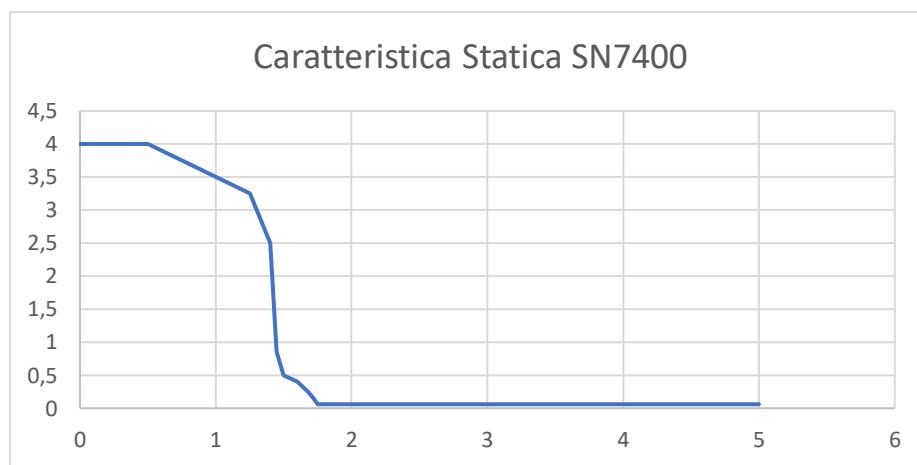
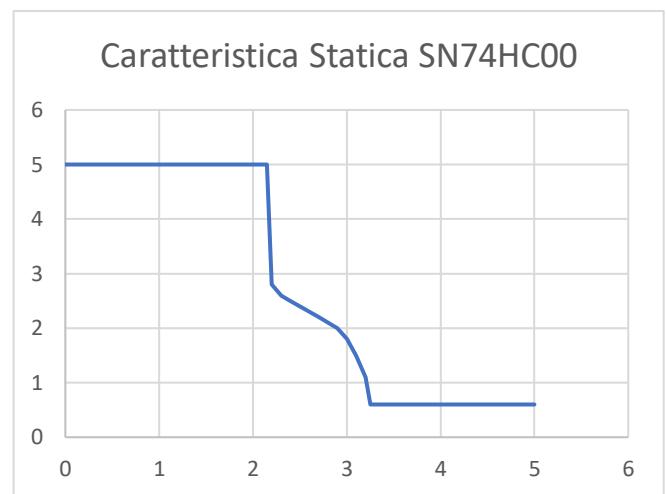
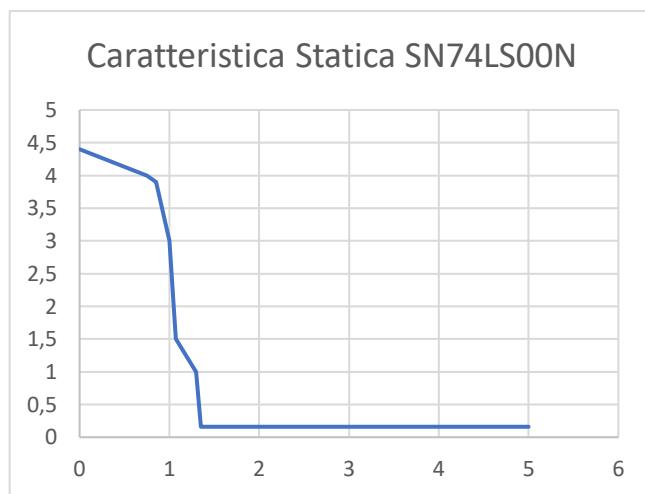
SN74LS00N (V _{cc} =5V)		
A	B	V _{out}
0	0	160 mV
0	5	4,36 V
5	0	4,36 V
5	5	160 mV

SN74HC00 (V _{cc} =5V)		
A	B	V _{out}
0	0	0,001 mV
0	5	5,01 V
5	0	5,01 V
5	5	0,002 mV

Per una porta logica una delle caratteristiche più importante che è influenzata dall’architettura è la **Caratteristica statica e dinamica** ossia è quella caratteristica che ci dà informazioni su come varia la transizione dell’uscita V_o rispetto alla variazione della tensione d’ingresso V_i in funzione della frequenza; Per calcolare questa caratteristica dobbiamo prima costruire il circuito, in esame ho preso una porta NAND dell’integrato SN7400 alla quale ho cortocircuitato gli ingressi per formare un inverter, per ricavare e descrivere la caratteristica facciamo variare la V_i da 0 a 5V con step di 0.1V e annotiamo il corrispondente risultato di V_o come mostrato in figura:



Ho ripetuto l'esperimento anche con l'integrato SN7400N e SN74HC00 ed ecco i risultati:

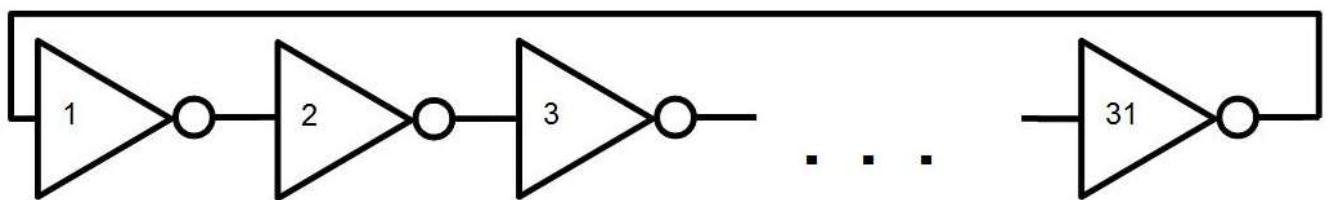


Non è stato possibile calcolare l'andamento in frequenza per questo esperimento poiché non avevamo gli strumenti di misura al momento delle misure.

9. RING OSCILLATOR

Il ring oscillator è un circuito capace di generare segnali periodici con una certa frequenza, che dipende da vari parametri (tra cui tecnologia o numero di dispositivi utilizzati). Esso si può realizzare ponendo in cascata un numero dispari di porte NOT e collegando l'uscita dell'ultima con l'ingresso della prima (utilizzando un numero pari di invertitori si ha che l'uscita dell'ultima porta è uguale all'ingresso della prima e questo viene sfruttato per realizzare elementi di memoria).

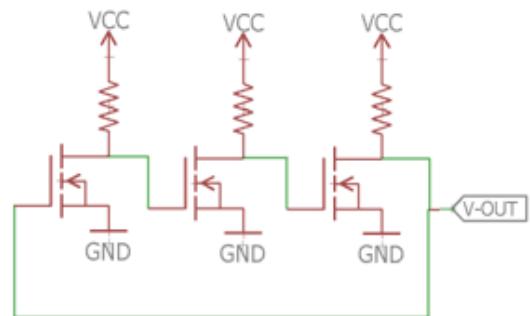
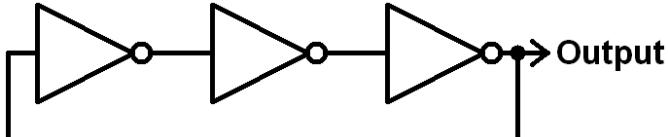
Con la retroazione si innesca un'oscillazione periodica perché l'ingresso cambia continuamente in quanto l'uscita nega sempre, tramite il feedback, l'ingresso.



Quello costruito in classe è stato realizzato con tre inverter collegati a cascata, un inverter si crea con un nMOS che ha una resistenza di pull up tra l'alimentazione e il drain di circa $10\text{k}\Omega$ e il source a massa. Per realizzare il ring oscillator basta collegare il drain dell'nMOS precedente con il gate dell'nMOS subito dopo e creare un collegamento di feedback tra l'uscita dell'ultimo inverter e l'ingresso del primo.

Ring Oscillator con 3 MOSFET BS108

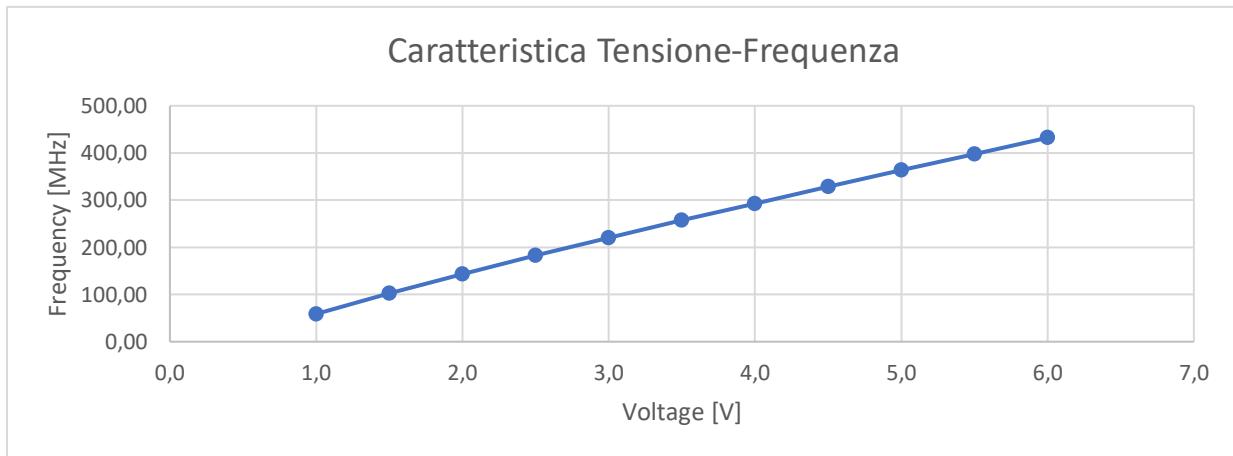
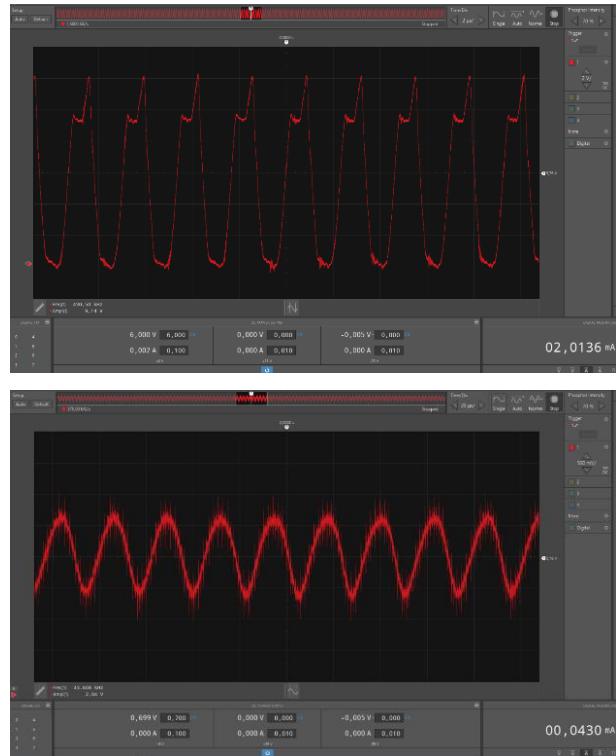
COMPONENTI UTILIZZATI: 3 BS108, 3 Resistori da $8,2\text{k}\Omega$, VirtualBench.



Un altro invertitore si può inserire all'uscita se si vuole eliminare il rumore, se il segnale deve essere mandato ad un circuito esterno. Dopo aver realizzato il circuito, ho ricavato come varia la frequenza delle oscillazioni al variare della tensione d'ingresso. Eventualmente si possono fare delle prove variando anche il valore della resistenza così da vedere anche l'andamento del ritardo del circuito in funzione della resistenza.

Sono stati ricavati i seguenti dati/grafici:

Voltage [V]	Current [mA]	Frequency [KHz]
1,0	0,1968	58,80
1,5	0,3846	102,22
2,0	0,5660	143,23
2,5	0,7469	182,44
3,0	0,9275	220,42
3,5	1,1083	257,20
4,0	1,2893	292,91
4,5	1,4700	328,95
5,0	1,6514	363,55
5,5	1,8328	397,57
6,0	2,0140	432,28



Ho utilizzato anche 3 BS170 per creare un astabile sempre nella stessa configurazione e ho calcolato la caratteristica tensione-frequenza per valori di resistenza di pull-up di 8,2 kΩ e 27 kΩ

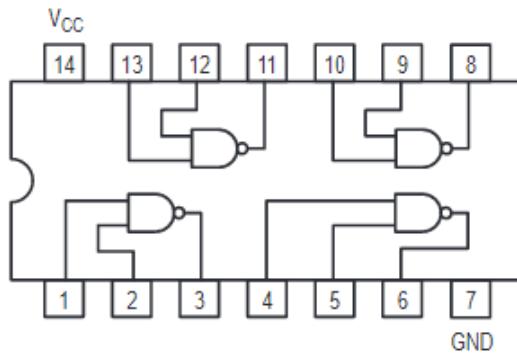
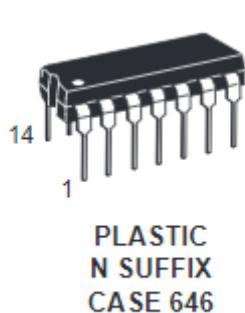
VDD [V]	Freq[KHz][R=8,2K]	Freq[KHz][R=27K]
1	Non oscilla	Non oscilla
2	570	Non oscilla
3	655	60,77
4	1000	97,27
5	1326	124,3

Se si utilizza un filo molto lungo si può notare che la frequenza diminuisce al crescere della lunghezza poiché al tempo di ritardo del circuito si somma anche un ritardo aggiuntivo chiamato ritardo di linea. Dato che la

lunghezza non è più trascurabile, il tempo di propagazione aumenta perché aumentano le capacità, di conseguenza diminuisce la frequenza all'aumentare della lunghezza.

Ring Oscillator con porte NAND (TTL LS) (SN74LS00N)

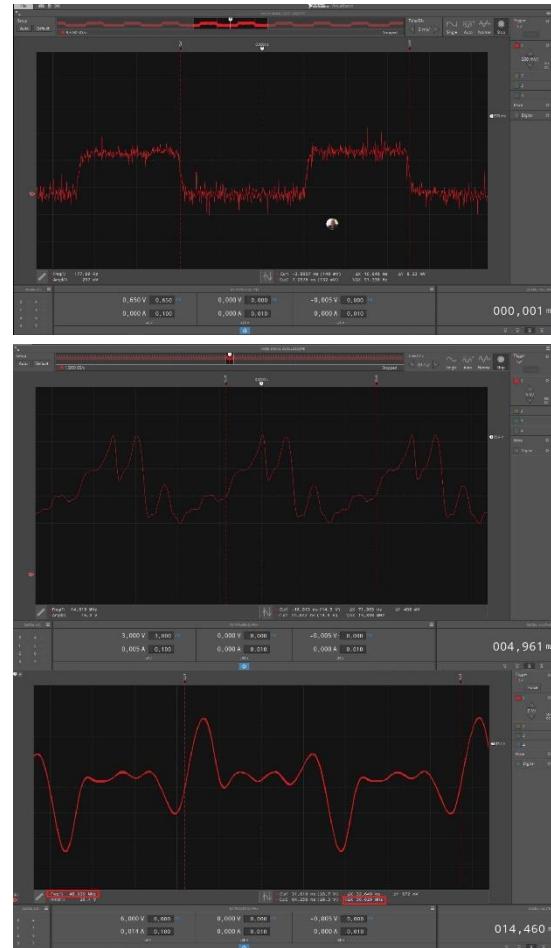
Ho utilizzato per costruire un circuito ring oscillator un integrato l'SN74LS00N, è un chip costruito con un case 646 con 14 pin ha un'architettura low power schottky (TTL-LS) e al suo interno implementa quattro porte NAND a due ingressi, ho utilizzato 3 NAND come porte NOT:



Gli ingressi delle porte NAND sono stati uniti per creare la porta NOT come spiegato in precedenza, una volta costruito il ring oscillator lo abbiamo caratterizzato collegandolo al Virtual-Bench del polifunzionale e abbiamo ricavato le seguenti misure:

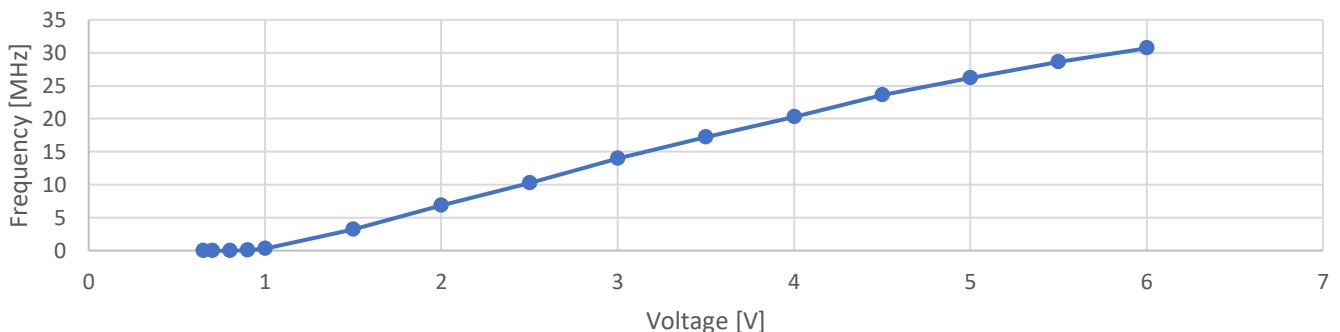
Voltage [V]	Current [mA]	Frequency [MHz]	Amplitude [V]
0,65	0,001	0,0000913	0,03
0,7	0,001	0,000332	0,12
0,8	0,002	0,000483	0,79
0,9	0,011	0,0525	0,91
1,0	0,057	0,258	1,01
1,5	1,110	3,190	1,78
2,0	3,230	6,870	2,67
2,5	5,100	10,260	2,85
3,0	4,960	14,000	1,64
3,5	7,250	17,240	2,33
4,0	10,880	20,260	3,07
4,5	8,570	23,610	2,36
5,0	10,410	26,200	2,43
5,5	12,670	28,620	3,02
6,0	14,480	30,680	2,61

Di fianco sono state riportate alcune forme d'onda a diverse tensioni di alimentazione.



Dalle misure ricavate ho ricavato anche il grafico dell'andamento della frequenza d'oscillazione al variare della tensione di alimentazione applicata al circuito, e come si può evincere dal grafico ha un andamento quasi lineare, da questo grafico possiamo dedurre che il range di tensione nominale per questa architettura (TTL) è 4,75-5,25V.

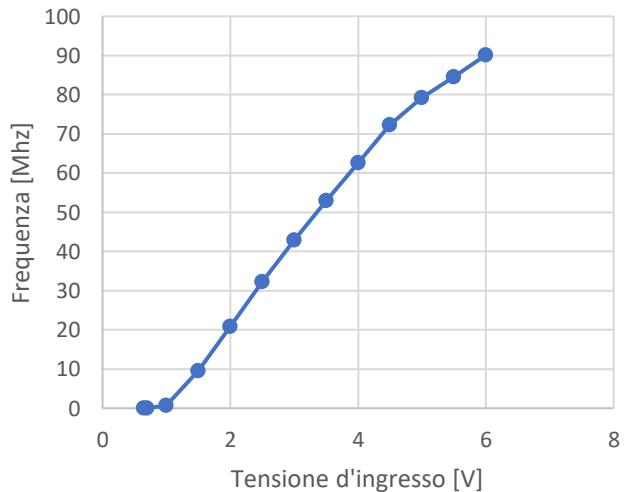
Caratteristica Tensione-Frequenza



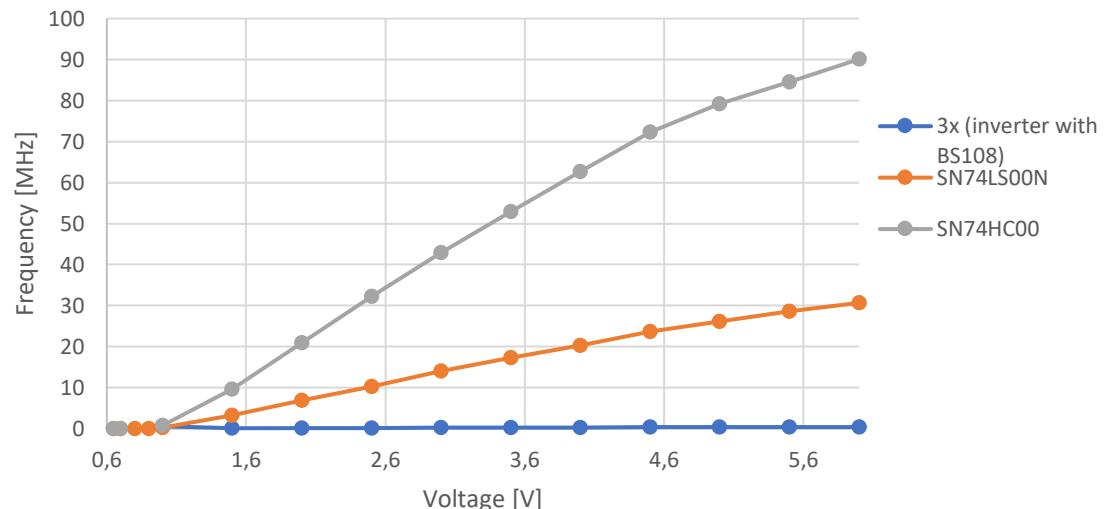
Ring Oscillator con porte NAND (CMOS) (SN74HC00)

Ring Oscillator SN74HC00			
Vin [V]	Frequency [MHz]	Amplitude [V]	Current [mA]
0,65	0,000284	0,06	non rilevata
0,7	0,0014	0,145	non rilevata
1	0,768	0,32	non rilevata
1,5	9,6	0,646	1
2	20,9	1,3	3
2,5	32,23	2,09	5
3	42,952	2,59	10
3,5	52,975	2,77	10
4	62,68	2,88	12
4,5	72,304	4,73	18
5	79,218	7,7	26
5,5	84,614	8,9	34
6	90,124	7,24	33

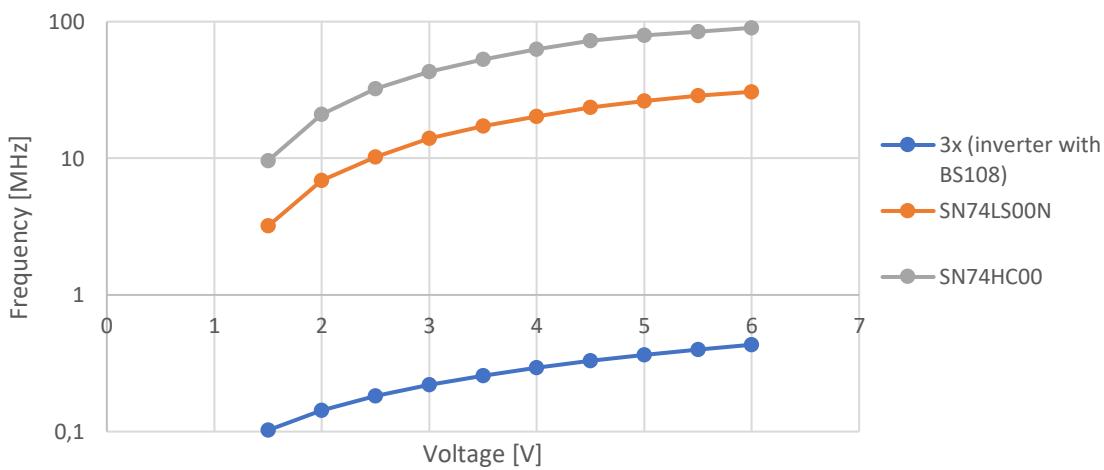
Caratteristica Vin-Frequenza



3xBS108 vs SN74LS00N vs SN74HC00

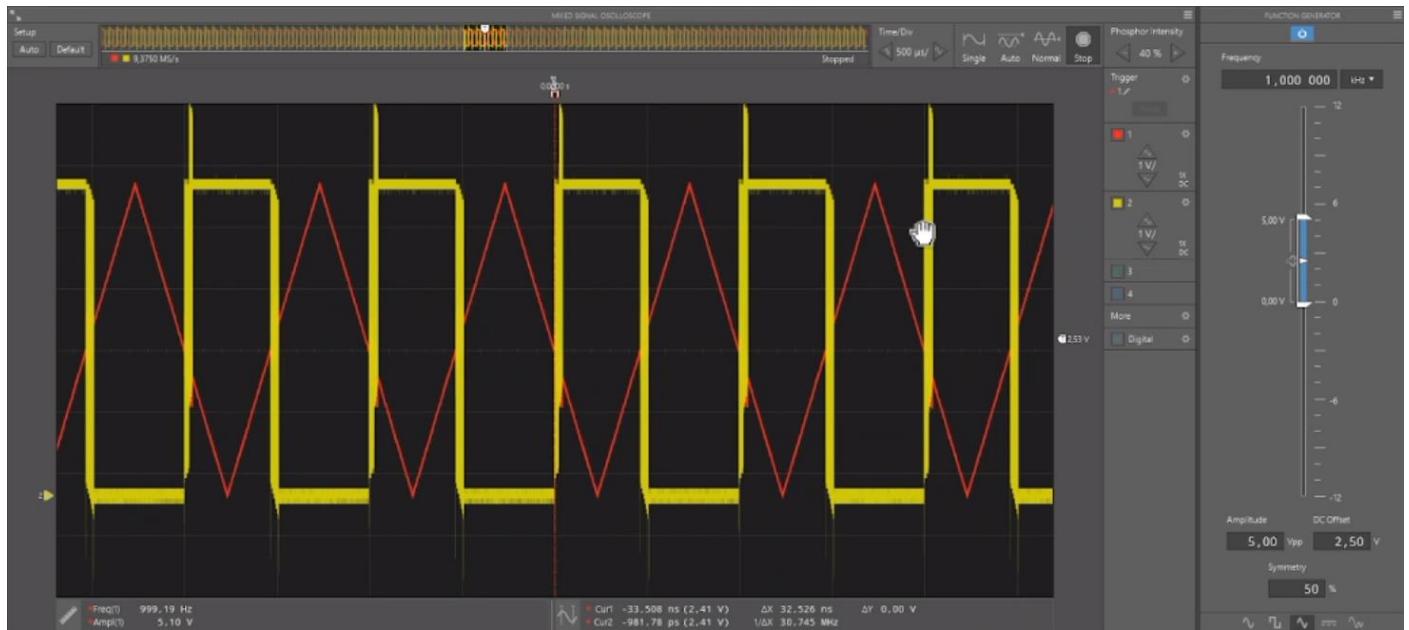


3xBS108 vs SN74LS00N vs SN74HC00

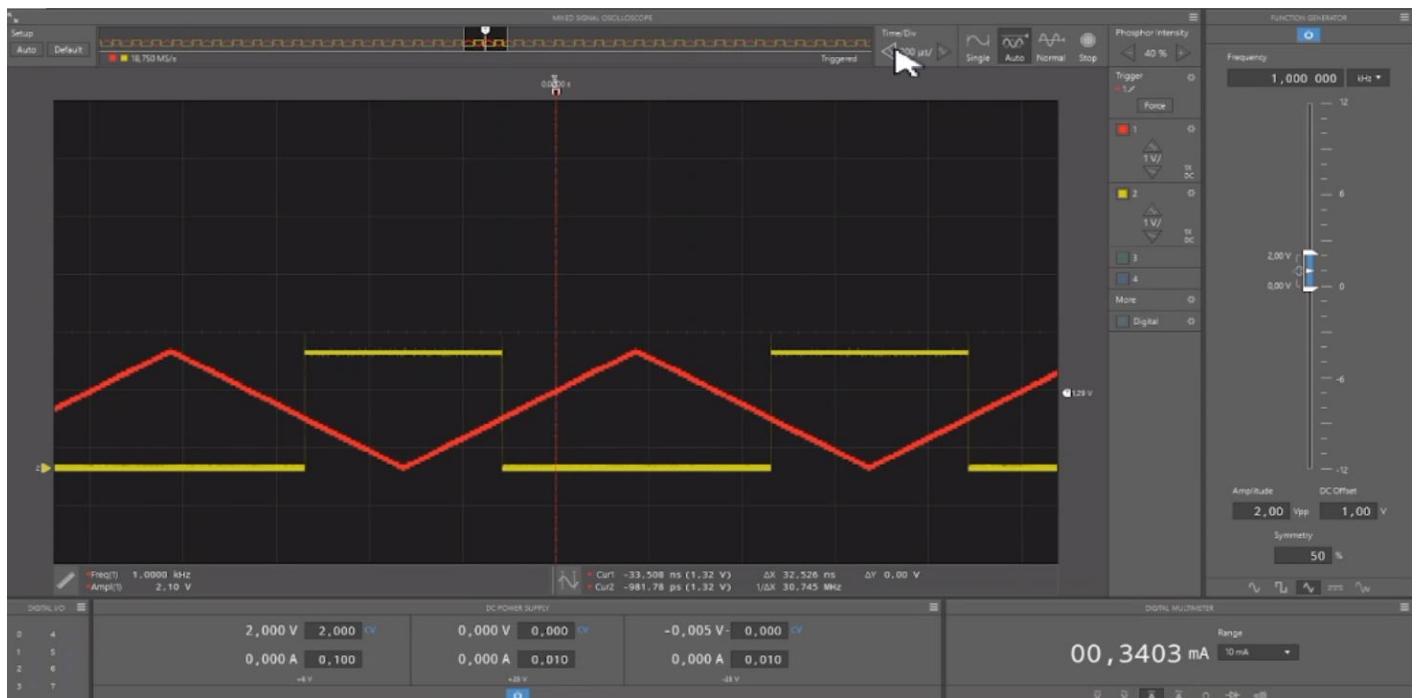


10. CARATTERIZZAZIONE DELLA PORTA NAND DELL'INTEGRATO SN74HC00 CON UN GENERATORE DI FUNZIONE.

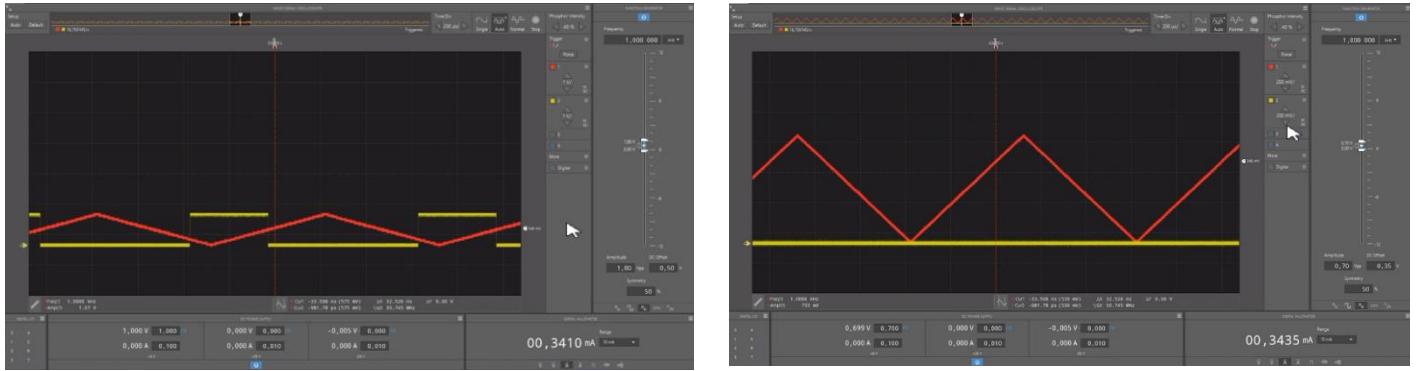
Ho usato una NAND dell'integrato SN74HC00 e ho collegato agli ingressi della porta un generatore di funzione, come prima onda ho scelto un'onda triangolare che varia da 0V-5V con frequenza 1kHz, mentre come Vcc per alimentare l'integrato ho utilizzato un power supply settato a 5V e osserviamo che la NAND funziona come un decisore, ossia:



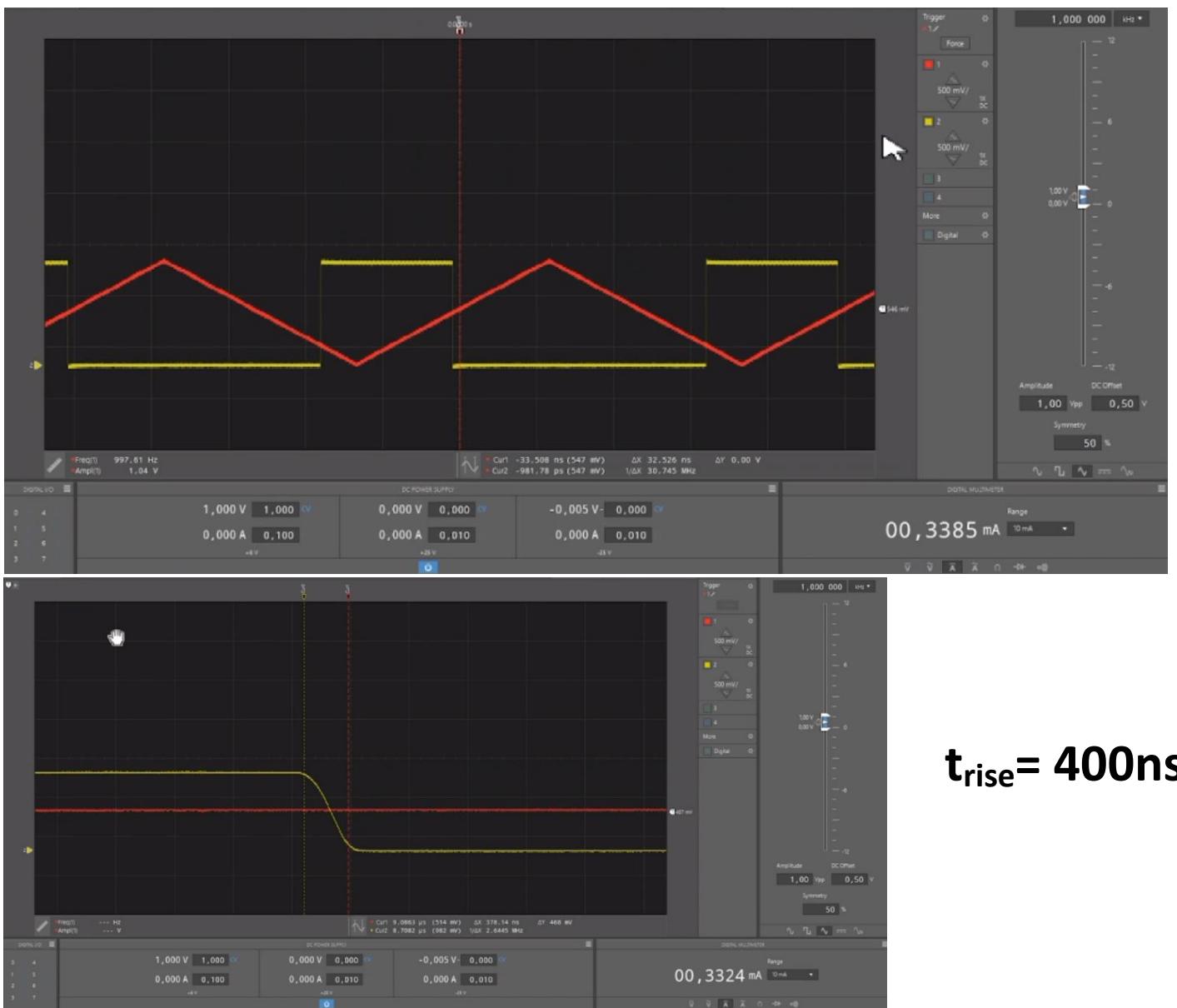
L'uscita (in giallo) è un'onda quadra che si crea tramite comparazione ossia soltanto dopo che si è superata una tensione di soglia, si può notare che c'è un range di indecisione a ridosso della tensione di soglia cosa che non avviene diminuendo la tensione d'alimentazione e dell'onda a 2V:



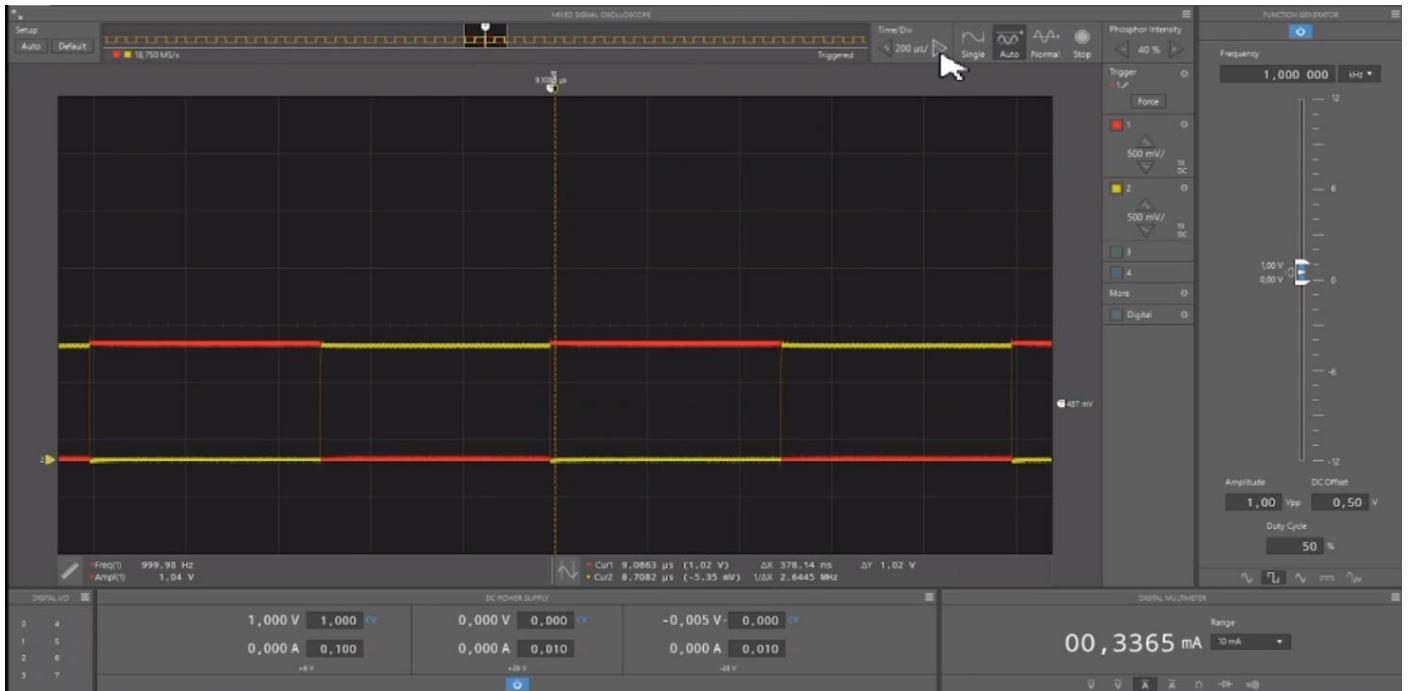
Ho provato anche con tensioni di 1V e 0,7V possiamo notare che a 0,7V non funziona più da comparatore:



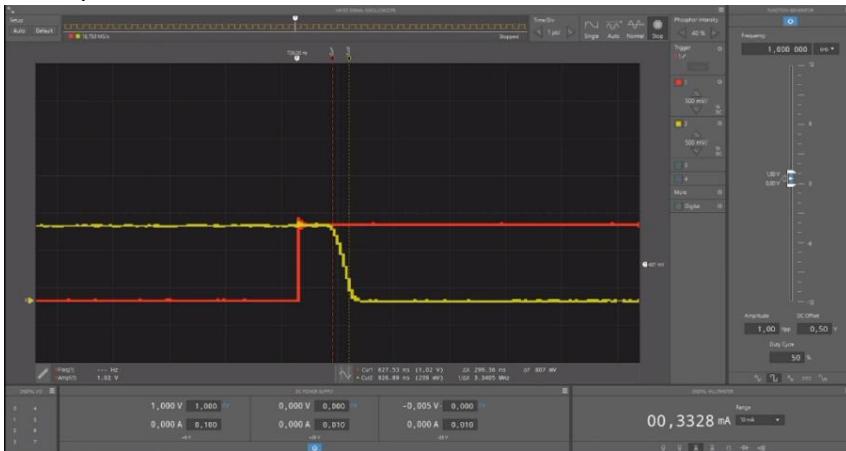
Prendendo in esame il circuito alimentato con 1V ci prefissiamo l'obiettivo di studiare il tempo di salita del decisore:



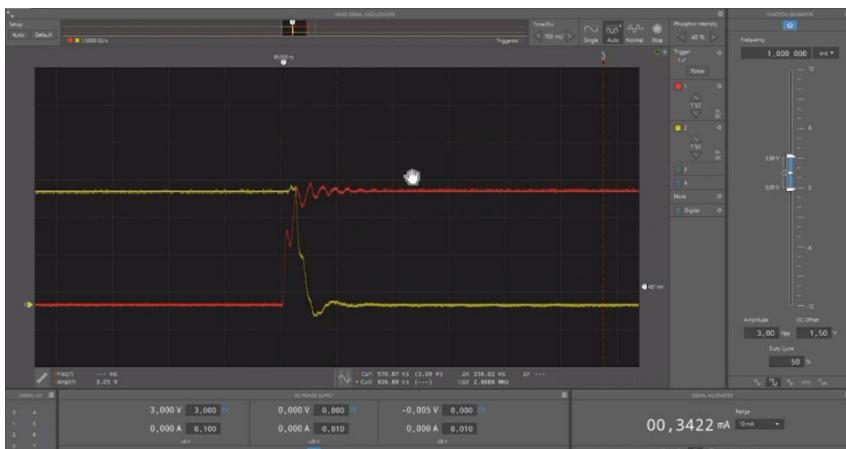
In genere per testare le porte logiche o decisori si utilizzano le onde rettangolari; infatti, come secondo esperimento ho utilizzato un'onda rettangolare con duty 50% di V_{pp} 1V e V_{cc} 1V:



Qui si può notare che la NAND ha gli ingressi cortocircuitati poiché funziona da inverter. Per quanto riguarda il tempo di salita t_{rise} si ha:



Ho testato l'inverter anche con una tensione V_{cc}=3V e un'onda triangolare 0-3V con duty 50% f=1kHz:

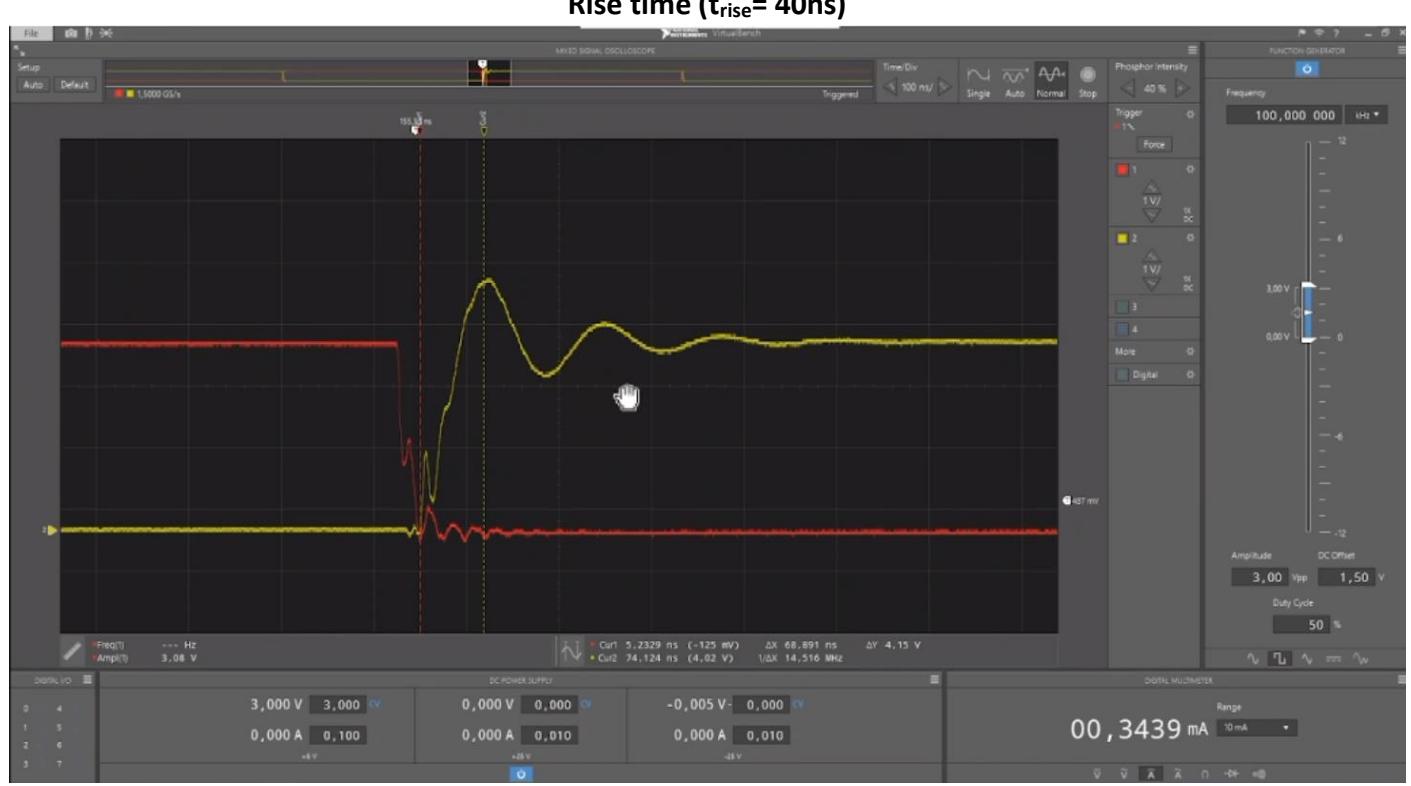
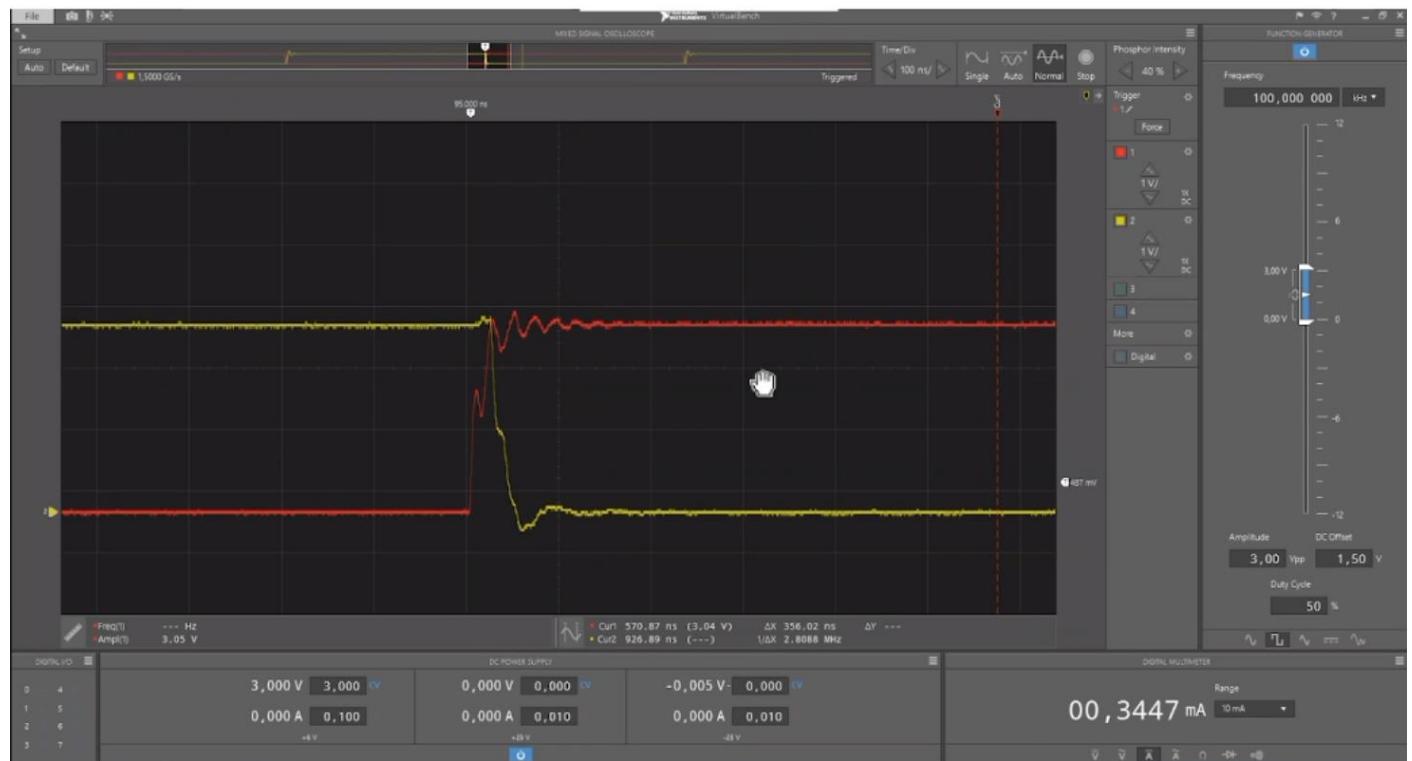


$$t_{rise} = 300 \text{ ns}$$

$$t_{rise} = 40 \text{ ns}$$

(si può notare che essendo più veloce ora si vengono a creare dei transitori)

Cambiando frequenza da 1kHz a 100kHz il t_{rise} non cambia poiché siamo ancora nelle specifiche garantite dal costruttore:



Variare la frequenza fa aumentare la corrente, purtroppo nel misurare ciò non è accaduto poiché c'è un errore riguardante la strumentazione utilizzata.