



**Università degli Studi di Bergamo**

SCUOLA DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica

## **Laboratorio di Elettronica**

Relazione esperienza di Laboratorio 2

Prof.  
**Luigi Gaioni**

Candidati  
**Davide Salvetti**  
Matricola 1057596

**Marco Rodolfi**  
Matricola 1040347

**Matteo Verzeroli**  
Matricola 1057926

# Laboratorio 2

In questa esperienza di laboratorio, si sono analizzati tre circuiti che svolgono la funzione di raddrizzatori grazie alla presenza di uno o più diodi (Fig.1.1). In particolare, si è utilizzato il diodo 1N4148 <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds12019.pdf>. Il diodo è un dipolo che permette di

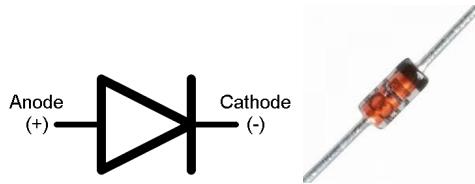


Figura 1.1: Rappresentazione simbolica di un diodo e foto del diodo 1N4148.

realizzare circuiti raddrizzatori grazie al suo comportamento che differisce in base alle condizioni del circuito in cui è inserito. In particolare, se la tensione all'anodo è maggiore di una certa tensione di soglia (che tipicamente si assume pari a 0.7 V) rispetto alla tensione a cui si trova il catodo, il diodo permette il passaggio di corrente dall'anodo al catodo. Al contrario, non è consentito il passaggio di corrente dal catodo all'anodo. Più precisamente, la relazione corrente-tensione è descritta dalla seguente legge esponenziale:

$$I_D = I_S [e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1], \quad (1.1)$$

dove  $I_D$  è la corrente nel diodo (con verso positivo dall'anodo al catodo),  $I_S$  è la corrente inversa,  $V_D$  è la differenza di tensione tra anodo e catodo mentre  $V_T$  è la tensione termica. In figura 1.2 è rappresentata la caratteristica corrente-tensione dei due modelli del diodo: quello ideale e quello reale. In particolare, si definisce regione di funzionamento diretta la condizione per cui il diodo è acceso e permette il passaggio di corrente da anodo a catodo ( $V_D > 0$ ) e regione inversa quando il diodo è spento e impedisce il passaggio di corrente (o più precisamente, la corrente è pari a  $-I_S$ ).

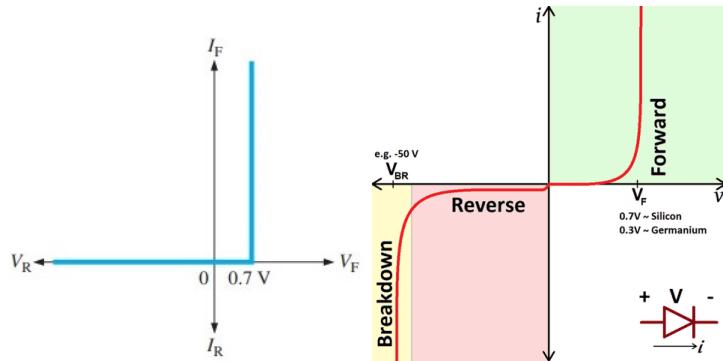


Figura 1.2: Caratteristica corrente-tensione del modello ideale (sinistra) e reale (destra) di un diodo.

Il primo circuito realizzato è un semplice raddrizzatore a singola semionda che utilizza un unico diodo e una resistenza. Lo schema del circuito è riportato in figura 1.3. Considerando il modello

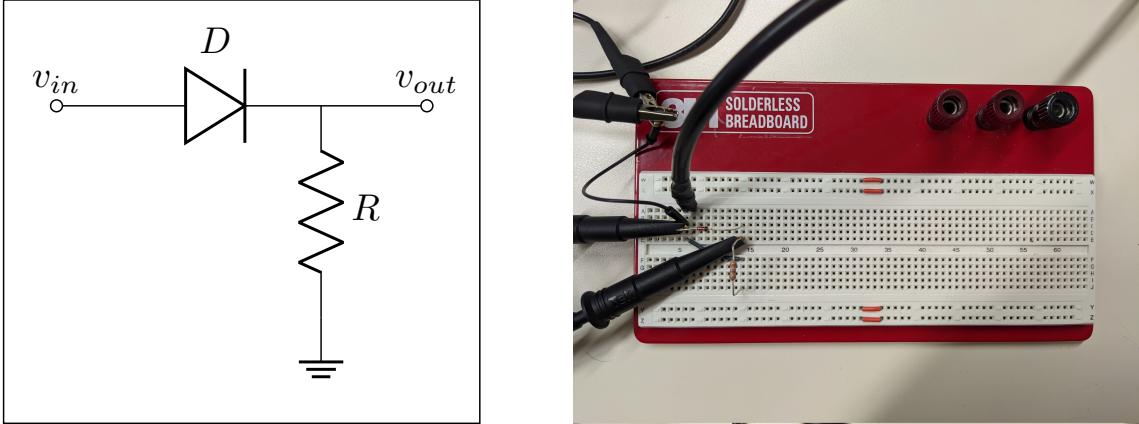


Figura 1.3: Schema circuitale del raddrizzatore a singola semionda e foto del circuito realizzato.

ideale del diodo, è possibile analizzare il comportamento del circuito quando in ingresso è applicata una tensione sinusoidale. Considerando una tensione di soglia del diodo pari a 0.7 V si ha che:

- se  $v_{in} < 0.7$  V allora  $v_{out} = 0$  V, poiché nel circuito non scorre corrente, nemmeno nella resistenza R che quindi mantiene a massa il nodo  $v_{out}$ ;
- se  $v_{in} \geq 0.7$  V il diodo D si accende, quindi il nodo  $v_{out}$  si porta a  $v_{out} = v_{in} - 0.7$  V.

Per analizzare il comportamento del circuito si sono effettuate delle misure tramite l'oscilloscopio sui nodi  $v_{in}$  e  $v_{out}$ , applicando in ingresso sul nodo  $v_{in}$  una sinusoide di ampiezza picco-picco pari a 2 V e variando il valore della resistenza e della frequenza del segnale in ingresso. Nella tabella 1.1 sono indicati i valori nominali e misurati delle resistenze utilizzate. È stata inoltre misurata, tramite il multimetro, la tensione di soglia del diodo scollegato dal circuito: essa è risultata essere pari a 0.618 V.

Componente	Valore Nominale	Valore Misurato
$R_1$	12 k $\Omega$	11.95 k $\Omega$
$R_2$	39 k $\Omega$	38.11 k $\Omega$
$R_3$	56 k $\Omega$	54.86 k $\Omega$
$R_4$	110 k $\Omega$	109.73 k $\Omega$

Tabella 1.1: Valori nominali e misurati delle resistenze utilizzate nel circuito.

Nella figura 1.4 sono rappresentate le differenti misure effettuate a frequenza fissa pari a 1 kHz, variando la resistenza utilizzata. Come si può osservare, in un diodo reale c'è una dipendenza della tensione di soglia dalla corrente che lo attraversa: infatti, aumentando la resistenza diminuisce la corrente che circola nel circuito e anche la tensione di soglia. Al contrario, diminuendo il valore della resistenza R aumenta la corrente che circola nel circuito e aumenta la tensione di soglia. Dalle misure, è possibile ottenere i valori delle tensioni di soglia confrontando i massimi dei segnali in ingresso e in uscita. Nella tabella 1.2 si riportano le tensioni di soglia misurate in funzione della resistenza utilizzata.

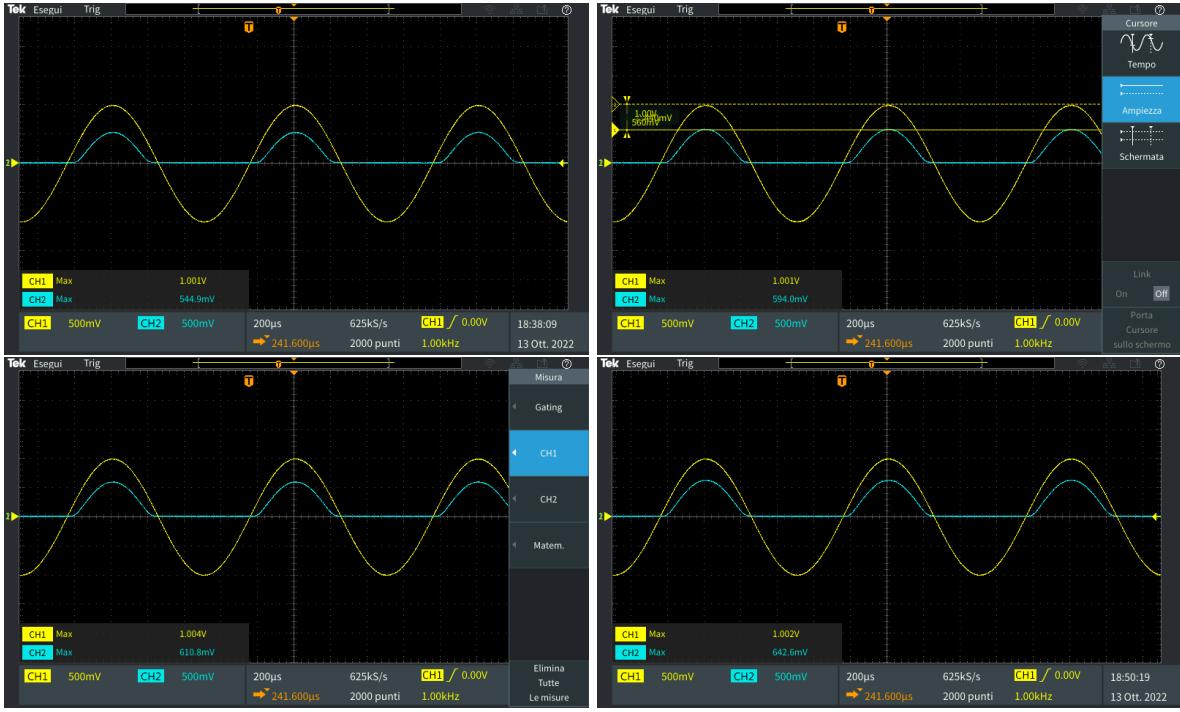


Figura 1.4: Misure del segnale in ingresso (linea gialla) e del segnale in uscita (linea azzurra) al circuito. Il segnale in ingresso è una sinusode di 2 V picco-picco e frequenza pari a 1 kHz. La resistenza invece è pari a 12 k $\Omega$  (in alto a sinistra), 39 k $\Omega$  (in alto a destra), 56 k $\Omega$  (in basso a sinistra) e 110 k $\Omega$  (in basso a destra).

Resistenza	Valore Nominale	Tensione di soglia
R <sub>1</sub>	12 k $\Omega$	455 mV
R <sub>2</sub>	39 k $\Omega$	407 mV
R <sub>3</sub>	56 k $\Omega$	393 mV
R <sub>4</sub>	110 k $\Omega$	359 mV

Tabella 1.2: Tensione di soglia del diodo in funzione della resistenza usata.

Successivamente si è analizzato il comportamento in frequenza del circuito, variando la frequenza della sinusode in ingresso. Per le misure, si sono scelte le frequenze di 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz e 1 MHz (Fig.1.5). Osservando le acquisizioni si nota che aumentando la frequenza il segnale in uscita presenta una semionda distorta. In particolare, si può notare che il diodo riesce a seguire abbastanza bene il fronte di salita del segnale in ingresso (il diodo in questa fase si accende). Tuttavia, il diodo non è sufficientemente veloce nella fase di spegnimento: il segnale in uscita dal diodo non riesce a seguire perfettamente il segnale in ingresso, presentando una dinamica più lenta. Questo comportamento asimmetrico è presente a causa dei differenti tempi di accensione e spegnimento che caratterizzano un diodo reale. Questi intervalli sono determinati dai tempi necessari alla formazione ed eliminazione della regione di svuotamento nella giunzione P-N durante il passaggio dalla regione diretta a quella inversa del diodo.

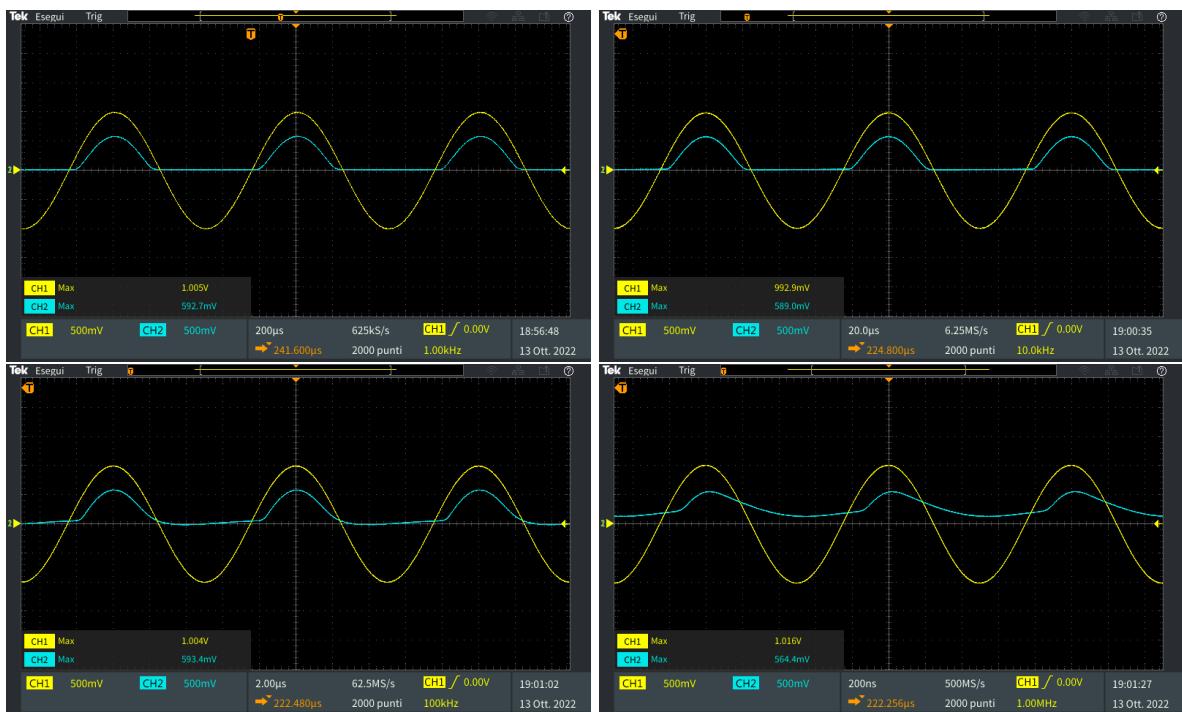


Figura 1.5: Misure del segnale in ingresso (linea gialla) e del segnale in uscita (linea azzurra) al circuito. La resistenza è fissa in tutti e quattro i grafici ed è pari a  $39\text{ k}\Omega$  mentre la frequenza del segnale in ingresso è pari a 1 kHz (in alto a sinistra), 10 kHz (in alto a destra), 100 kHz (in basso a sinistra) e 1 MHz (in basso a destra).

Un problema del circuito precedente è la presenza di un offset significativo tra la tensione  $v_{in}$  e  $v_{out}$ : tale valore è pari alla tensione di soglia del diodo che varia a seconda delle condizioni del circuito in cui il diodo è inserito. Per eliminare questo problema si può utilizzare un circuito diverso che, utilizzando un amplificatore operazionale, consente di eliminare l'offset. Lo schema del circuito è presentato in figura 1.6.

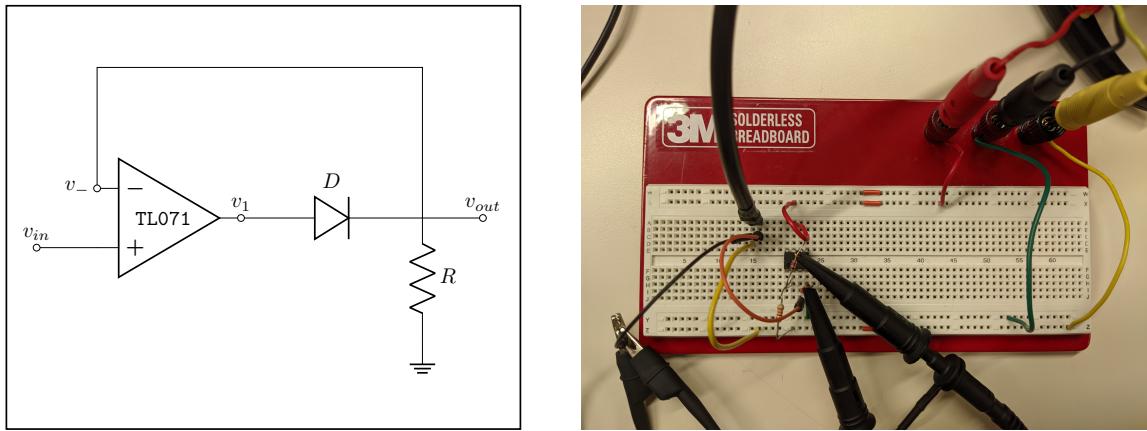


Figura 1.6: Schema circuitale del raddrizzatore a singola semionda con amplificatore operazionale e foto del circuito realizzato.

Per analizzare il circuito, è utile considerarne il comportamento in due casi:

- se  $v_{in} \geq 0$ , il diodo  $D$  è acceso e il circuito si comporta come un buffer di tensione. Essendo  $v_{out} = v_{in} > 0$ , avremo una corrente nella resistenza  $R$  che scorre verso massa. Questa corrente è fornita dall'amplificatore operazionale e quindi polarizza il diodo. La tensione  $v_1$  sarà invece pari a  $v_1 = v_{out} + V_D = v_{out} + 0.7\text{ V}$ ;
- se  $v_{in} < 0$ , il diodo  $D$  è spento e l'amplificatore operazionale non è più retroazionato. All'interno della resistenza non scorre corrente e quindi il nodo  $v_{out}$  è mantenuto a una tensione di 0 V. In questo caso, l'amplificatore operazionale si comporta come un comparatore: essendo  $v_{in}$  negativa,  $v_1$  si porta alla tensione di saturazione negativa dell'amplificatore.

In figura 1.7 è possibile osservare le misure di  $v_{in}$  e  $v_1$  eseguite per mezzo dell'oscilloscopio. Si noti inoltre che, tramite la funzione *Min* dell'oscilloscopio, è stata misurata la tensione di saturazione negativa dell'amplificatore operazionale, che è pari a  $-8.589\text{ V}$ . Successivamente, si è mantenuto costante il valore di  $R$ , mentre si è variata la frequenza del segnale in ingresso (Fig.1.8). Ancora una volta, si nota che aumentando la frequenza del segnale in ingresso, il circuito tende a deformare il segnale in uscita sino a non funzionare più ad una frequenza di 1 MHz.

Analizzando più in dettaglio il comportamento del circuito, si nota un ritardo di circa  $4.08\text{ }\mu\text{s}$  sul fronte di salita dell'uscita rispetto all'ingresso (Fig.1.9). Questo andamento è causato dal fatto che, non appena  $v_{in}$  diventa maggiore di zero, l'uscita deve saltare dalla tensione di saturazione negativa al valore del segnale in ingresso. Il tempo necessario all'amplificatore per effettuare questa transizione è regolato da un parametro tipico degli amplificatori operazionali definito *slew rate*: tale parametro indica la velocità massima con cui l'amplificatore operazionale può far variare la tensione alla sua uscita. Per questo motivo, lo *slew rate* è misurato in  $\frac{\text{V}}{\mu\text{s}}$  ed è specificato dal produttore all'interno del datasheet. Nel caso dell'amplificatore **TL071**, questo parametro può assumere valori da  $8\text{ }\mu\text{s}$  a  $16\text{ }\mu\text{s}$ . Si è cercato di stimare lo *slew rate* nel circuito realizzato facendo il rapporto della differenza tra il valore finale raggiunto e la tensione di saturazione negativa con il tempo necessario ad effettuare questa transizione (Fig.1.10):

$$SR = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{9.64 \text{ V}}{1.72 \mu\text{s}} = 5.6 \frac{\text{V}}{\mu\text{s}}. \quad (1.2)$$

Il valore, pur non rientrando nell'intervallo specificato nel datasheet, assume un valore prossimo.

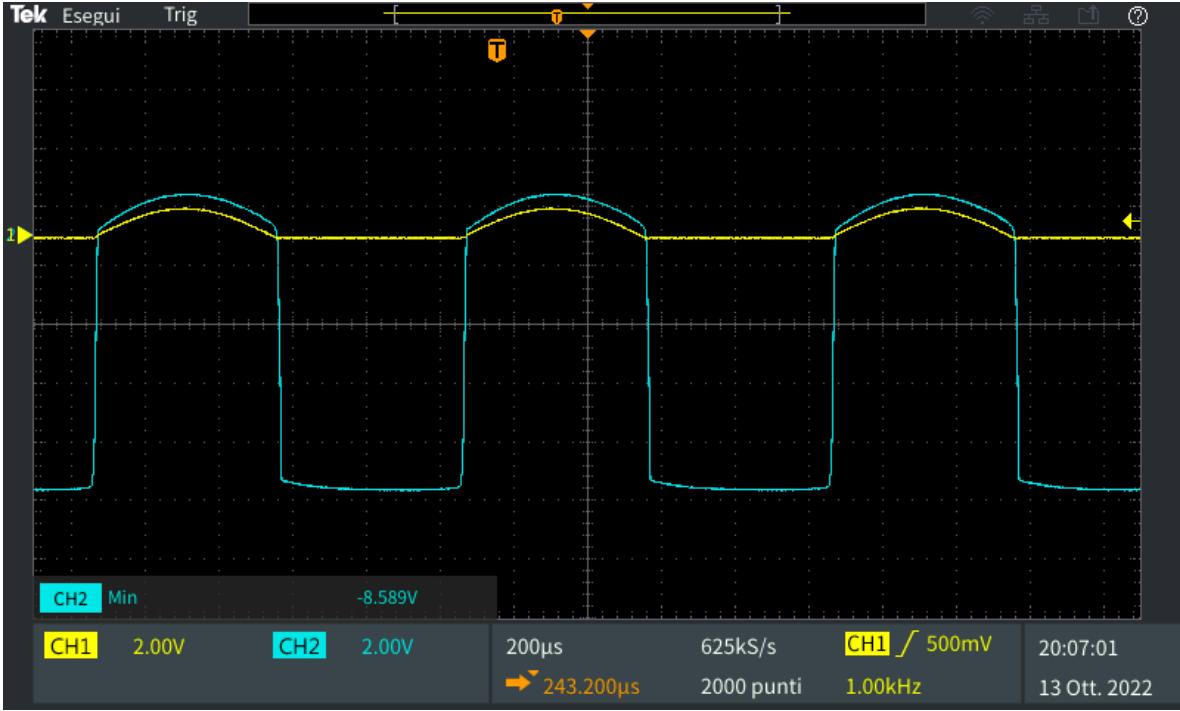


Figura 1.7: Misure del segnale  $v_{in}$  (linea gialla) e del segnale  $v_1$  (linea azzurra). Si è utilizzata in ingresso un segnale sinusoidale di ampiezza picco-picco 2 V con frequenza pari a 1 kHz.



Figura 1.8: Misure del segnale  $v_{out}$  (linea gialla) e del segnale  $v_1$  (linea azzurra). Si è utilizzato in ingresso un segnale sinusoidale con ampiezza picco-picco di 2 V e frequenza di 1 kHz (in alto a sinistra), 10 kHz (in alto a destra), 100 kHz (in basso a sinistra) e 1 MHz (in basso a destra).

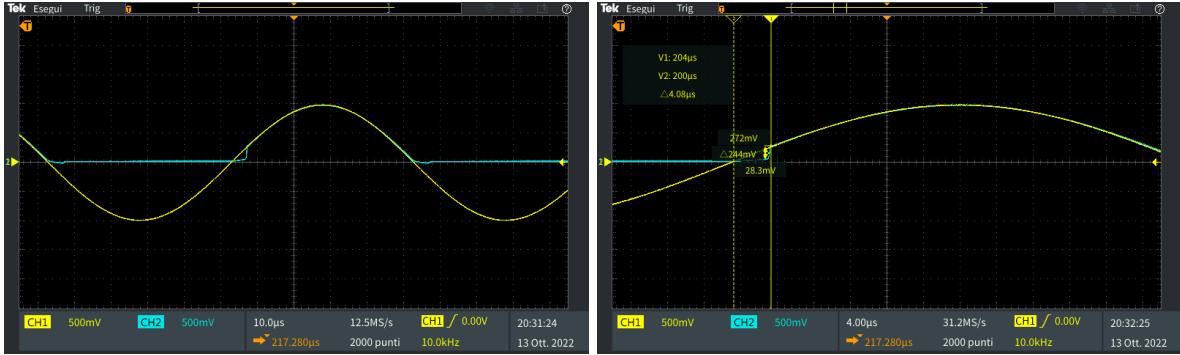


Figura 1.9: Misure del segnale  $v_{in}$  (linea gialla) e del segnale  $v_{out}$  (linea azzurra). Si può osservare il fenomeno dello *slew rate* con un ritardo tra segnale in ingresso e uscita di circa  $4.08 \mu s$  (figura a destra).

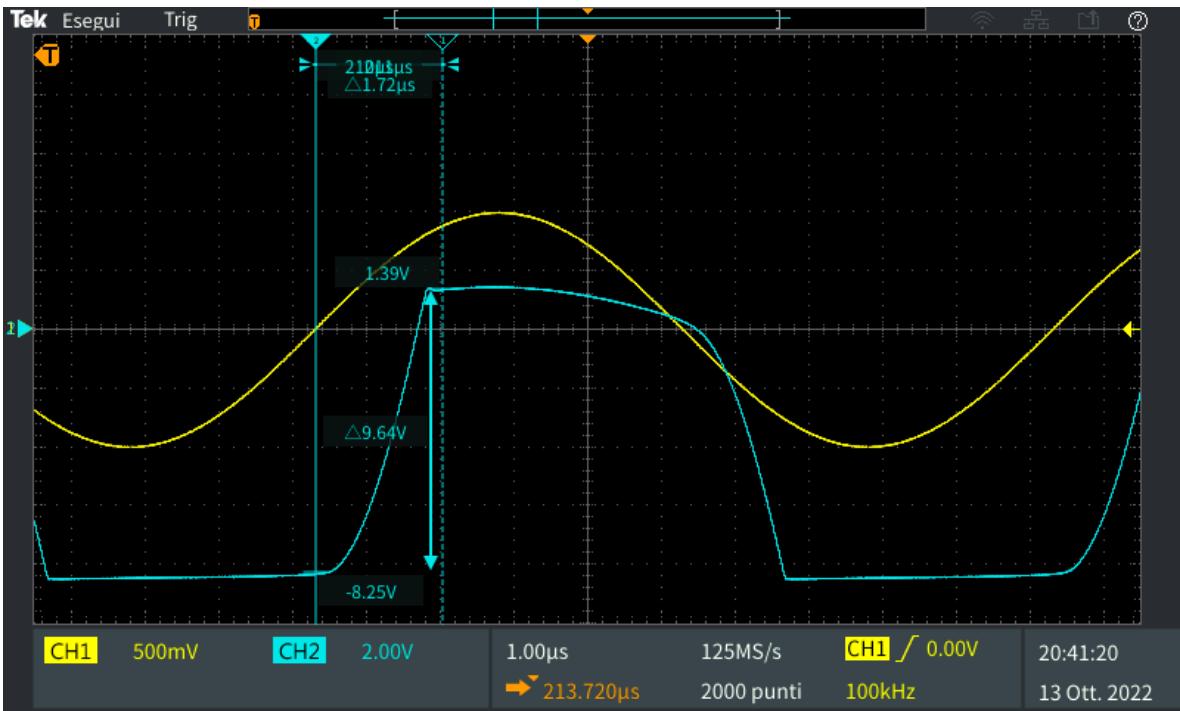


Figura 1.10: Misure del segnale  $v_{in}$  (linea gialla) e del segnale  $v_{out}$  (linea azzurra). Si è utilizzata in ingresso un segnale sinusoidale di ampiezza picco-picco 2 V con frequenza pari a 10 kHz. Sono stati utilizzati i cursori forniti dall'oscilloscopio per ottenere le variabili necessarie al calcolo dello *slew rate*.

Il circuito appena presentato elimina il problema dell'offset tra l'ingresso e l'uscita, ma introduce il ritardo causato dallo *slew rate*. Inoltre, la semionda negativa viene completamente persa. Di seguito, si riporta lo schema del terzo circuito realizzato in laboratorio (Fig.1.11). Esso svolge la funzione di raddrizzatore a doppia semionda, risolvendo il problema causato dallo *slew rate*; tuttavia, introduce un offset tra ingresso e uscita.

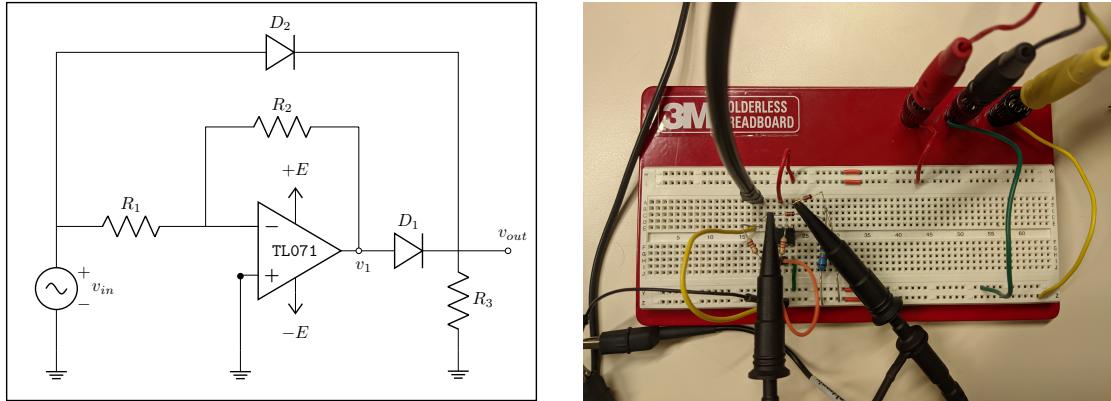


Figura 1.11: Schema circuitale del raddrizzatore a doppia semionda e foto del circuito realizzato.

Si sono utilizzati due diodi 1N4148 con tensioni di soglia misurate pari a 620 mV per  $D_1$  e 622 mV per  $D_2$  mentre si riportano nella tabella 1.3 i valori nominali e misurati delle resistenze utilizzate.

Componente	Valore Nominale	Valore Misurato
$R_1$	12 k $\Omega$	11.95 k $\Omega$
$R_2$	12 k $\Omega$	11.95 k $\Omega$
$R_3$	12 k $\Omega$	11.97 k $\Omega$

Tabella 1.3: Valori nominali e misurati delle resistenze utilizzate nel circuito. Il valore di  $R_3$  è la risultante del parallelo di due resistenze da 24 k $\Omega$ .

Si può analizzare il circuito in tre condizioni:

- $v_{in} \geq 0.7$  V: in questo caso il diodo  $D_2$  è acceso mentre il diodo  $D_1$  è spento. Infatti, si può riconoscere che l'amplificatore operazionale è in configurazione di amplificatore invertente con guadagno unitario (pari a  $\frac{R_2}{R_1} \approx 1$ ). Per cui, avremo che  $v_1 = -v_{in}$ . Per questo  $D_1$  è spento, mentre scorrerà corrente in  $D_2$  verso massa attraverso la resistenza  $R_3$ ;
- $v_{in} \leq -0.7$  V:  $D_2$  sarà spento in quanto la tensione tra anodo e catodo è inferiore alla tensione di soglia, mentre  $D_1$  sarà acceso, in quanto  $v_1 = -v_{in} > 0.7$  V. Per cui,  $v_{out} = v_1 - 0.7$  V =  $-v_{in} - 0.7$  V;
- $-0.7$  V <  $v_{in} < 0.7$  V: entrambi i diodi sono spenti e quindi  $v_{out} = 0$  V.

Nelle figure 1.12 e 1.13 sono messi in evidenza il comportamento della tensione al nodo  $v_{out}$  e al nodo  $v_1$ .

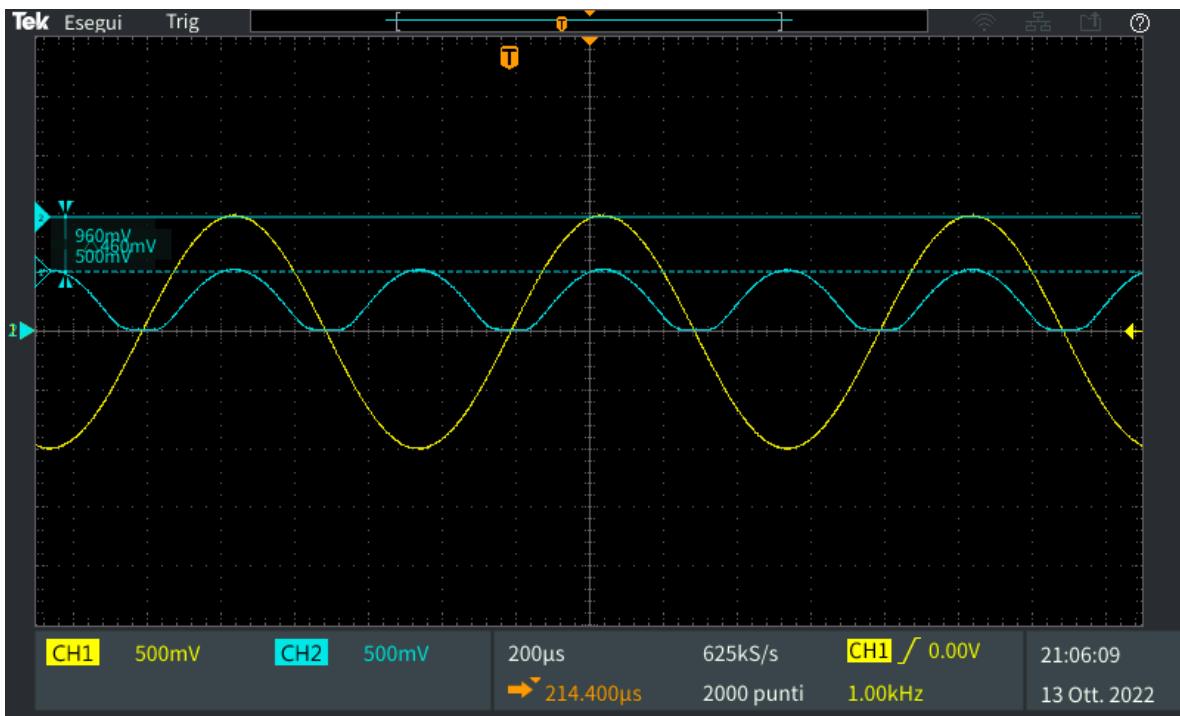


Figura 1.12: Misure del segnale  $v_{in}$  (linea gialla) e del segnale  $v_{out}$  (linea azzurra). Si è utilizzato in ingresso un segnale sinusoidale di ampiezza picco-picco 2 V con frequenza pari a 1 kHz.

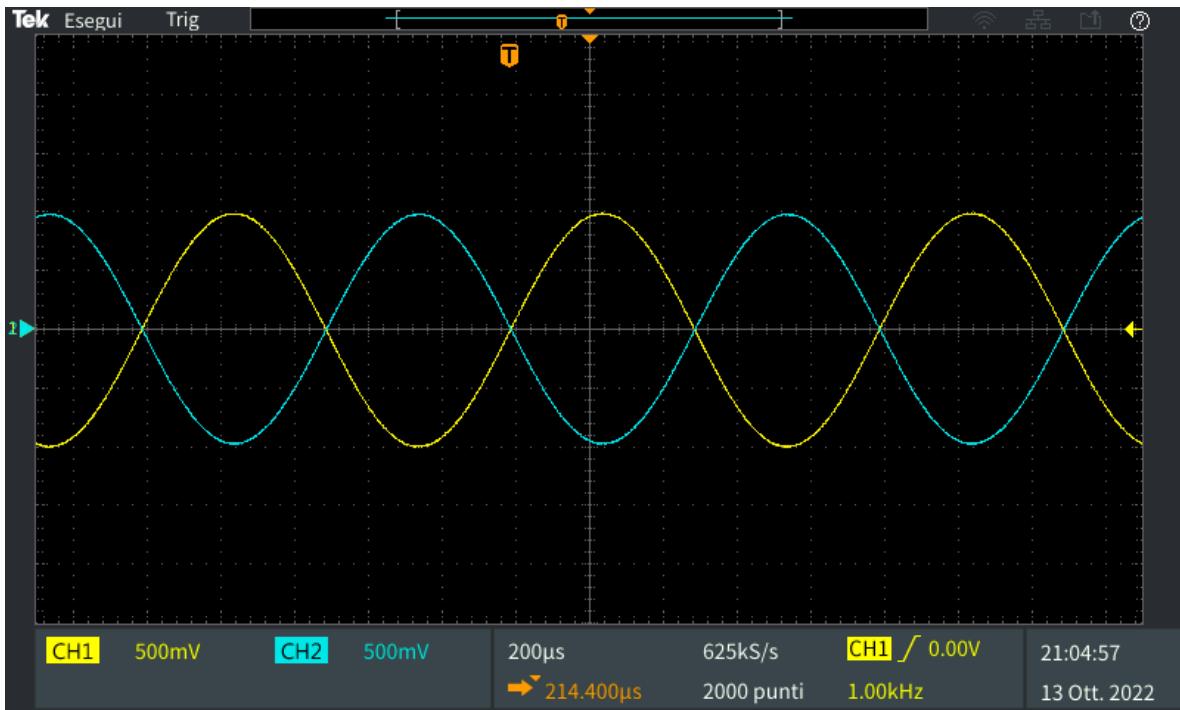


Figura 1.13: Misure del segnale  $v_{in}$  (linea gialla) e del segnale  $v_1$  (linea azzurra). Si è utilizzato in ingresso un segnale sinusoidale di ampiezza picco-picco 2 V con frequenza pari a 1 kHz.

Questa configurazione permette di rendere indipendente le prestazioni in frequenza del raddrizzatore dallo *slew rate* del particolare amplificatore operazionale utilizzato. Infatti, la dipendenza del circuito precedente da questo parametro era causata dal fatto che veniva interrotta la retroazione per  $v_{in} < 0$  V, portando l'uscita alla saturazione negativa. In questo circuito, l'amplificatore è sempre retroazionato e quindi la sua uscita non satura. Per questo motivo, il comportamento in frequenza del circuito dipende solamente dai tempi di accensione e spegnimento dei diodi utilizzati.

Per analizzare il comportamento in frequenza del circuito sono state fatte delle misure variando la frequenza del segnale sinusoidale da 1 kHz a 1 MHz (Fig.1.14).

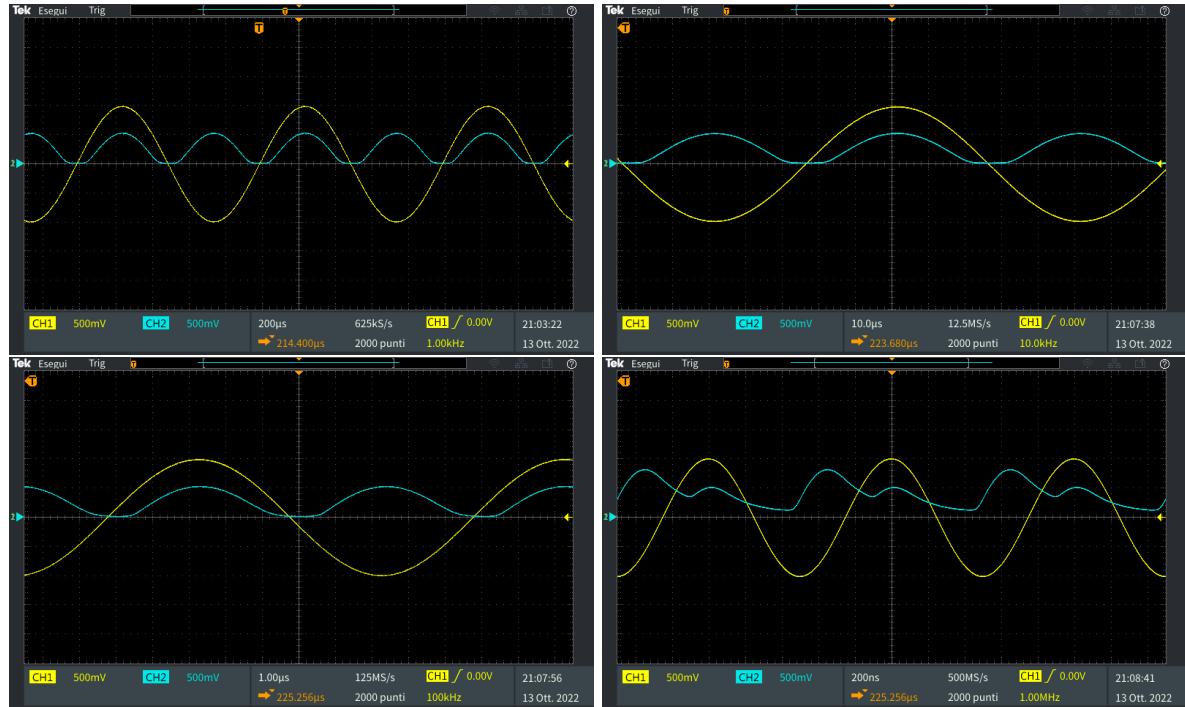


Figura 1.14: Misure del segnale  $v_{in}$  (linea gialla) e del segnale  $v_{out}$  (linea azzurra). Si è utilizzato in ingresso un segnale sinusoidale con ampiezza picco-picco di 2 V e frequenza di 1 kHz (in alto a sinistra), 10 kHz (in alto a destra), 100 kHz (in basso a sinistra) e 1 MHz (in basso a destra).

Dai risultati ottenuti si può osservare come, fino alla frequenza di 100 kHz, il circuito funziona ancora correttamente presentando in uscita una leggera distorsione del segnale. Alla frequenza di 1 MHz, il segnale in uscita presenta una forte distorsione e il circuito non funziona più come un raddrizzatore. Infatti, analizzando più precisamente l'andamento di  $v_1$  e  $v_{in}$  (Fig.1.15), notiamo come il segnale  $v_1$  presenta uno sfasamento e, al contrario delle aspettative, presenta anche un fattore di amplificazione. Questo comportamento è complesso da descrivere in quanto bisognerebbe considerare il comportamento in frequenza dell'amplificatore operazionale e dei componenti passivi.

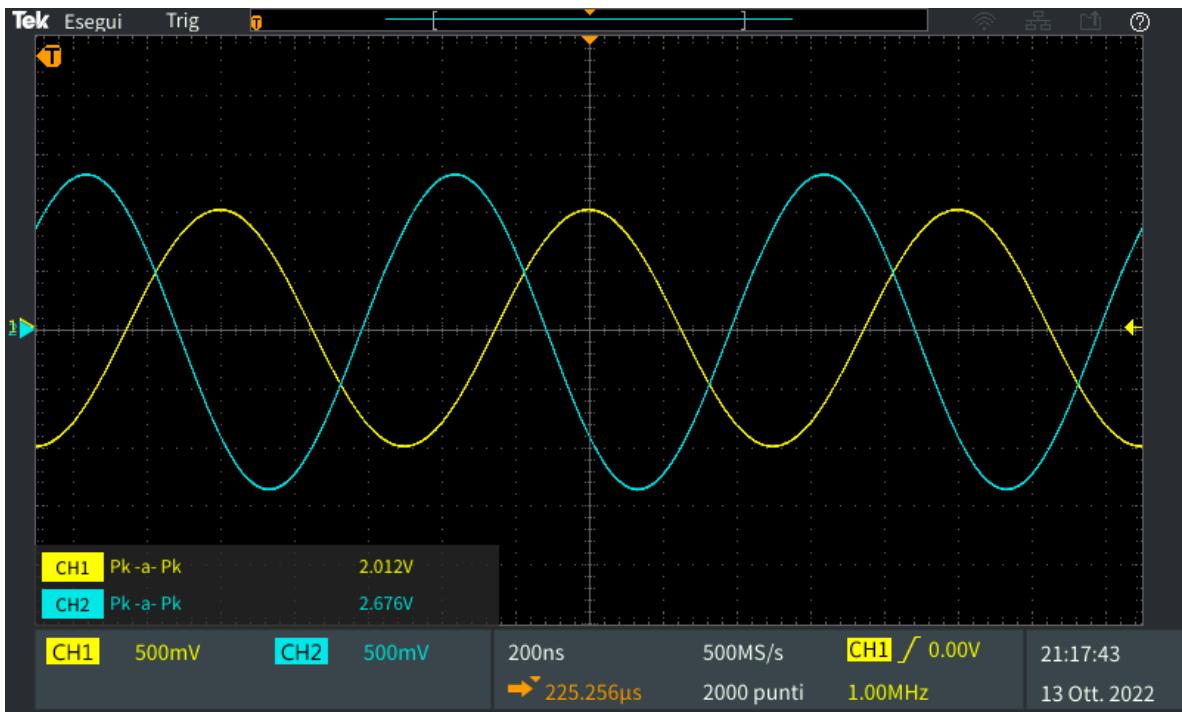


Figura 1.15: Misure del segnale  $v_{in}$  (linea gialla) e del segnale  $v_1$  (linea azzurra). Si è utilizzato in ingresso un segnale sinusoidale di ampiezza picco-picco 2 V con frequenza pari a 1 MHz. Si può notare che il segnale  $v_1$  è amplificato rispetto a  $v_{in}$ .