

# Esercitazione 9 - Gruppo BG

## Oscillatore sinusoidale a ponte di Wien con OpAmp

Tommaso Pajero

Alessandro Podo

11 dicembre 2014

L'esercitazione si prefigge come scopo la realizzazione di un oscillatore a onda sinusoidale a ponte di Wien, utilizzando un amplificatore operazionale modello TL081 alimentato a  $\pm 15$  V.

### 1. Montaggio del circuito e misura del *loop gain* $\beta A_V$

Si è montato il circuito in figura 1 utilizzando  $R_1 = 9.85 \pm 0.08$  k $\Omega$ ,  $R_2 = 9.69 \pm 0.08$  k $\Omega$ ,  $R_3 = 9.89 \pm 0.08$  k $\Omega$ ,  $R_4 = 9.89 \pm 0.08$  k $\Omega$ ,  $R_5 = 9.94 \pm 0.08$  k $\Omega$ ,  $R_1 = 9.85 \pm 0.08$  k $\Omega$ ,  $R_{P,MAX} = 10.13 \pm 0.08$  k $\Omega$ ,  $C_1 = 9.7 \pm 0.4$  nF e  $C_2 = 9.8 \pm 0.4$  nF. Dunque ci si attende per i due circuiti  $R_1C_1$  e  $R_2C_2$  frequenze di taglio  $f_1 = 1/(2\pi R_1C_1) = 1.67 \pm 0.07$  kHz e  $f_2 = 1/(2\pi R_2C_2) = 1.68 \pm 0.07$  kHz.

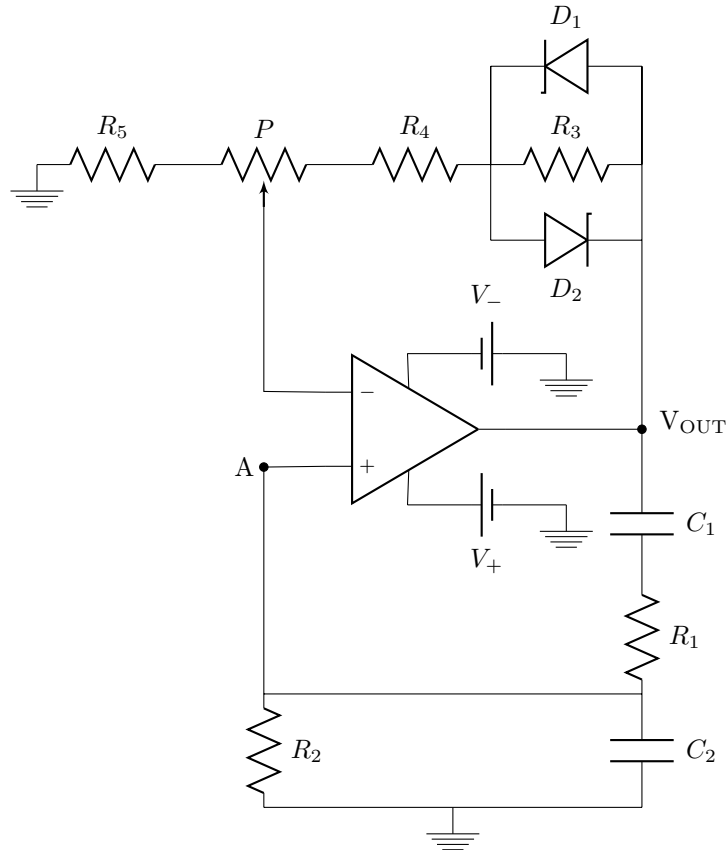


Figura 1: Circuito oscillatore a ponte di Wien realizzato con un OpAmp modello TL081.

Si è scollegato il punto A dall'ingresso non invertente dell'OpAmp, al quale si è mandato (tramite il generatore di funzioni) un segnale  $V_+$  sinusoidale di frequenza variabile fra 500 Hz e 3 kHz (intervallo comprendente la frequenza d'interesse per il circuito  $f_1 \simeq f_2$ ). Nella tabella 1 si riportano i valori di  $V_+$ ,  $V_A$ , dello sfasamento fra tali segnali  $\phi^1$  e del loro rapporto  $A_V = V_A/V_+$ . Si sono inoltre graficati i diagrammi di Bode per l'amplificazione e per lo sfasamento, rispettivamente in figura 2 e 3.

Assumendo che le frequenze  $f_1$  e  $f_2$  siano uguali e pari a  $f_{0,ATT} = 1.68 \pm 0.07$  kHz (tale assunzione è giustificata dal fatto che  $f_1$  e  $f_2$  sono largamente compatibili con questo valore entro l'incertezza), ci si aspetterebbe

<sup>1</sup>Si è scelta come convenzione che, se  $V_+ \sim \sin(\omega t)$ , allora  $V_A \sim \sin(\omega t + \phi)$ .

Tabella 1: Dati relativi all'oscillatore a ponte di Wien rappresentato in figura 1, in cui si è scollegato il nodo A dall'entrata non invertente dell'OpAmp, alla quale si è mandata una tensione sinusoidale in ingresso  $V_+$ .

$f$ [kHz]	$\sigma_f$ [kHz]	$\phi$ $\pi rad$	$\sigma_\phi$ $\pi rad$	$V_+$ [mV]	$\sigma_{V_+}$ [mV]	$V_A$ [mV]	$\sigma_{V_A}$ [mV]	$\beta A_V$	$\sigma_{\beta A_V}$
0.497	0.005	0.250	0.005	258	9	157	5	0.61	0.03
0.684	0.007	0.186	0.006	259	9	186	6	0.72	0.03
1.01	0.01	0.107	0.002	260	9	212	7	0.82	0.04
1.19	0.01	0.073	0.001	261	9	220	8	0.84	0.04
1.33	0.01	0.049	0.001	261	9	224	8	0.86	0.04
1.51	0.02	0.0199	0.0007	261	9	226	8	0.87	0.04
1.70	0.02	-0.0034	0.0003	261	9	226	8	0.87	0.04
1.94	0.02	-0.0318	0.0008	262	9	226	8	0.86	0.04
2.17	0.02	-0.056	0.001	262	9	224	8	0.85	0.04
2.58	0.03	-0.093	0.001	262	9	218	8	0.83	0.04
3.03	0.03	-0.127	0.002	263	9	211	7	0.80	0.04

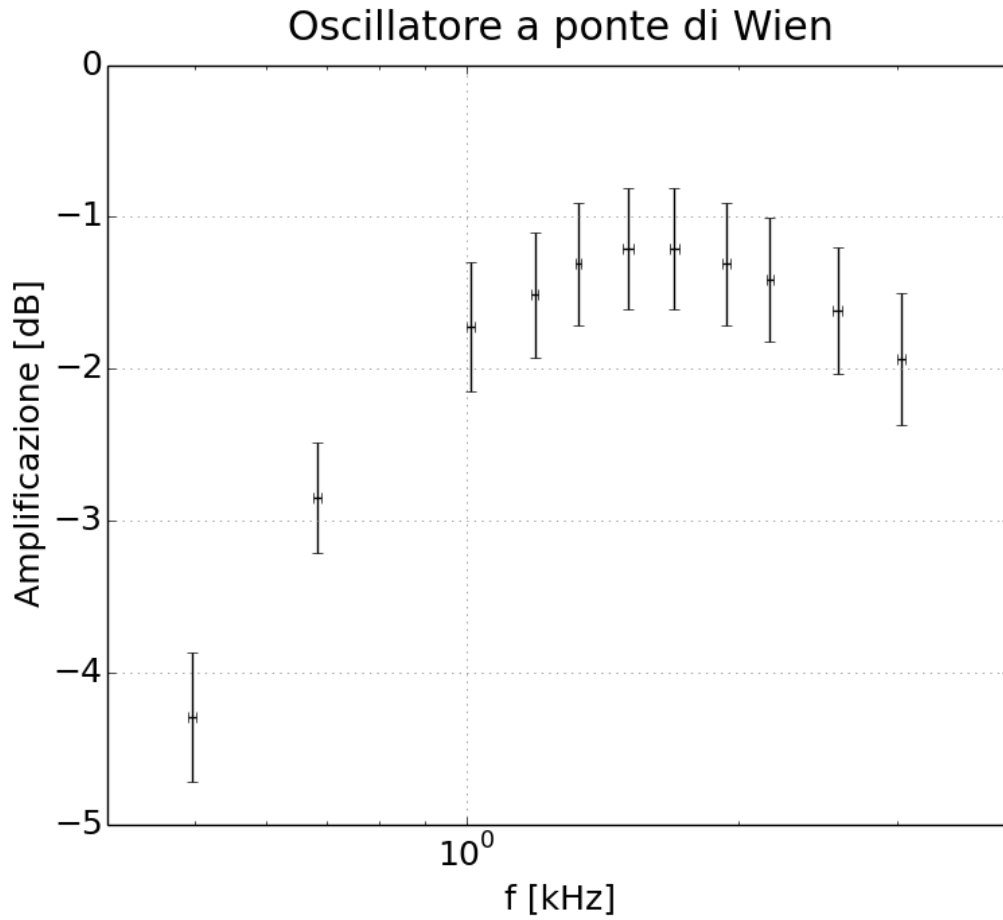


Figura 2: Diagramma di Bode relativo al circuito in figura 1, in cui si è scollegato il nodo A dall'entrata non invertente dell'OpAmp, e all'amplificazione  $A_V = V_+/V_A$ .

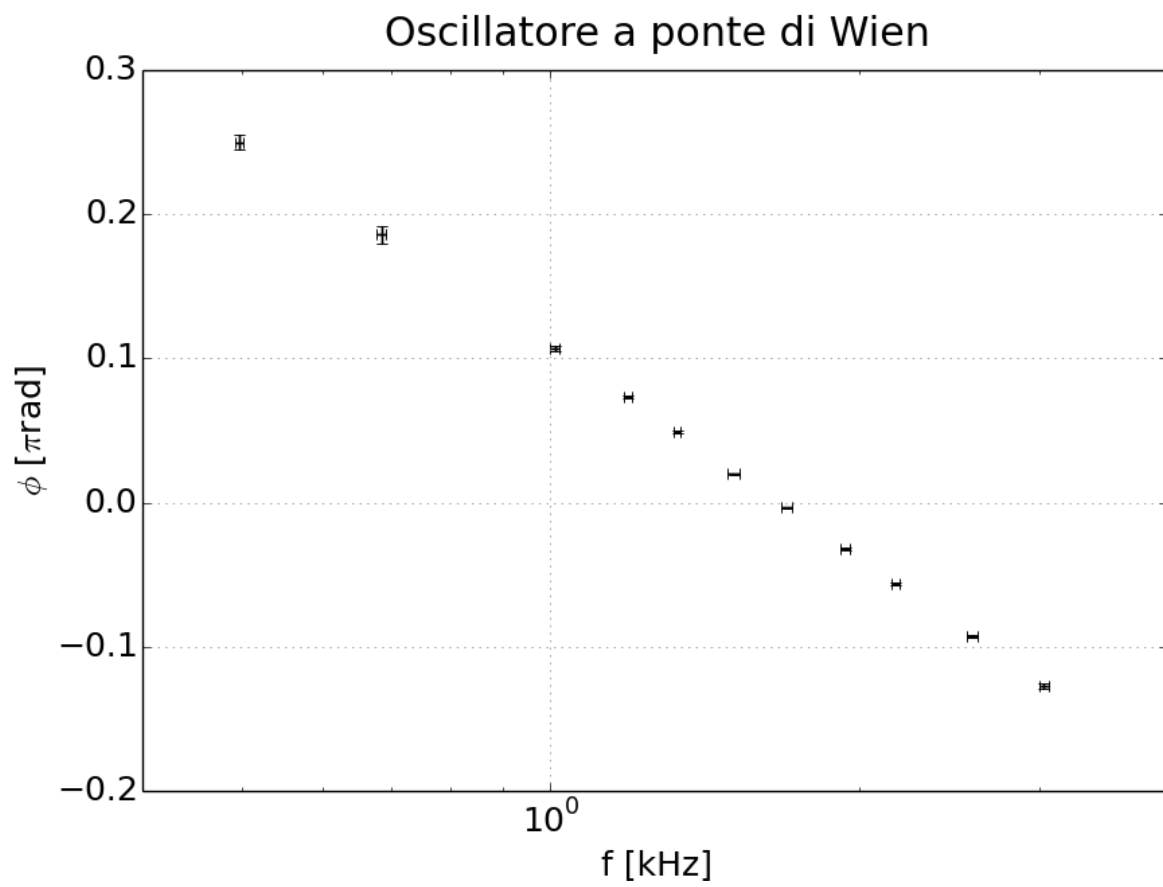


Figura 3: Diagramma di Bode per lo sfasamento, relativo al circuito in figura 1 in cui si è scollegato il nodo A dall'entrata non invertente dell'OpAmp, alla quale si è mandata una tensione sinusoidale in ingresso  $V_+$ .

che lo sfasamento si debba annullare proprio per tale frequenza<sup>2</sup>. Effettivamente, il fit lineare dello sfasamento in funzione del logaritmo in base dieci della frequenza per i dati in esame fornisce come valore per il quale lo sfasamento si annulla  $f_0 = 1.67 \pm 0.01$  kHz ( $\chi^2_{\text{rid}} = 0.67$ ), in ottimo accordo con le attese.

Si nota, inoltre, che  $\beta A_V$  ha un massimo sempre in corrispondenza della frequenza  $f_0$ , in accordo con le attese. Il suo valore, tuttavia, è minore di 1, poiché i dati sono stati presi con la resistenza del potenziometro posta quasi tutta nella direzione di  $R_5$ , configurazione per la quale  $A_3$  è minore di 3.

Si è infine variata la posizione della vite del potenziometro, osservando che l'ampiezza del segnale in uscita  $V_{\text{OUT}}$  diminuiva all'aumentare della frazione  $\alpha$  di resistenza  $R_{P,\text{MAX}}$  posta verso  $R_5$ , in accordo con le attese (a un tale aumento corrisponde una diminuzione del rapporto di amplificazione  $A_V = \frac{R_3/R_{\text{diodo}} + R_4 + R_{P,\text{MAX}} + R_5}{\alpha R_{P,\text{MAX}} + R_5}$ ).

## 2. Comportamento del circuito al variare della posizione del potenziometro

Si è scollegato il generatore di funzioni dal nodo A, che è stato ricollegato all'ingresso non invertente dell'OpAmp. Si è osservato il segnale in uscita  $V_{\text{OUT}}$  al diminuire della frazione della resistenza del potenziometro posta verso  $R_5$ , notando che:

1. Inizialmente si osserva solo rumore a piccola ampiezza (inferiore a qualche decina di mV).
2. Dopo aver dato circa due terzi di giro alla vite, si inizia a osservare, con un passaggio molto netto, un segnale pressoché sinusoidale (vi è in realtà una piccola distorsione, osservabile in figura 4) di ampiezza picco-picco circa pari a 1.6 V.
3. Ruotando ulteriormente la vite, l'ampiezza aumenta<sup>3</sup> fino a presentare clipping, fatto che avviene quasi a fine corsa (v. figura 5).

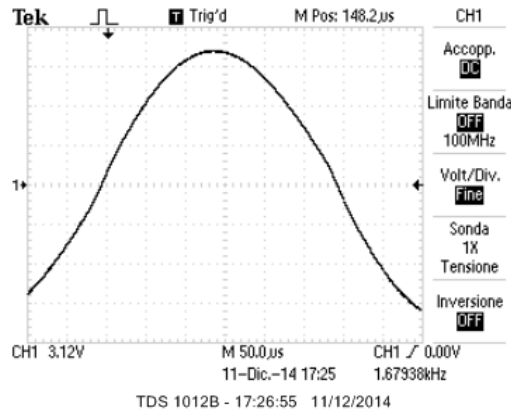


Figura 4: Distorsione del segnale in uscita  $V_{\text{OUT}}$  relativo al circuito in figura 1.

## 3. Misura della frequenza di oscillazione

Si è misurata la frequenza di oscillazione del circuito per mezzo dei cursori, ottenendo  $f = 1.676 \pm 0.009$  kHz, compatibile con  $f_{0,\text{ATT}} 1.68 \pm 0.07$  kHz. Si è inoltre notato che tale frequenza risulta costante entro l'1% al variare della posizione del potenziometro e al variare della tensione di alimentazione, purché si faccia attenzione a regolare il potenziometro in modo da evitare fenomeni di clipping (in corrispondenza dei quali la frequenza varia in maniera più pronunciata). Infatti, per tensioni di alimentazione basse (dell'ordine dei 3V), l'amplificatore corre il rischio di finire in saturazione<sup>4</sup>, sebbene il suo guadagno sia limitato.

<sup>2</sup>Questo fatto si ricava facilmente dalla condizione di Barkhausen  $A\beta = 1$ , avendo notato che  $\beta = \frac{s\omega_0}{s^2 + 3\omega_0 s + \omega_0^2}$ .

<sup>3</sup>Infatti, se non ci fossero i diodi, ruotando la vite del potenziometro si aumenterebbe l'amplificazione del segnale in ingresso. Invece, affinché ci sia un'oscillazione stabile, serve  $A_V = 3$ . Dunque la resistenza dinamica dei diodi deve diminuire, e ciò corrisponde a un aumento della corrente che scorre attraverso di essi e, in definitiva, a un aumento di  $V_{\text{OUT}}$  (per ulteriori chiarificazioni si veda il punto 6).

<sup>4</sup>Infatti, poiché le correnti in gioco sono in questo caso piuttosto piccole, può capitare che la resistenza dinamica dei diodi non possa diminuire abbastanza da abbassare il valore di  $A_V$  fino a 3, valore atteso nel caso di un'oscillazione sinusoidale (cfr. la nota precedente).

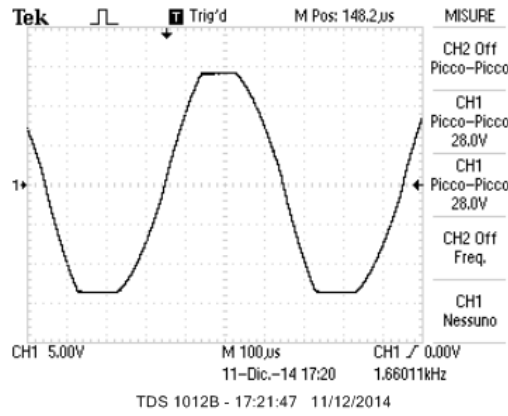


Figura 5: Clipping del segnale in uscita  $V_{OUT}$  dal circuito in figura 1, per  $\alpha = 0$ .

#### 4. Misura del guadagno $A_V$ open loop

Si è ruotata la vite del potenziometro portandola in corrispondenza del punto di innesco dell'oscillazione e si è disconnesso il circuito di retroazione dall'ingresso non invertente. Si è quindi inviato un segnale sinusoidale di ampiezza  $V_+ = 0.25 \pm 0.01$  V a tale ingresso. Dalla misura del segnale in uscita  $V_{OUT} = 0.78 \pm 0.02$  V si è infine ricavato il valore del guadagno a loop aperto  $A_V = 3.12 \pm 0.15$ . Da un'analisi teorica del circuito in esame si vede che affinché sia soddisfatta la condizione di Barkhausen  $|\beta A| = 1$  è necessario che  $A_{V,ATT} = 3$ . Il valore misurato risulta compatibile entro l'incertezza con questo valore.

#### 5. Rimozione dei diodi

Si è infine osservato il funzionamento del circuito in assenza dei diodi  $D_1$  e  $D_2$  in parallelo alla resistenza  $R_3$ . In questo caso si notano fenomeni di clipping per tutte le posizioni del potenziometro in corrispondenza delle quali il comportamento del segnale  $V_{OUT}$  è di tipo oscillatorio (v. figura 6).

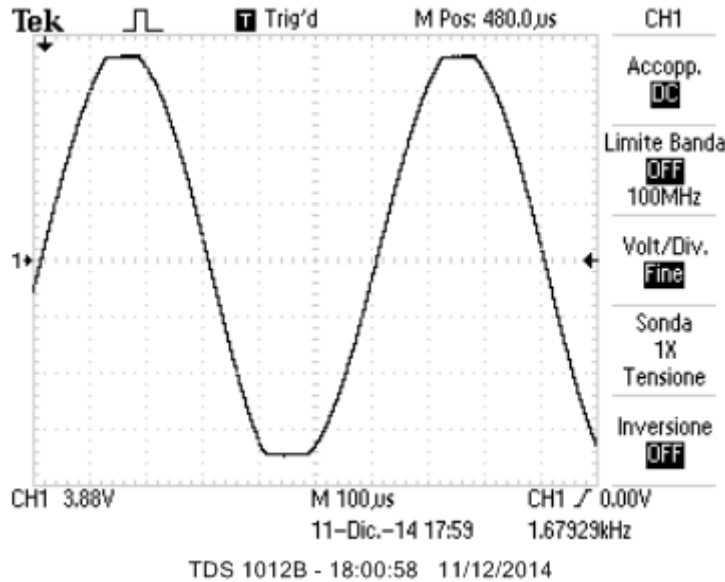


Figura 6: Comportamento del circuito oscillatore in assenza dei diodi.

Questo comportamento è dovuto al fatto che in assenza dei diodi il circuito non è stabile in ampiezza. Infatti, affinché si abbia un'oscillazione che non decada rapidamente a zero né porti l'OpAmp a immediata saturazione, è necessario che il guadagno a loop chiuso sia idealmente pari all'unità. Nella pratica, tale guadagno deve essere necessariamente maggiore di uno, seppur di poco. In assenza dei diodi  $|\beta A_V|$  è indipendente dall'ampiezza del segnale; perciò, il meccanismo di feedback positivo fa sì che il segnale si amplifichi sempre più fino a quando l'OpAmp non va in saturazione. I diodi, essendo dei componenti non lineari, permettono di evitare questo problema. Infatti la resistenza dinamica a essi associata dipende dalla differenza di potenziale applicata ai loro

capi e, in particolare, è grande se la differenza di potenziale è piccola ed è piccola se la differenza di potenziale è grande. A causa di questo fatto, l'amplificazione del circuito è dipendente dall'ampiezza del segnale e per segnali piccoli è maggiore di 1 (come se non ci fossero i diodi) mentre per segnali grandi si ha un'amplificazione minore di 1 ( $R_3$  è trascurabile). Tale meccanismo fa sì che l'oscillazione sia stabile in ampiezza evitando che l'OpAmp vada in saturazione.