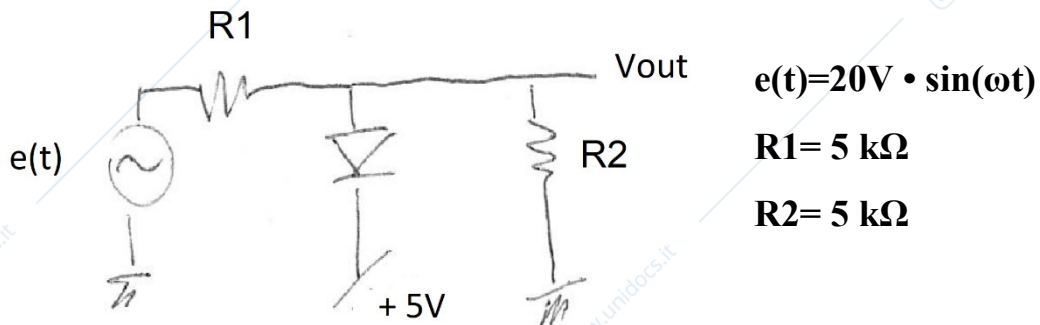


## Fondamenti di Elettronica per Ingegneria dell'Automazione

### Esercitazione 2

Ing. Pietro King

1)

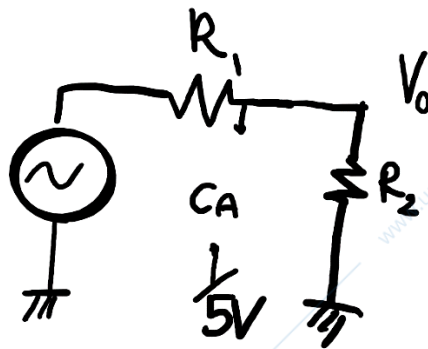


a) Determinare  $V_{out}$ . b) determinare  $V_{out}$  nel caso in cui si inserisca una resistenza  $R3 = 500 \text{ ohm}$  in serie al diodo.

a)

La prima cosa da determinare sono le condizioni di accensione del diodo D1.

Ipotizziamo **D1 OFF**.



La condizione di spegnimento del diodo è che ai suoi capi si abbia una tensione  $V_D < 0.7 \text{ V}$ . Quindi il diodo rimane spento fintanto che  $V_{out} < 0.7 \text{ V} + 5 \text{ V} = 5.7 \text{ V}$

Se spento, il diodo si comporta come un circuito aperto.

$V_{out}$  è data dal partitore resistivo tra  $R1$  ed  $R2$ .

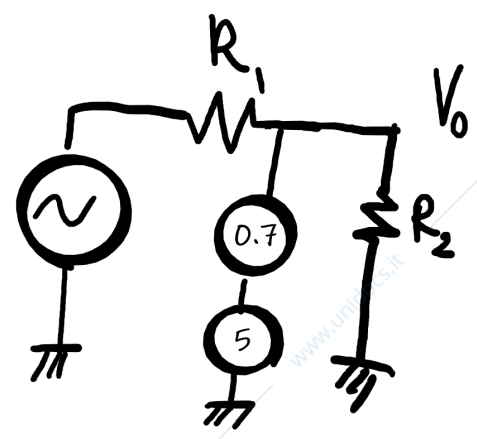
$$V_{out_{D1_{off}}} = e(t) \frac{R2}{R1 + R2} = \frac{e(t)}{2}$$

Quindi il diodo è spento fintanto che

$$\frac{e(t)}{2} < 5.7 V$$

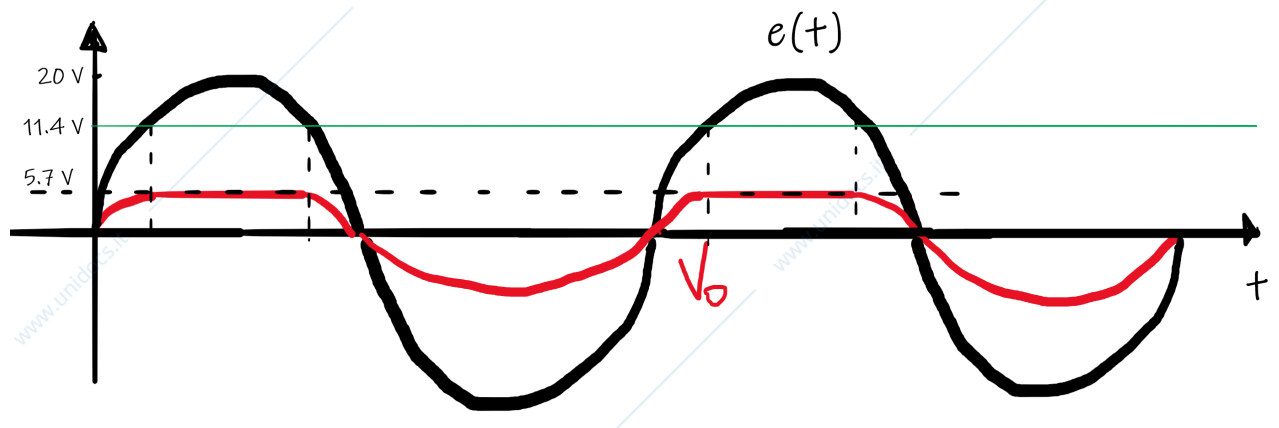
$$e(t) < 11.4 V$$

Quindi quando la tensione di ingresso è superiore a 11.4 V, ho **D1 ON**

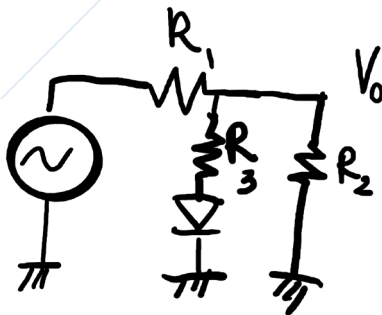


Quando il diodo è acceso, la tensione  $V_{out}$  è fissa a 5.7 V

$$V_{out_{D1_{on}}} = 5.7 V$$



b) determinare  $V_{out}$  nel caso in cui si inserisca una resistenza  $R_3 = 500 \text{ ohm}$  in serie al diodo.



Ipotizziamo **D1 OFF**

Il circuito si comporta come nel punto a)

$$V_{out_{D1_{off}}} = e(t) \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{e(t)}{2}$$

La condizione rimane sempre che  $V_{out} < 5.7 \text{ V}$

**Condizione D1 ON**

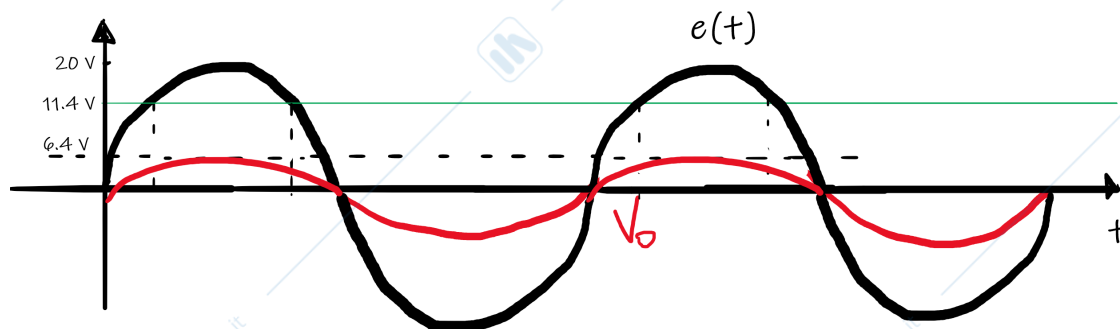


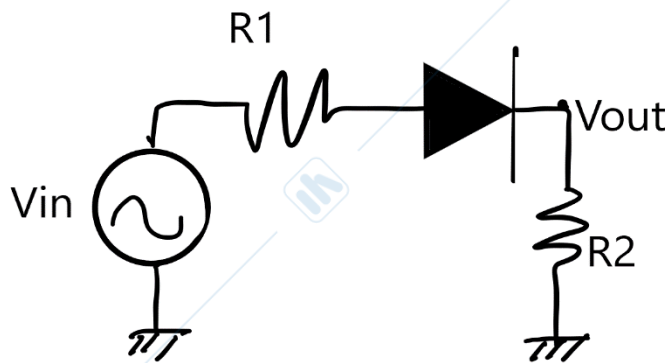
Usando la sovrapposizione degli effetti

$$V_{out_{D1_{on}}} = e(t) \frac{R_2 // R_3}{R_1 + (R_2 // R_3)} + 5.7 \text{ V} \frac{R_1 // R_2}{R_3 + (R_1 // R_2)} = \frac{e(t)}{12} + 4.75 \text{ V}$$

Anche nella fase di diodo acceso la  $V_{out}$  ha un comportamento sinusoidale, con picco:

$$\max [V_{out_{D1_{on}}} ] = \frac{20 \text{ V}}{12 \text{ V}} + 4.75 \text{ V} = 6.4 \text{ V}$$





2)

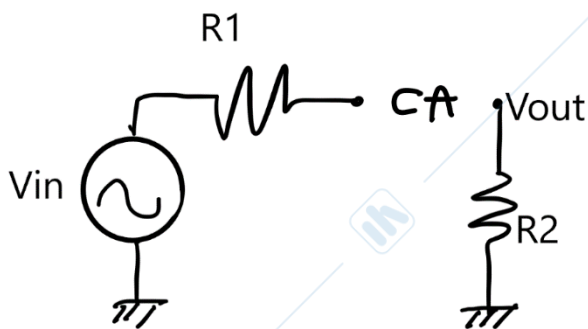
$$V_{in}(t) = 5V \cdot \sin(2\pi ft)$$

$$R1 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R2 = 3 \text{ k}\Omega$$

a) Determinare  $V_{out}$ . b) determinare  $V_{out}$  nel caso in cui  $D1$  sia un diodo zener con  $V_z = -1.5 \text{ V}$

Supponiamo **D1 OFF**



La condizione di spegnimento del diodo e' che  $V_d < 0.7 \text{ V}$ .

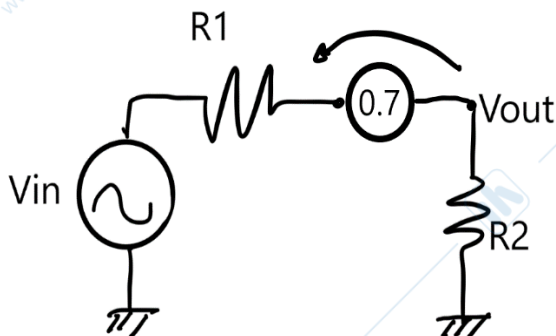
Osservando il circuito in cui abbiamo ipotizzato lo spegnimento del diodo, abbiamo

$$V_{out_{D1_{off}}} = 0 \text{ V}$$

Allo stesso modo, non abbiamo corrente che scorre su  $R1$ , quindi la tensione sull'anodo del diodo e' uguale a  $V_{in}$ .

$V_d = V_{\text{anodo}} - V_{\text{catodo}} = V_{in} - 0 = V_{in}$ . Quindi il diodo rimane spento fintanto che  $V_{in}$  e' minore di  $0.7 \text{ V}$ .

Nel caso di **D1 ON**



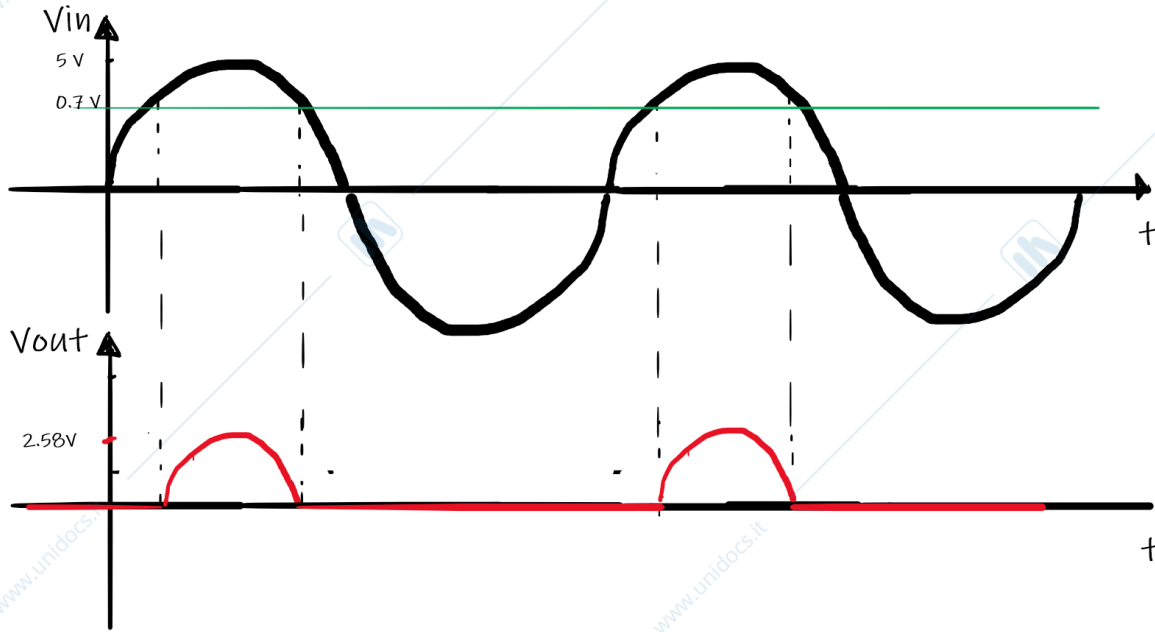
Con  $V_{in} > 0.7 \text{ V}$  abbiamo il diodo acceso.

$$I_{R1} = I_{R2}$$

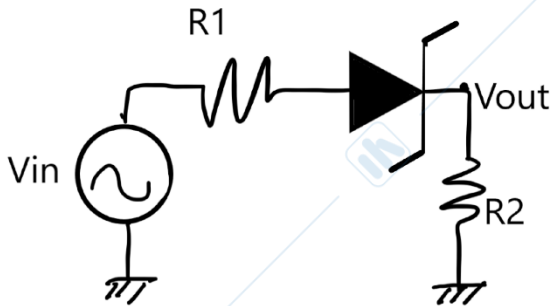
$$\frac{V_{in} - (0.7 + V_{out})}{R1} = \frac{V_{out}}{R2}$$

$$V_{out_{D1_{on}}} = \frac{V_{in} - 0.7}{R1 + R2} R2 = \frac{3(V_{in} - 0.7)}{5}$$

$$\max[V_{out_{D1_{on}}}] = 2.58 \text{ V}$$

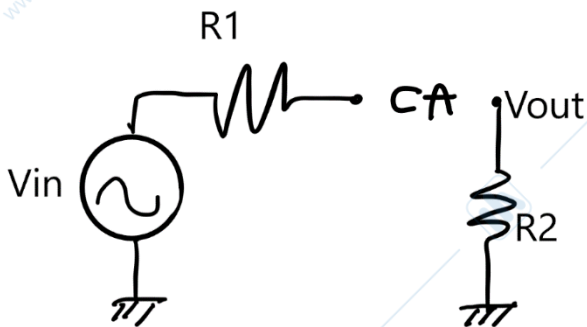


b) Determinare  $V_{out}$  nel caso in cui  $D1$  sia un diodo zener con  $V_z = -1.5V$



Un diodo Zener conduce sia quando ai suoi capi si ha una tensione superiore a  $V_D$  (solitamente  $0.7V$  se non specificato), sia quando ai suoi capi si genera una tensione inferiore a quella di breakdown  $V_z$ .

Supponiamo  $D1$  OFF

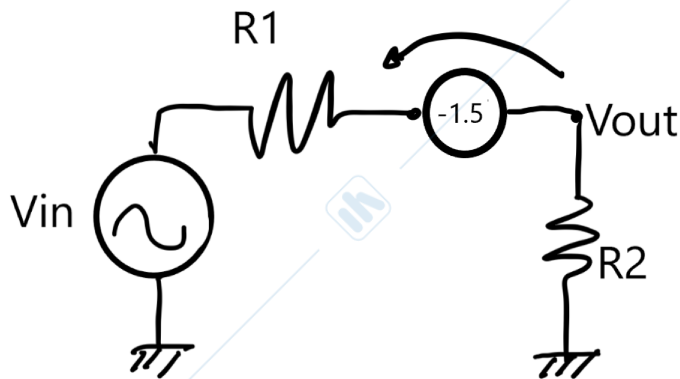


Come abbiamo osservato nel punto precedente dell'esercizio, con  $D1$  OFF abbiamo

$$V_d = V_{in}$$

La condizione perché il diodo entri in breakdown (BD) è che ai suoi capi si generi una tensione inferiore a quella  $V_z = -1.5V$ .

Quindi, per tensioni superiori a  $V_{in} > -1.5V$  il diodo non entra in BD e si comporta come nel punto a).

Se  $V_{in} < -1.5V$ 

$$\frac{V_{in} - (-1.5 + V_{out})}{R1} = \frac{V_{out}}{R2}$$

$$V_{out_{zener}} = \frac{V_{in} + 1.5 V}{R1 + R2} R2$$

$$\min [V_{out_{zener}}] = -2.1 V$$

Confermiamo l'ipotesi che per tensioni di  $V_{in} < -1.5V$  il diodo entra in BD.

La corrente che scorre nel diodo e' uguale a  $I_d = \frac{V_{out}}{R2}$ .

Dall'espressione della tensione  $V_{out}$  in condizione di BD,  $V_{out_{zener}} = \frac{V_{in} + 1.5 V}{R1 + R2} R2$ , e' facile osservare come per valori di  $V_{in} < -1.5$ , il numeratore diventa negativo, e quindi anche la corrente che scorre nel diodo. Verificando che per  $V_{in} < -1.5 V$  il diodo entra in breakdown.

Possiamo anche calcolare le correnti  $I_d$  del diodo nelle varie fasi di funzionamento.

Per  $-1.5 V < V_{in} < 0.7 V$

Il diodo e' spento, non c'e' corrente nel circuito.  $I_d = 0 A$

Per  $V_{in} > 0.7 V$

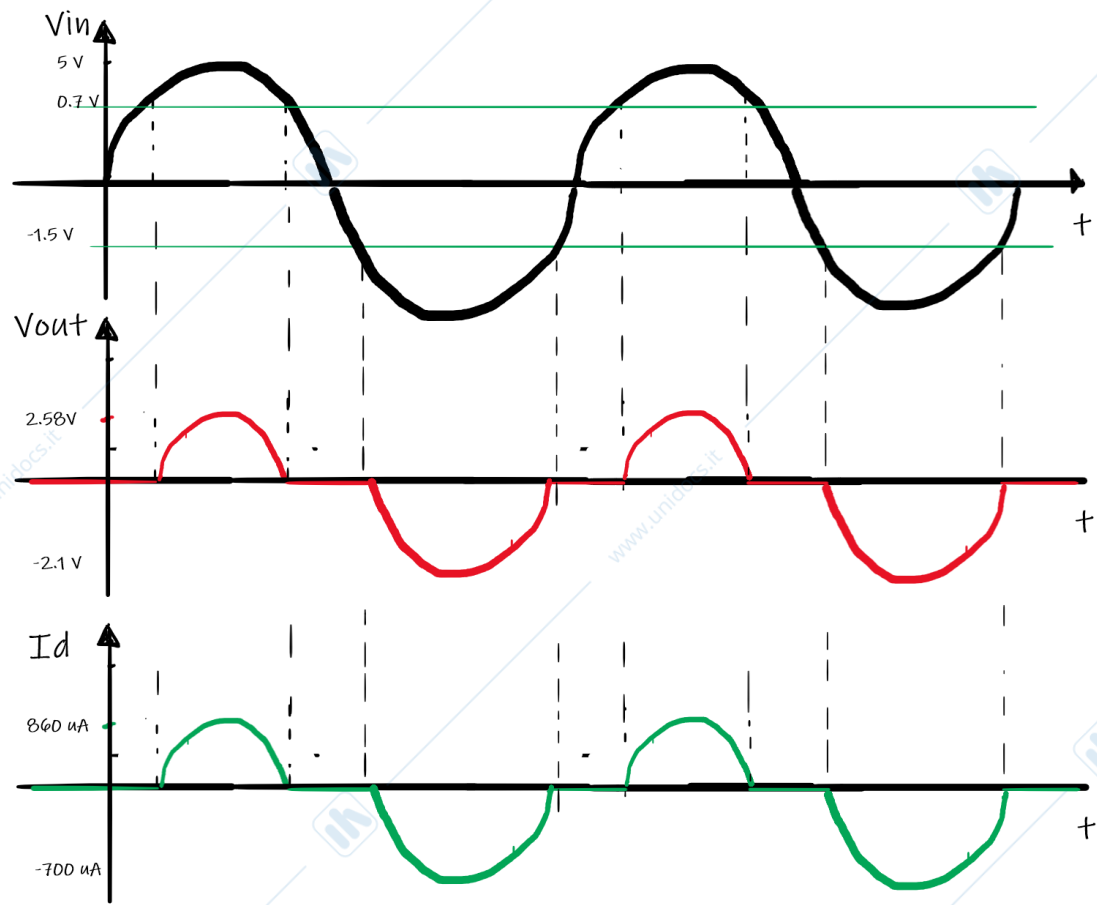
Il diodo e' in polarizzazione diretta. La corrente e' positiva e uguale a  $I_d = \frac{V_{out}}{R2}$

$$I_{d_{max}} = \frac{V_{out_{max}}}{R2} = \frac{2.58 V}{3k\Omega} = 860 \mu A$$

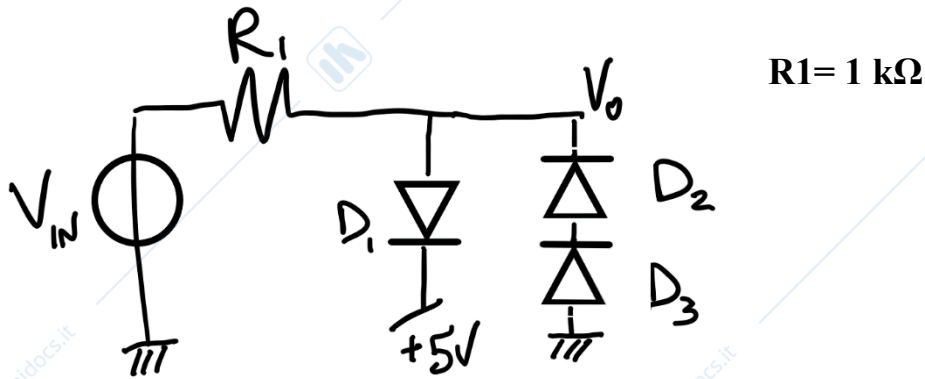
Per  $V_{in} < -1.5 V$

Il diodo e' in breakdown. La corrente e' negativa e uguale a  $I_d = \frac{V_{out}}{R2}$

$$I_{d_{min}} = \frac{V_{out_{min}}}{R2} = \frac{-2.1 V}{3k\Omega} = -700 \mu A$$



3)



a) Determinare la caratteristica  $\frac{V_{out}}{V_{in}}$  del circuito.

Il circuito presenta 3 diodi. Quindi ci sono 8 possibili configurazioni:

D1	D2	D3
OFF	OFF	OFF
OFF	OFF	ON
OFF	ON	OFF
OFF	ON	ON
ON	OFF	OFF
ON	OFF	ON
ON	ON	OFF
ON	ON	ON

Una soluzione possibile è quella di tentare tutte le diverse configurazioni. Ma è possibile escludere quelle impossibili con qualche semplice considerazione.

1) Osservando il ramo con D2 e D3. Ipotizzando uno dei due acceso quando l'altro è spento, porta a un assurdo. Infatti, un diodo spento si comporta come un circuito aperto e quindi non permetterebbe lo scorrere della corrente nell'altro.

Quindi D2 e D3 sono sempre entrambi accesi o spenti allo stesso tempo.

D1	D2	D3
OFF	OFF	OFF
OFF	OFF	ON
OFF	ON	OFF
OFF	ON	ON
ON	OFF	OFF

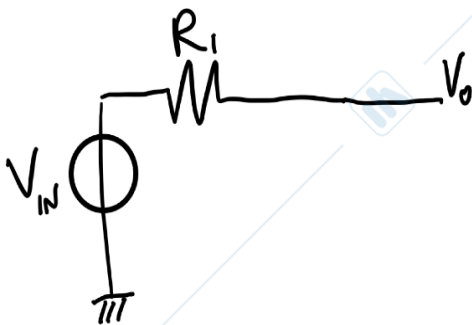
ON	OFF	ON
ON	ON	OFF
ON	ON	ON

2) La condizione in cui tutti i diodi sono accesi allo stesso tempo è impossibile.

Infatti, se fossero tutti ON, imporrebbero tensioni diverse (5.7V e -1.4 V) sullo stesso nodo Vout.

D1	D2	D3
OFF	OFF	OFF
OFF	OFF	ON
OFF	ON	OFF
OFF	ON	ON
ON	OFF	OFF
ON	OFF	ON
ON	ON	OFF
ON	ON	ON

- **Ipotizziamo D1 OFF, D2 OFF, D3 OFF**



Nel caso in cui abbiamo D1, D2, D3 off, non scorre corrente su R1, quindi:  $V_{out} = V_{in}$

La condizione per cui D1 è spento è che la tensione ai suoi capi sia minore di 0.7

$$V_{d1} = V_{anodo} - V_{catodo} = V_{out} - 5V < 0.7 V.$$

Quindi  $V_{in} < 5.7 V$ .

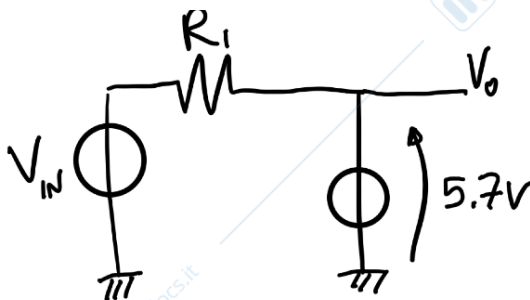
Allo stesso modo D2 e D3 sono spenti se abbiamo una caduta minore di 0.7V su ognuno di loro.

Quindi  $V_{in} > -1.4 V$

La condizione di spegnimento dei diodi è quindi:

$$-1.4 V < V_{in} < 5.7 V$$

- **D1 ON, D2 OFF, D3 OFF**

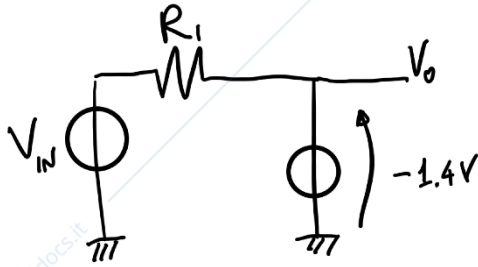


D1 si accende quando si genera una tensione di almeno 0.7 V ai suoi capi. Come visto nel punto precedente, per  $V_{in} > 5.7 V$  abbiamo l'accensione del diodo.

Questo si puo' dimostrare ulteriormente osservando la corrente che scorre su R1. Questa e' positiva solo per valori di  $V_{in} > 5.7$ .

Quando il diodo D1 e' acceso,  $V_{out} = 5.7 \text{ V}$

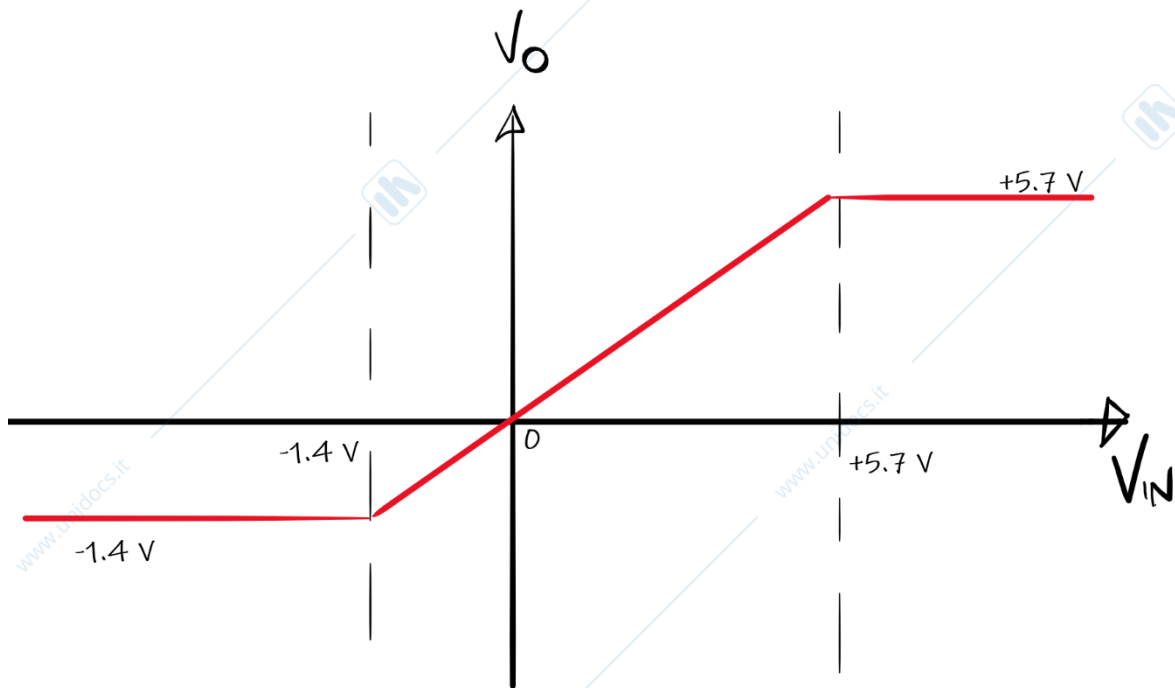
- **D1 OFF D2 (ON), D3 (ON)**



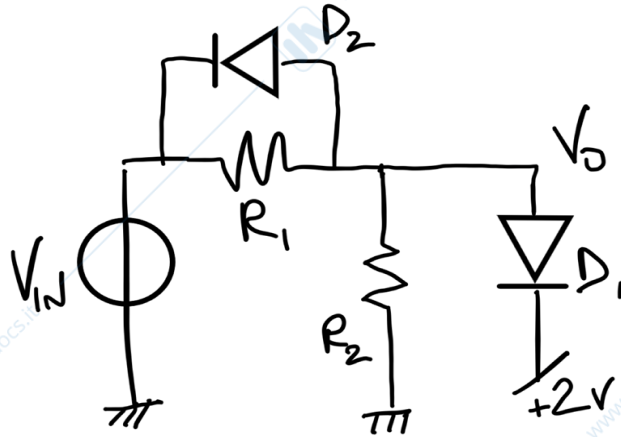
D2 e D3 si accendono quando si genera una tensione di almeno 0.7 V ai loro rispettivi capi. Quindi e' necessario che  $V_o$  sia minore di -1.4 V.

E come visto nel primo punto abbiamo questa condizione per  $V_{in} < -1.4 \text{ V}$

Quando i diodi D2 e D3 sono accesi,  $V_{out} = -1.4 \text{ V}$



4)

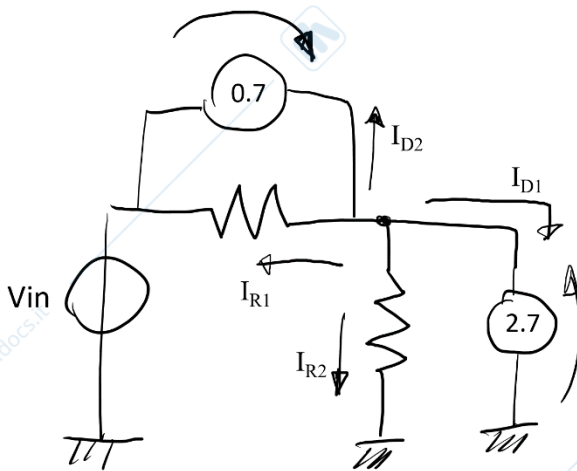


$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 1 \text{ k}\Omega$$

a) Determinare la caratteristica  $\frac{V_{out}}{V_{in}}$  del circuito.

- Supponiamo il caso in cui tutti i diodi siano accesi: **D1 ON, D2 ON**



In questo caso la tensione  $V_{out}$  viene imposta dal diodo  $D_1$  a 2.7V, e a causa del diodo  $D_2$   $V_{in}$  è fissa a 2V. Però in questo modo calcolando le correnti al nodo  $V_{out}$ , sono tutte e 4 ( $I_{D1}$ ,  $I_{D2}$ ,  $I_{R1}$  e  $I_{R2}$ ) positive, non zero, e uscenti dal nodo. Questo è impossibile.

Dato che l'accensione di entrambi i diodi contemporaneamente porta ad un assurdo,  $D_1 \text{ ON } D_2 \text{ ON}$  è una condizione impossibile.

- **D1 OFF D2 OFF**

Con tutti i diodi spenti, abbiamo un semplice partitore di tensione

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{2}$$

La condizione di spegnimento del diodo D1 e' che ai suoi capi si generi una tensione inferiore a 0.7 V. Ovvero  $V_{d1} = V_{anodo1} - V_{catodo1} = V_{out} - 2 V < 0.7$ .

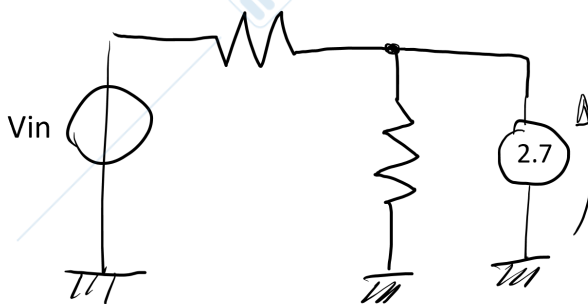
La condizione di spegnimento del diodo e'  $V_{out} < 2.7 V$  e dall'espressione di  $V_{in}$  si puo' ricavare che D1 OFF per

$$\begin{aligned} V_{out} &< 2.7 V \\ V_{in} &< 5.4 V \end{aligned}$$

La condizione di spegnimento del diodo D2 e' che ai suoi capi si generi una tensione inferiore a 0.7 V. Ovvero  $V_{d2} = V_{anodo2} - V_{catodo2} = V_{out} - V_{in} < 0.7$ .

$$\begin{aligned} \frac{V_{in}}{2} - V_{in} &< 0.7 \\ V_{in} &> -1.4 V \end{aligned}$$

- **D1 ON D2 OFF**



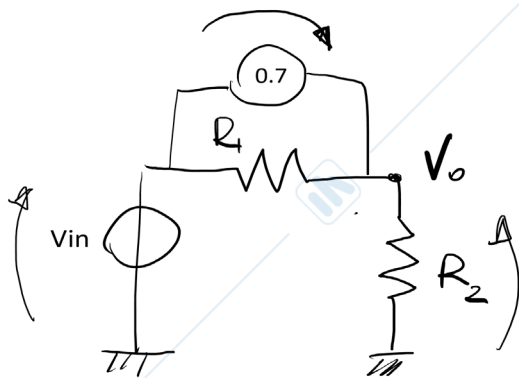
La condizione per l'accensione del diodo D2 è che

$$V_{in} > 5.4 V$$

$V_{out}$  è imposta dal diodo D1 acceso.

$$V_{out} = 2.7 V$$

- **D1 OFF D2 ON**

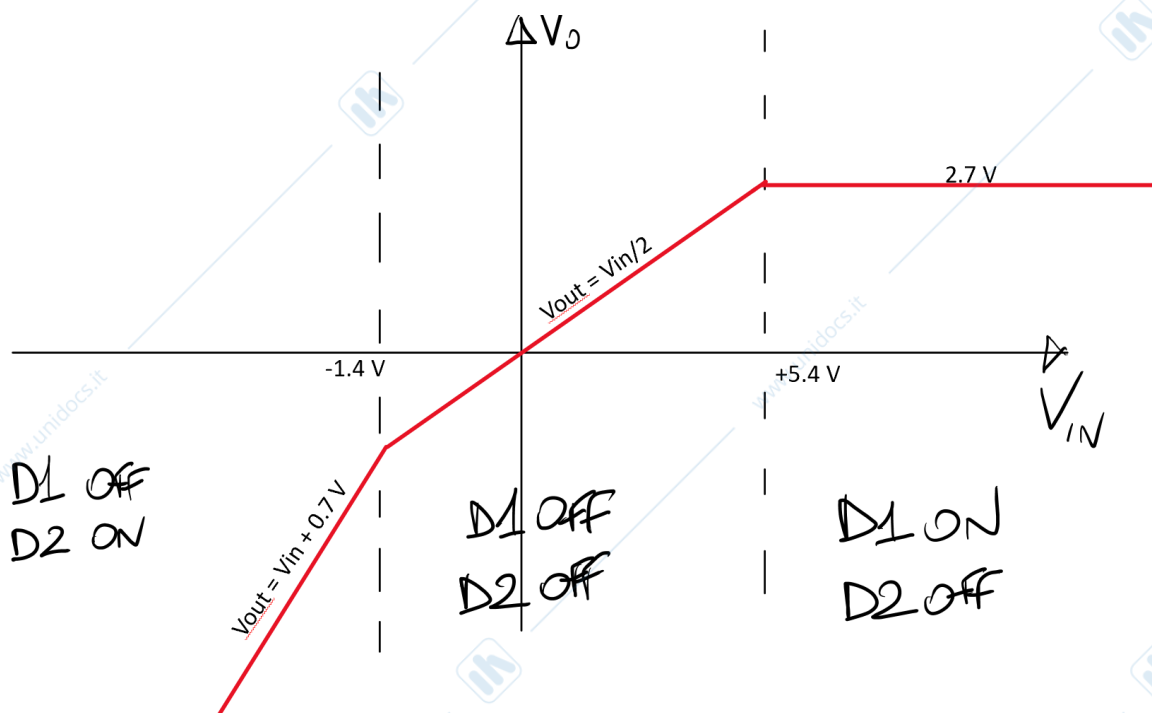


La condizione per l'accensione del diodo D2 è che

$$V_{in} < -1.4 V$$

L'espressione di  $V_{out}$  può essere ricavata da Kirchhoff applicato alla maglia  $V_{in}$ , D2, R2.

$$V_{out} = V_{in} + 0.7 V$$



5)



$$V_{in} = 12V \sin(2\pi ft)$$

$$f = 1 \text{ kHz}$$

$$R1 = 10 \text{ k}\Omega$$

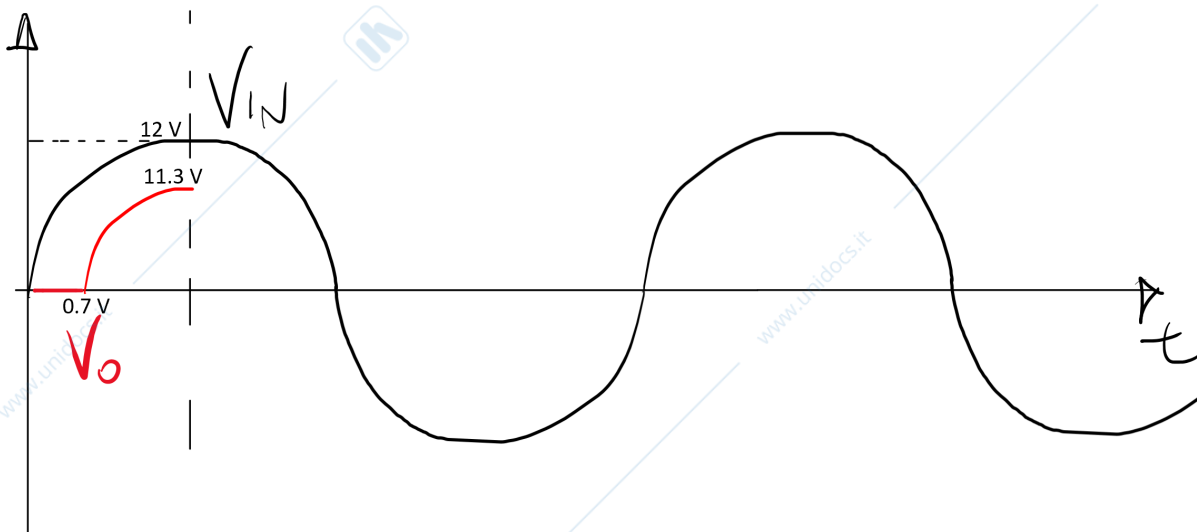
$$C1 = 10 \text{ }\mu\text{F}$$

a) Come si comporta  $V_{out}(t)$ ? Quanto è il  $\Delta V_{ripple}$ ?

Consideriamo inizialmente la capacità  $C1$  scarica.  $V_{out} = 0V$ .

Fintanto che la tensione  $V_{in}$  è inferiore a  $0.7V$ , il diodo  $D1$  rimane spento e  $V_{out}$  rimane a  $0V$ .

Non appena  $V_{in}$  supera la tensione di accensione del diodo, inizia a scorrere corrente nel circuito, e  $V_{out}$  si muove rigidamente insieme a  $V_{in}$ , a meno di un fattore  $0.7V$ .  $V_{out} = V_{in} - 0.7V$



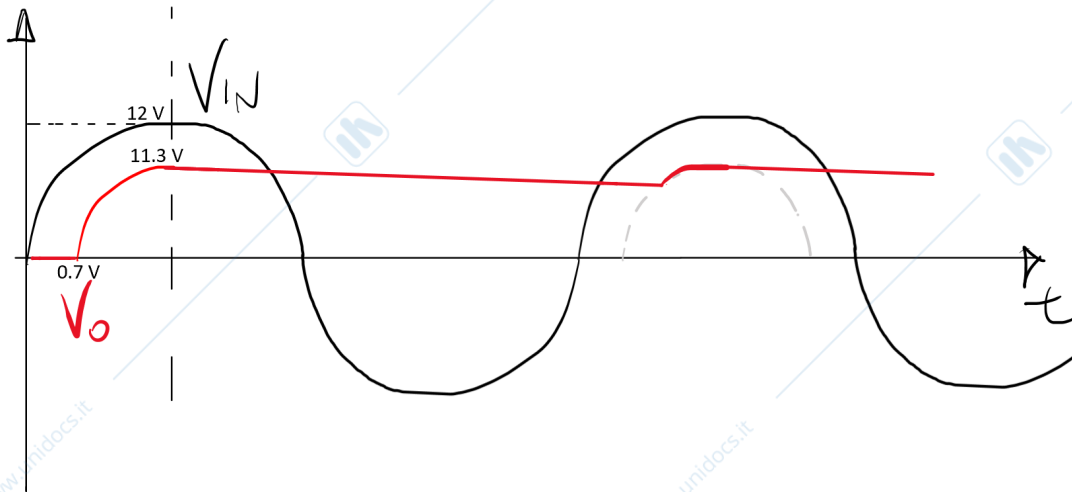
Cosa accade una volta superato il picco della sinusoide?

La costante di tempo della capacità  $\tau = R1 \cdot C1 = 100 \text{ ms}$  è molto maggiore del periodo della sinusoide ( $\frac{1}{1 \text{ kHz}} = 1 \text{ ms}$ ). Questo vuol dire che la capacità è molto lenta a scaricarsi.

Non appena  $V_{in}$  supera il picco di  $12V$ , la tensione sulla capacità rimane "costante", mentre  $V_{in}$  diminuisce. La tensione ai capi del diodo non è più  $0.7V$  e questo si spegne.

In questa fase  $V_{out}$  non è più dipendente da  $V_{in}$ , essendoci un circuito aperto tra di loro. Però la  $V_{out}$  non rimane costante nel tempo.

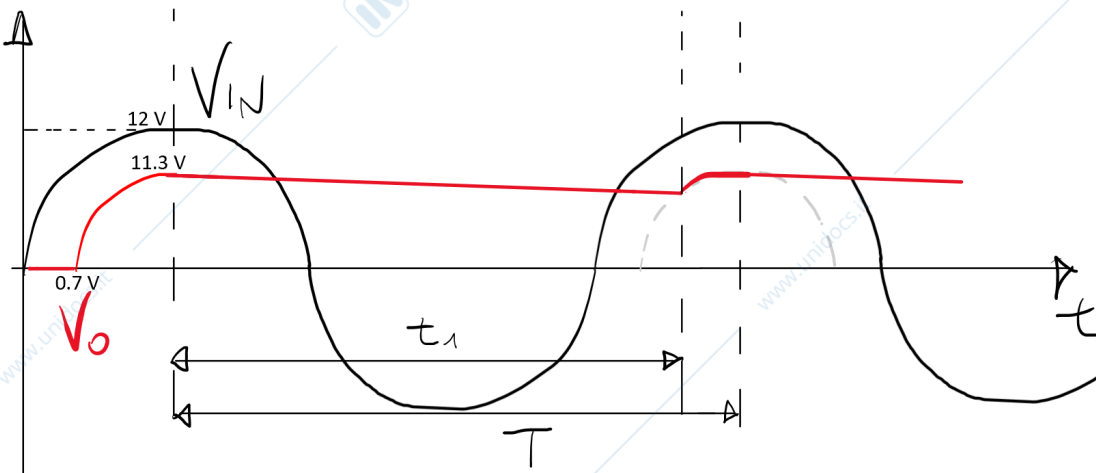
Infatti la carica accumulata nella capacità, si scarica sulla resistenza R1, con costante di tempo  $\tau$ .



Il diodo D1 rimane spento fintanto che  $V_{in}$  non è nuovamente  $> V_{in} + 0.7 V$ .

A quel punto  $V_{out}$  inizia a muoversi nuovamente rigidamente rispetto a  $V_{in}$ , finché poi non si spegne nuovamente D1.

Quanto è il  $\Delta V_{ripple}$ ?



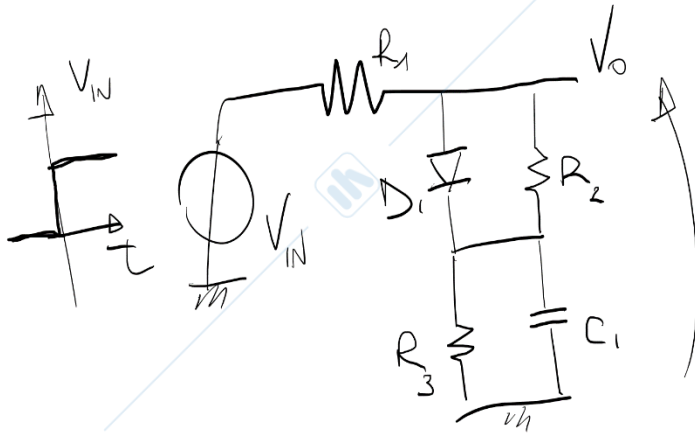
Con  $\Delta V_{ripple}$  si intende la caduta di tensione su  $V_{out}$  nell'intervallo di tempo  $t_1$

$$\Delta V_{ripple} = V_{out}\left(\frac{\pi}{2}\right) - V_{out}\left(\frac{\pi}{2} + t_1\right)$$

Per semplicità si può considerare  $t_1 = T$ , il periodo della sinusoide.

$$V_{ripple} = V_{out}\left(\frac{\pi}{2}\right) - V_{out}\left(\frac{\pi}{2} + T\right) = 11.3 V - 11.3 V e^{-\frac{T}{\tau}} = 11.3 \left(1 - e^{-\frac{1ms}{100ms}}\right) = 0.11 V$$

6)



**Vin = 5V**

**R1 = 2 kΩ**

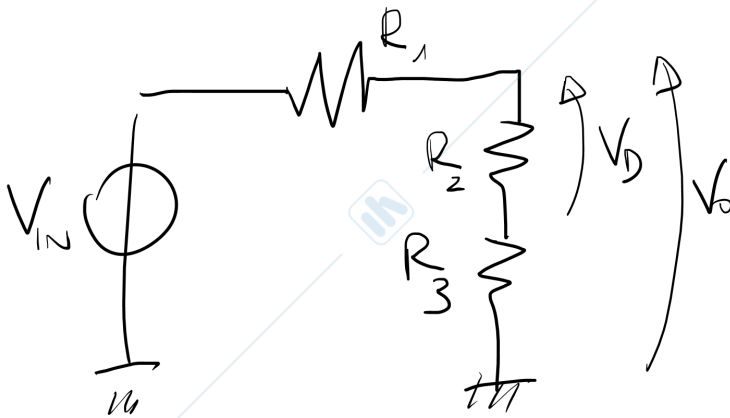
**R2 = 3 kΩ**

**R3 = 1 kΩ**

**C1 = 1 nF**

- a) Determinare  $V_{out}(t)$  senza considerare la capacità  $C1$  b) Inserire la capacità  $C1$  nel circuito e calcolare come si modifica  $V_{out}(t)$

Supponiamo che il diodo  $D1$  sia spento: **D1 OFF**



$$V_D = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{V_{in}}{2}$$

Dato che la condizione di spegnimento del diodo è che  $V_D < 0.7 \text{ V}$ , il diodo rimane spento fintanto che  $V_{in} < 1.4 \text{ V}$ .

Nel circuito sotto esame abbiamo solo 2 possibili tensioni per  $V_{in}$ :

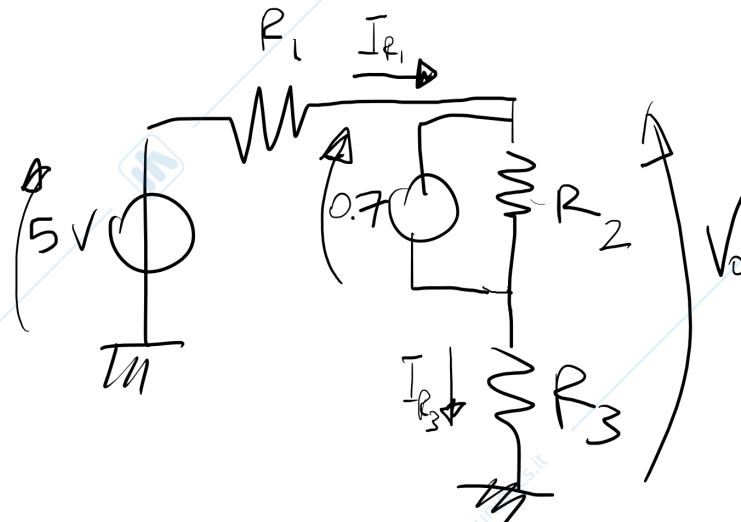
**Vin = 0 V** → **Vin < 1.4 V** → **D1 OFF**

La tensione di alimentazione è 0V, non abbiamo nessuna differenza di potenziale che crei corrente all'interno del circuito

**Vout = 0 V**

$$V_{in} = +5 \text{ V}$$

$$\rightarrow V_{in} > 1.4 \text{ V} \rightarrow \text{D1 ON}$$



$$I_{R1} = I_{R3}$$

$$\frac{V_{in} - V_{out}}{R1} = \frac{V_{out} - 0.7V}{R3}$$

$$V_{out} = 2.13 \text{ V}$$

b) Inseriamo la capacità C1 nel circuito.

$$t = 0^- \text{ (D1 OFF)}$$

Tutti i generatori del circuito sono allo stesso potenziale (0 V). Il diodo è spento e non scorre corrente.

$$V_{C1}(0^-) = 0 \text{ V}$$

$$V_{out}(0^-) = 0 \text{ V}$$

$$I_{R1}(0^-) = 0 \text{ A}$$

$$I_d(0^-) = 0 \text{ A}$$

$$t = 0^+ \text{ (D1 ON)}$$

$V_{in} = 5V$ . Il diodo inizia a condurre e fissa la tensione di 0.7 V ai suoi capi. Intanto la tensione ai capi della capacità non può cambiare istantaneamente. Quindi,  $V_c = V_{R3} = 0 \text{ V}$ .

$$V_{C1}(0^+) = 0 \text{ V}$$

$$V_{out}(0^+) = 0.7 \text{ V}$$

$$I_{R1}(0^+) = (V_{in} - V_{out})/R1 = (5 \text{ V} - 0.7 \text{ V}) / 2k\Omega = 2.15 \text{ mA}$$

$$I_d(0^+) = I_{R1} - I_{R2} = 2.15 \text{ mA} - 0.7/R2 = 2.15 \text{ mA} - 0.23 \text{ mA} = 1.92 \text{ mA}.$$

$t \rightarrow \infty$  (**D1 ON**)

La capacita' si e' caricata completamente e puo' essere considerata un circuito aperto. La tensione ai capi della capacita' e' fissata dal diodo D1 come  $V_c = V_{out} - V_{d1}$ .

$$V_{out}(\infty) = 2.13V$$

$$V_{C1}(\infty) = V_{out} - 0.7V = 1.43V$$

$$I_{R1}(\infty) = (V_{in} - V_{out})/R1 = (5V - 2.13V) / 2k\Omega = 1.43mA$$

$$I_d(\infty) = I_{R1} - I_{R2} = 2.15mA - 0.7/R2 = 1.43mA - 0.23mA = 1.2mA.$$

Costante di tempo  $\tau = C1 \cdot R1 // R3 = 667ns$

Quindi si possono ricavare le espressioni delle tensioni e delle correnti nel tempo ( $t > 0$ ), poi rappresentate nel grafico nella pagina seguente

$$V_C(t) = 1.43V \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

$$V_{out}(t) = 2.13V - 1.43V e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$I_d(t) = 1.2mA + 0.72mA e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$I_{R1}(t) = 1.43mA + 0.72mA e^{-\frac{t}{\tau}}$$

