

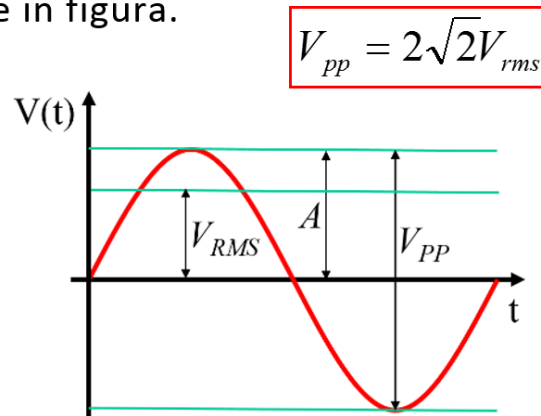
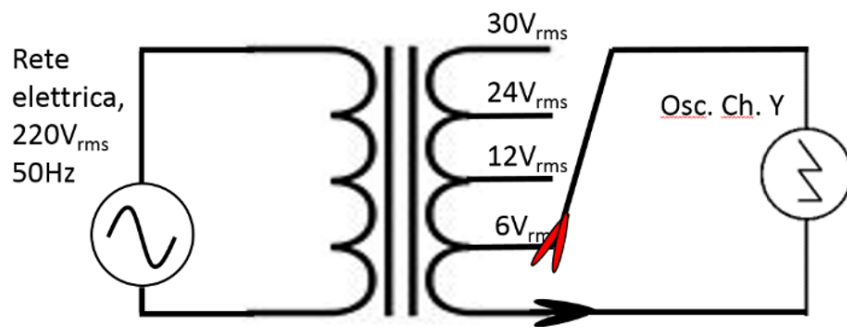
Esperienza 6 : semplici circuiti con diodi

Corso di Laboratorio di Elettromagnetismo e Circuiti, prof. S. Masi

1 MISURA DELLA CARATTERISTICA DEL DIODO CON L' OSCILLOSCOPIO E IL TRASFORMATORE

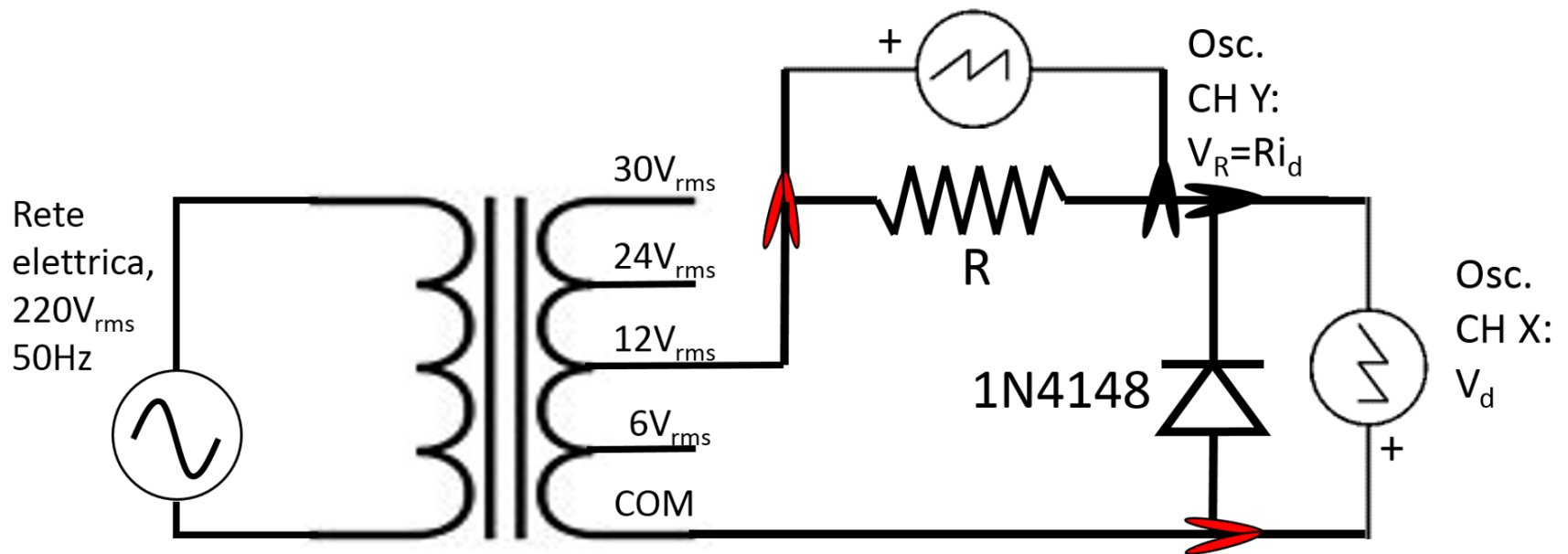
Sono disponibili: un diodo mod. 1N4148, diversi resistori, un trasformatore con diversi secondari (6,12,24,30V_{rms}), l' oscilloscopio. Il diodo verrà alimentato dalla tensione alternata prodotta dal trasformatore (sinusoidale, alla frequenza di rete, 50 Hz), tramite una resistenza R, montata in serie, che limita la corrente che vi scorre quando è polarizzato direttamente.

Per prima cosa, conviene controllare la corrispondenza tra le tensioni rms indicate sul trasformatore, e le tensioni picco-picco effettivamente erogate, collegando direttamente il secondario del trasformatore all'oscilloscopio, come in figura.



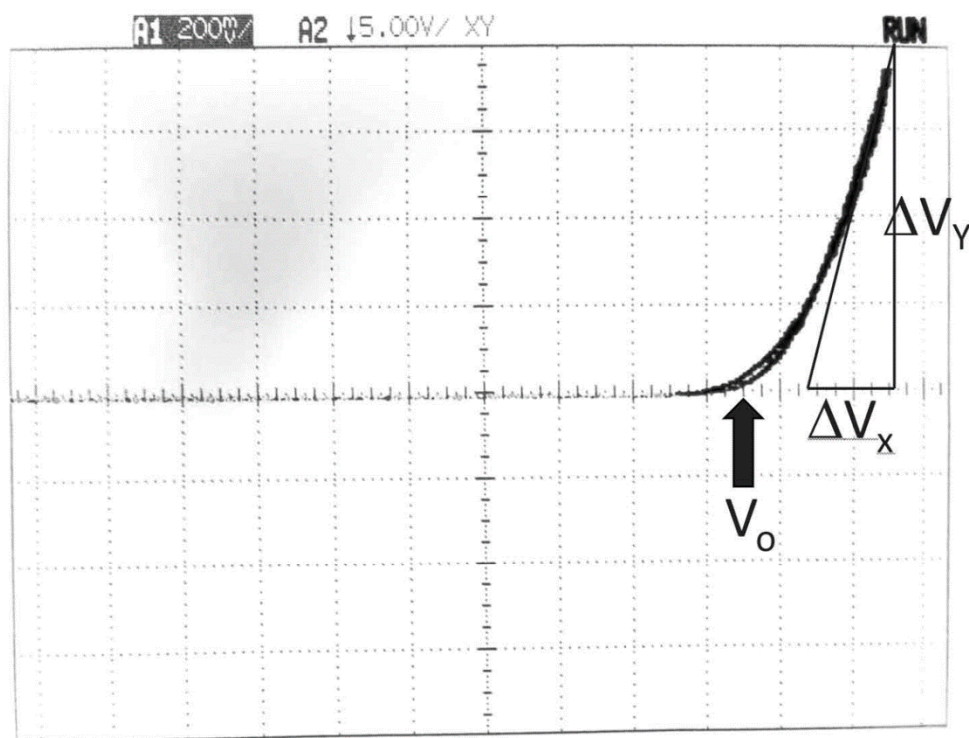
Si usa un trasformatore invece del generatore sinusoidale in modo da avere un generatore isolato dalla terra, e quindi isolato dalla massa (coccodrillo nero) dei due canali di ingresso dell'oscilloscopio.

Si passa poi a inserire nel circuito il diodo con la sua resistenza in serie, collegandolo ai due canali dell'oscilloscopio come in figura:



La resistenza R andrà dimensionata in modo da limitare la corrente a meno di 200 mA. Se si usa l'uscita a 12V, ad esempio, deve essere $R > 12 \cdot 1.41 / 0.2 \, \Omega$, quindi $R = 100 \, \Omega$ è un valore adatto.

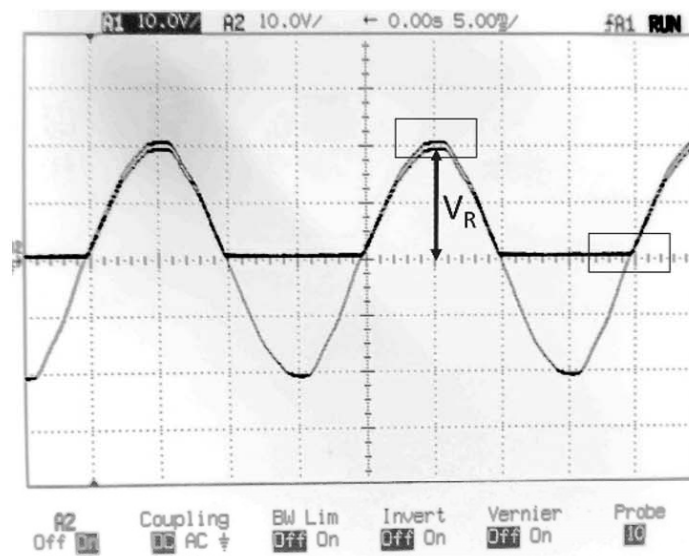
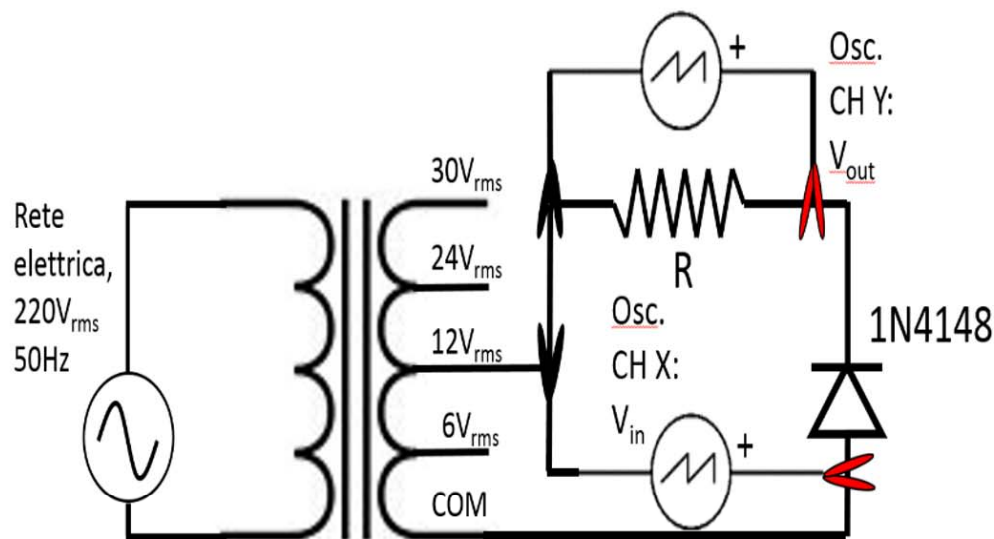
L'oscilloscopio andrà utilizzato in modalità XY, curando di invertire il segnale sul canale Y, in modo da ottenere la visualizzazione della curva caratteristica del diodo sul monitor. Si otterrà un segnale simile a quello visualizzato a destra nella figura. Da questo si determineranno approssimativamente la tensione di ginocchio V_o del diodo, e la sua resistenza per polarizzazione diretta R_d , come indicato in figura. Notare le scale: 200 mV/cm orizzontale (cioè ogni quadretto corrisponde ad una tensione di 0.2V ai capi del diodo) e di 5V/cm verticale (cioè ogni quadretto corrisponde ad una corrente di $5V/100\Omega=50mA$). Si copi la figura per punti su carta quadrettata o millimetrata, e si determinino la tensione di ginocchio e la resistenza diretta come indicato sotto:



In questo caso, ad esempio, $V_o=0.7V$ (data la curvatura, questo valore è evidentemente affetto da un certo grado di arbitrarietà) ; $R_d=\Delta V/\Delta I= \Delta V_x/(\Delta V_y/R)=0.24V/(20V/100\Omega)=1.2\Omega$. Non si dimentichi di propagare gli errori di lettura, e quindi associare un errore massimo alla stima di R_d .

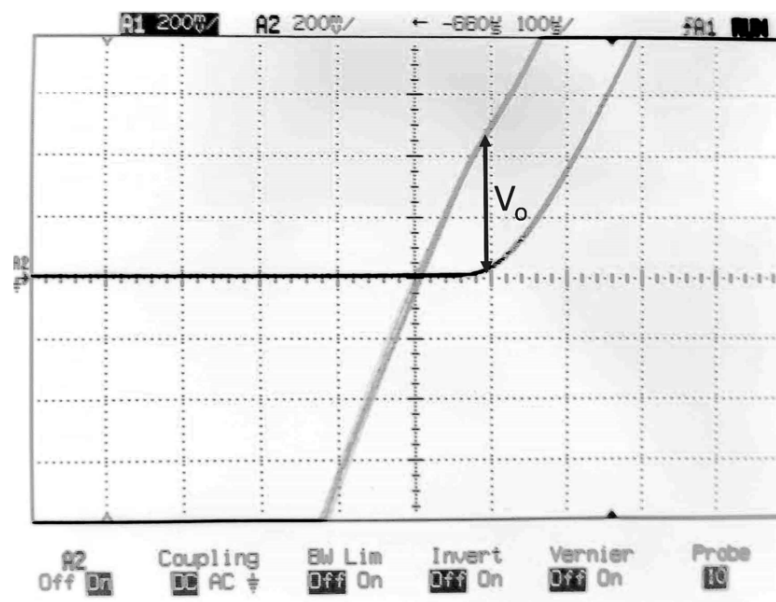
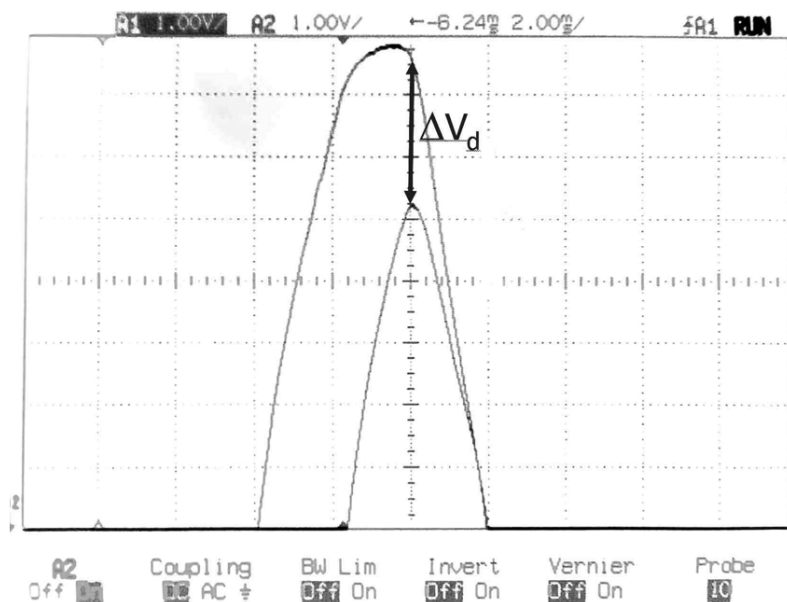
2 DIODO COME RADDRIZZATORE

Si utilizzi lo stesso circuito, ma si colleghino i due canali dell'oscilloscopio come in figura:



Utilizzando l'oscilloscopio in modo V(t), si visualizzerà sul canale X la tensione del trasformatore (V_{in}) e sul canale Y la tensione ai capi del carico R ($V_{out}=V_R$). Si otterrà una schermata simile a quella della figura sopra a destra. Le forme d'onda non sono esattamente sinusoidali in quanto la tensione di rete lo è solo approssimativamente, e il trasformatore non è ideale.

Muovendo opportunamente le posizioni X, Y, e i due fattori di scala, si otterrà uno zoom della zona del picco (vedi figura ingrandita a sinistra) dalla quale si potrà stimare la caduta di tensione sul diodo in piena conduzione, e quindi la resistenza per conduzione diretta, sapendo la corrente. Ingrandendo invece la zona dell'attraversamento dello zero (vedi figura ingrandita a destra) si potrà stimare di nuovo la tensione di ginocchio del diodo.



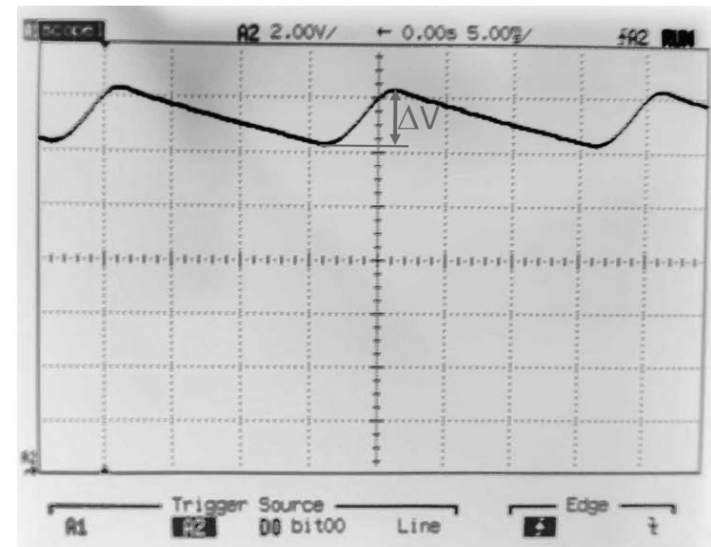
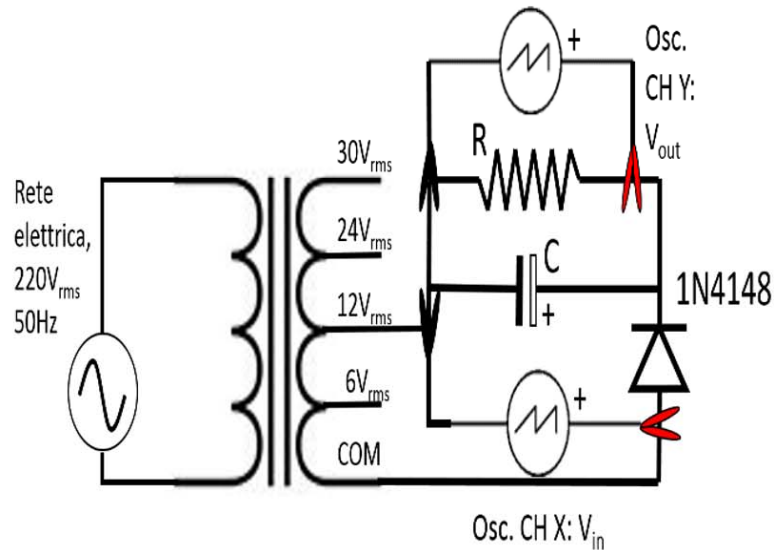
In questo caso (figura di sinistra) $V_R=19V$, $R = 100 \Omega$, quindi $i_d=190 \text{ mA}$; $\Delta V_d=2.2V$, quindi $R_d=(\Delta V_d-V_o)/i_d=8\Omega$. Dalla figura di destra, invece, si ha la tensione di ginocchio $V_o=0.5V$. Anche qui, non si dimentichi di propagare gli errori di lettura, e quindi associare un errore massimo alle due stime.

3 LIVELLAMENTO DELLA TENSIONE RADDRIZZATA

Inserendo una capacità in parallelo al carico, la tensione si livella, tendendo ad una tensione continua per capacità molto grandi. Durante il periodo in cui il diodo conduce, la capacità viene caricata alla tensione $V_{in}(t) - V_o$, durante il periodo in cui il diodo non conduce, il condensatore si scarica sul carico, con una costante di tempo del processo $\tau = RC$. Quindi il ripple residuo è pari a

$$\Delta V = V_{\max} (1 - e^{-T/\tau})$$

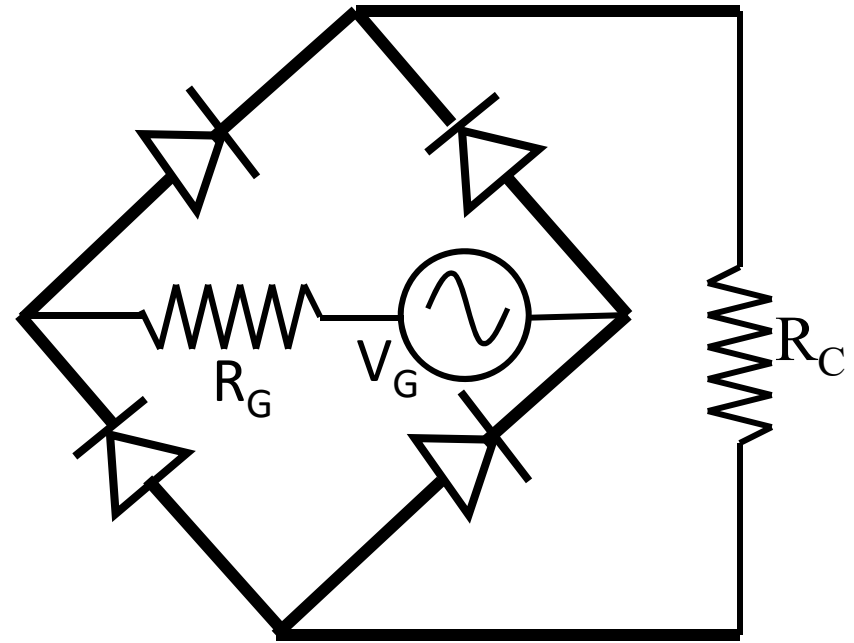
dove T è il periodo dell'onda, pari a 20 ms per le rete elettrica in Italia. Usando un condensatore da 1000 μF (elettrolitico, va inserito rispettando la polarità indicata nello schema !) si verifichi che il ripple residuo è quello aspettato.



Ponte di diodi con diodi LED

Per vedere il fenomeno si deve impostare una bassa frequenza del generatore (1-2 Hz)

Inoltre, siccome la corrente nei diodi è limitata dalla resistenza interna del generatore ($R_G = 50\Omega$) e dal carico R_C , si deve scegliere l'ampiezza della tensione sinusoidale in modo che non scorrano più di 15 mA nei diodi, altrimenti si bruciano.

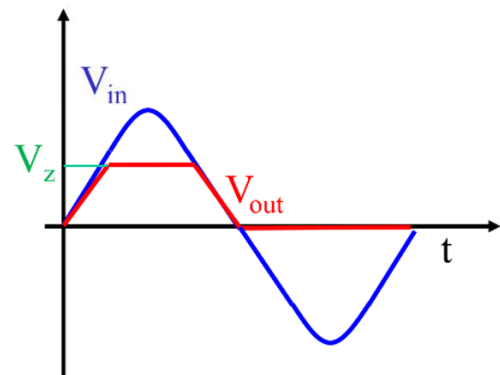
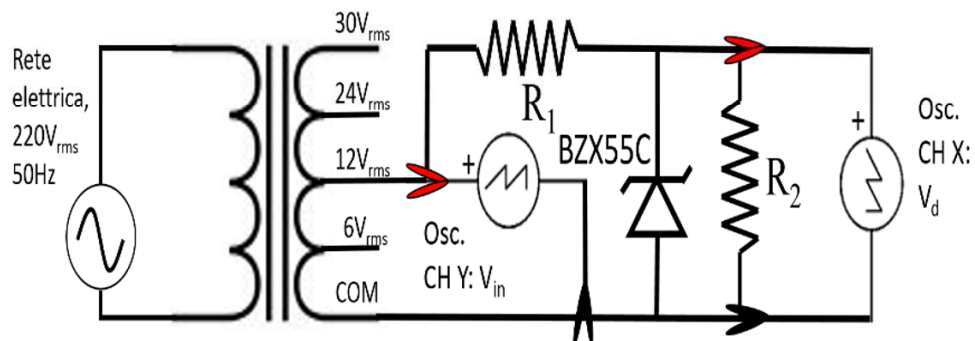


$$V_{G,\max} = (R_G + R_C)i_{\max} + 2V_{LED}$$

dove V_{LED} è la tensione ai capi del LED usato quando va in conduzione, dell'ordine di 1V.

4 DIODO ZENER

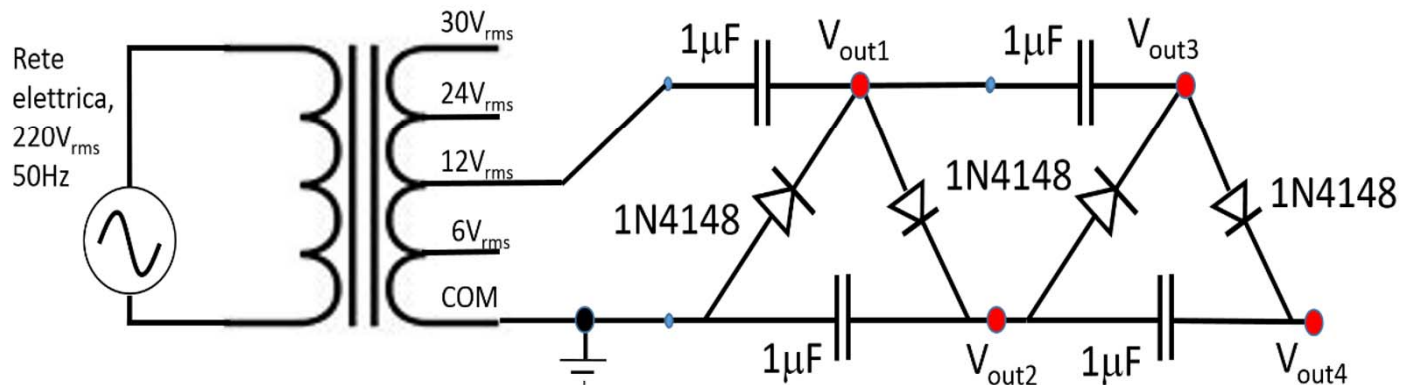
Si costruisce il circuito riportato sotto a sinistra, con uno Zener BZX55C , una resistenza $R_1=2.2\text{k}\Omega$ ed una resistenza $R_2=100\text{ k}\Omega$ e si collegano i due canali dell'oscilloscopio come in figura.



Si ottiene la forma d'onda illustrata in figura a destra, dalla quale si misura la tensione di breakdown V_z .

5 MOLTIPLICATORE DI TENSIONE

Si costruisce il circuito riportato in figura, e si osserva con l'oscilloscopio tra V_{out2} e massa e tra V_{out4} e massa, verificando che le tensioni siano rispettivamente $2(A-V_d)$ e $4(A-V_d)$. Si osservino anche V_{out1} e V_{out3} e si spieghi il loro andamento.



Esperienza 7: misure sulla linea di trasmissione

- In questa esperienza si invia un segnale impulsivo in una linea di trasmissione lunga 100m.
- Si studiano sia il segnale in uscita (e quindi la velocità di propagazione) che l'effetto del segnale riflesso che torna all'ingresso.

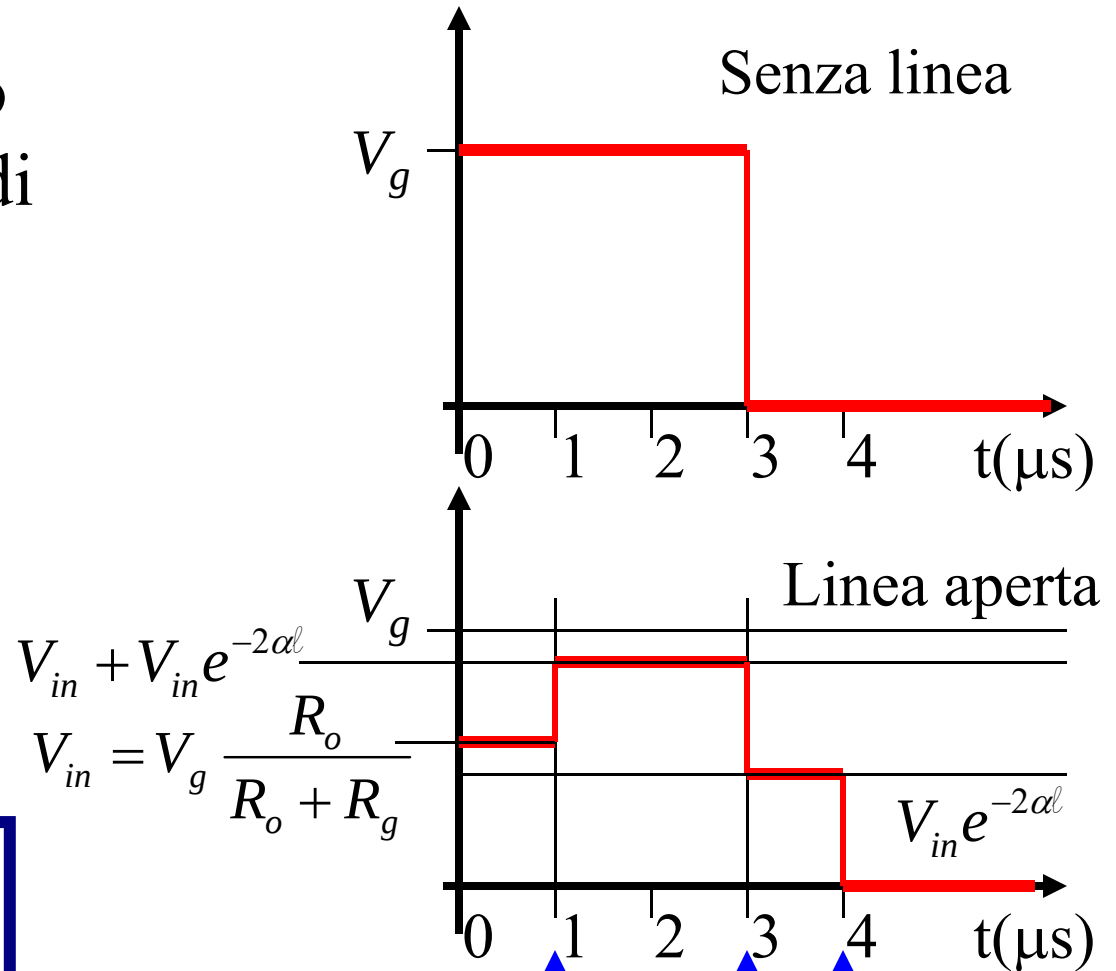


Riassunto della teoria

- Nella linea di trasmissione il segnale si propaga come un'onda a velocità $v = 1 / \sqrt{L_u C_u} \cong c / \sqrt{\epsilon_r}$
- A seconda di come è terminata la linea (cioè di quale carico è connesso alla sua estremità), una frazione del segnale può venire riflessa indietro verso il generatore, e quindi, sovrapponendosi al segnale inviato dal generatore, modificandone la forma. Si hanno diversi casi:
 - Linea adattata (carico uguale alla impedenza della linea)
 - Linea non adattata (carico diverso dall' impedenza della linea); casi particolari di questo sono
 - Linea aperta
 - Linea in corto
- Si studierà il segnale in ingresso variando il carico in uscita in modo da esplorare i diversi casi.

Linea Aperta

- Quindi all'ingresso vedremo un'onda di questo genere:



$$t = 2t_\ell = 2\ell/v$$

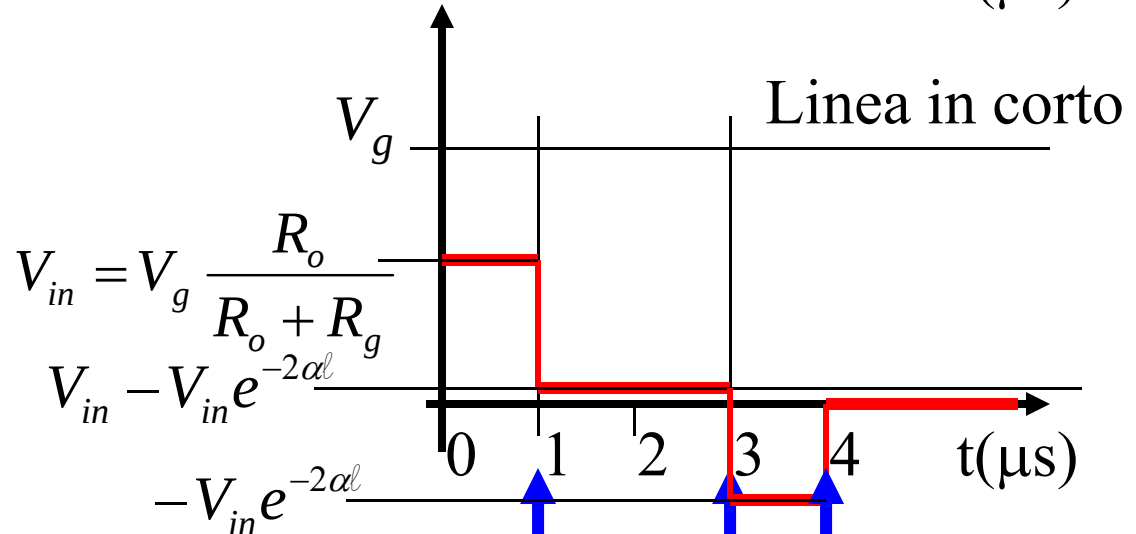
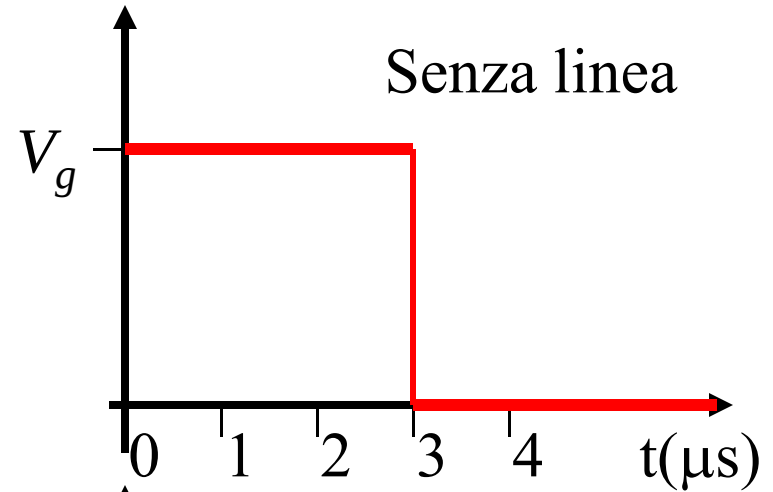
Arriva l' "eco"
dell' impulso

Finisce l'
Impulso
originale

Finisce l'
"eco" dell' impulso

Linea in corto

- Quindi all' ingresso vedremo un' onda di questo genere:



$$t = 2t_\ell = 2\ell/v$$

Arriva l' "eco"
dell' impulso

Finisce l'
Impulso
originale

Finisce l'
"eco" dell' impulso

In generale

- Per R_c qualsiasi ricaviamo il coefficiente di riflessione imponendo la legge di Ohm per R_c :

$$\frac{V(x = \ell, t = t_\ell)}{I(x = \ell, t = t_\ell)} = R_c$$

$$\frac{V_{in}e^{-\alpha\ell} + \Gamma V_{in}e^{-\alpha\ell}}{\frac{V_{in}e^{-\alpha\ell}}{R_o} - \frac{\Gamma V_{in}e^{-\alpha\ell}}{R_o}} = R_c \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} = \frac{R_c}{R_o}}$$

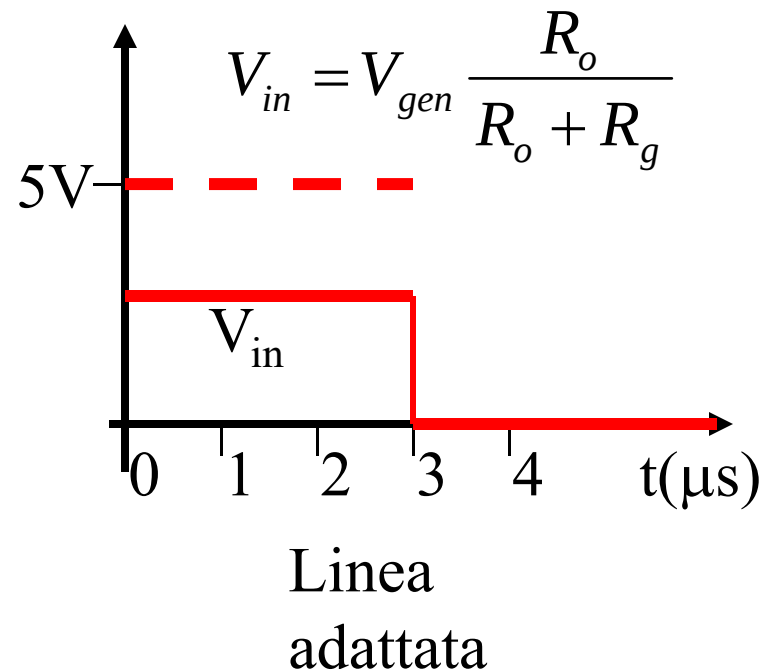
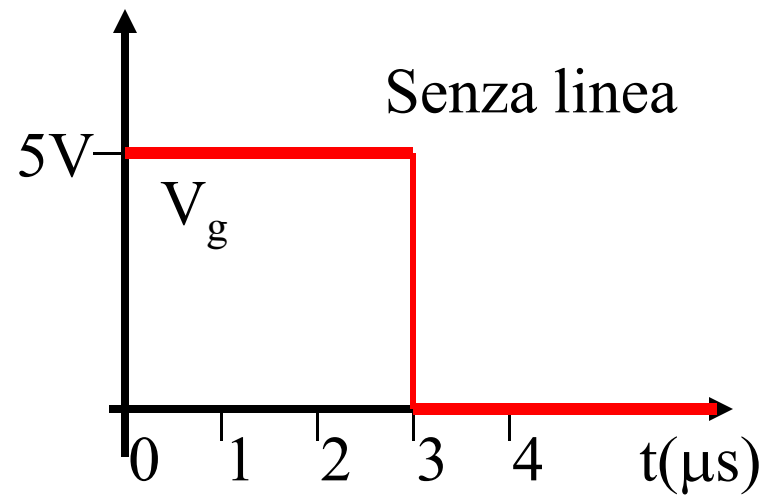
- Si verifica facilmente che Γ vale 0 per $R_c = R_o$, vale 1 per R_c infinita e vale -1 per $R_c = 0$.
- In ingresso

$$\boxed{V(x = 0, t = 2t_\ell) = V_{in} (1 + \Gamma e^{-2\alpha\ell})}$$

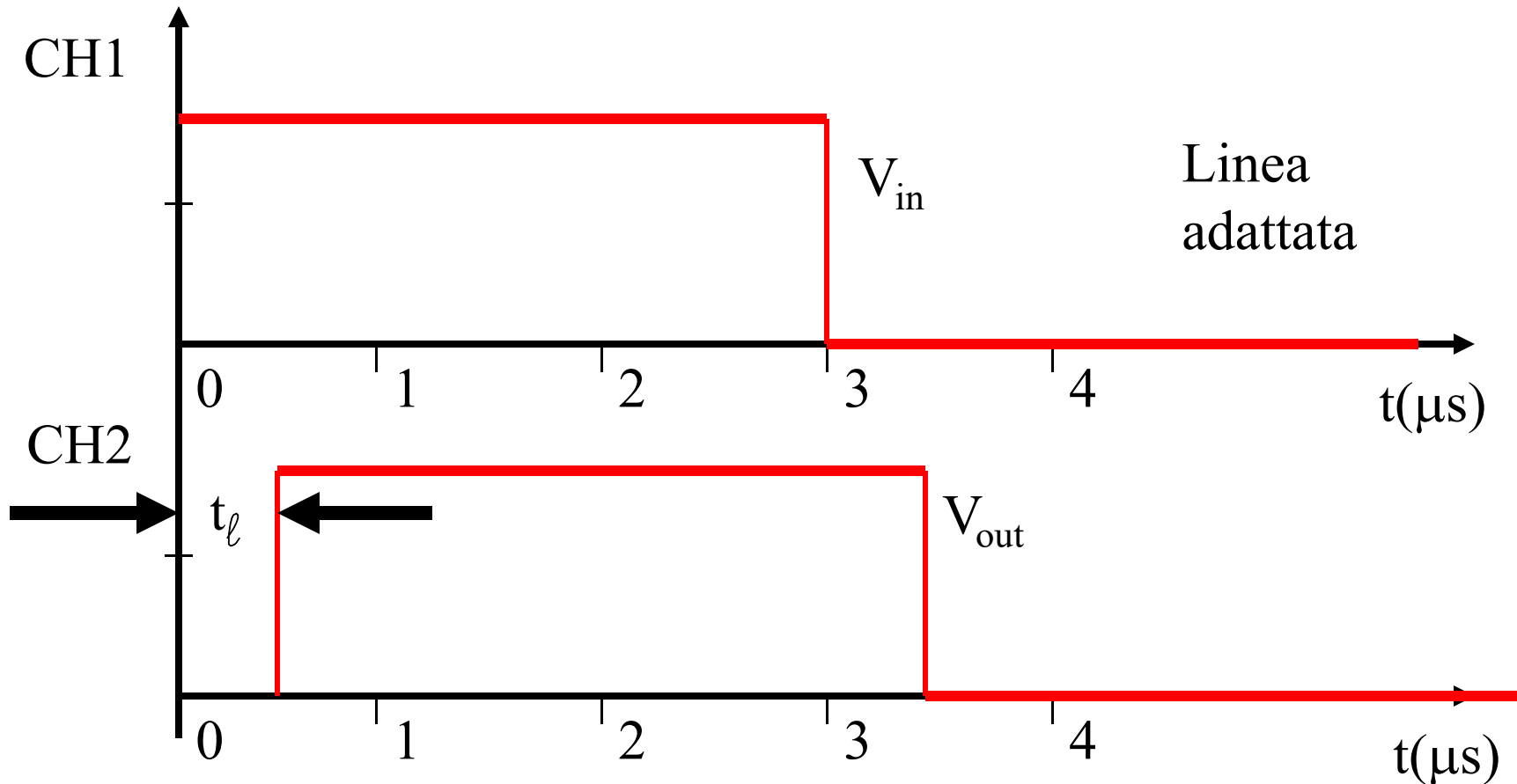
- Collegare il generatore all' oscilloscopio (CH1).
- Collegare l' uscita SYNCHRO del generatore all' ingresso TRIGGER ESTERNO dell' oscilloscopio, e commutare su EXT il selettore del modo di Trigger.
- Utilizzare una frequenza $f=50\text{kHz}$ e scegliere l' onda quadra.
- Agire sui comandi di ampiezza, offset e duty cycle in modo da avere una V_g di 5V per $0 < t < 3\text{ }\mu\text{s}$, 0V per $3\text{ }\mu\text{s} < t < 20\text{ }\mu\text{s}$.



- Utilizzare una T per connettere il segnale dal CH1 dell'oscilloscopio all'ingresso della linea.
- Connettere l'altra estremità della linea al CH2 dell'oscilloscopio, con una T in modo da chiudere la linea con una resistenza da 50Ω (tappo a 50Ω)
- Si dovrebbe essere in condizioni di linea adattata (assenza di riflessioni).
- Misurare l'ampiezza del segnale applicato alla linea V_{in} (CH1).
- Ricavare R_o supponendo che la R_g sia di 50Ω .



- Misurare il ritardo tra CH2 e CH1 e da questo ricavare la velocità di propagazione nella linea, sapendo che la lunghezza è di 100m.



- Verificare che il valore di v stimato da s/t_1 sia consistente con quello teorico, ricavato da L_u e C_u ($1/\sqrt{L_u C_u}$), vedi valori tipici del cavo RG58...

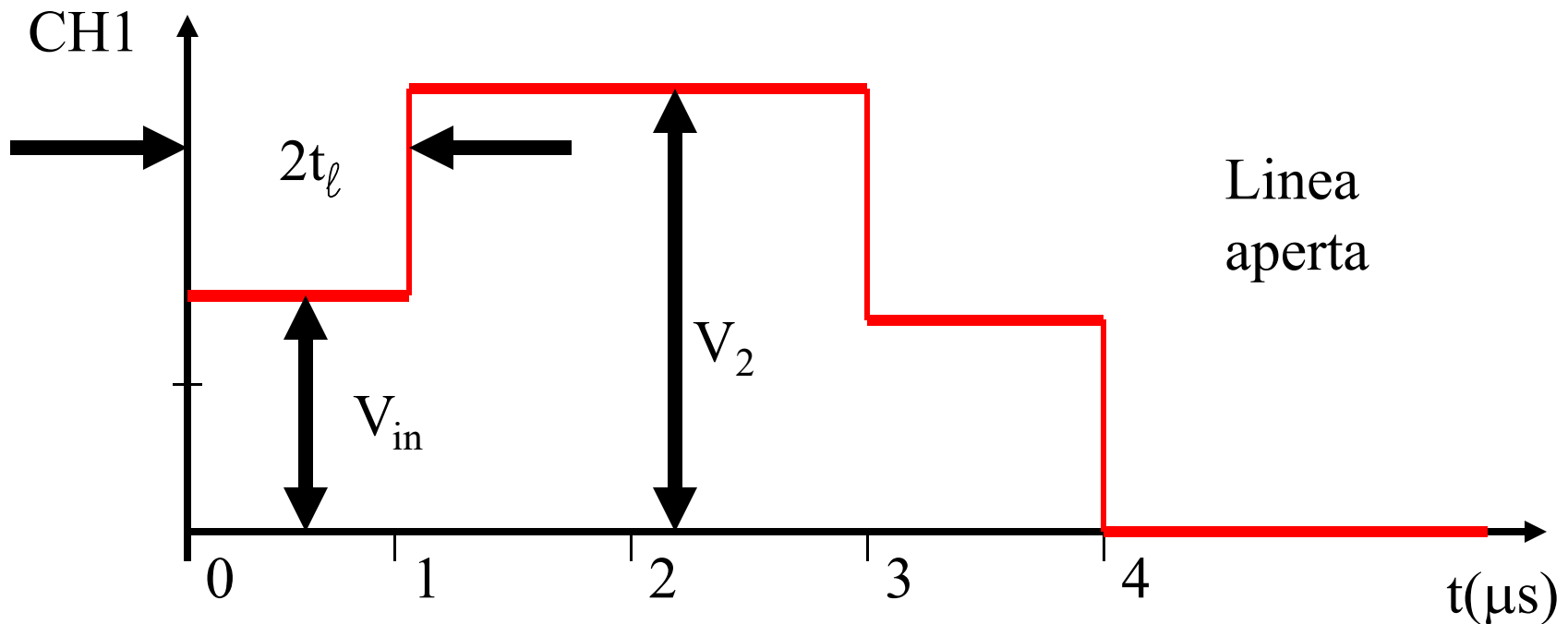
Segnali Impulsivi

$$\left\{ \begin{array}{l} C_u = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D/d)} \\ L_u = \frac{\mu}{2\pi} \ln(D/d) \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} v = \frac{1}{\sqrt{C_u L_u}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_R}} \\ R_o = \sqrt{L_u / C_u} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\mu / \epsilon} \ln(D/d) \end{array} \right.$$

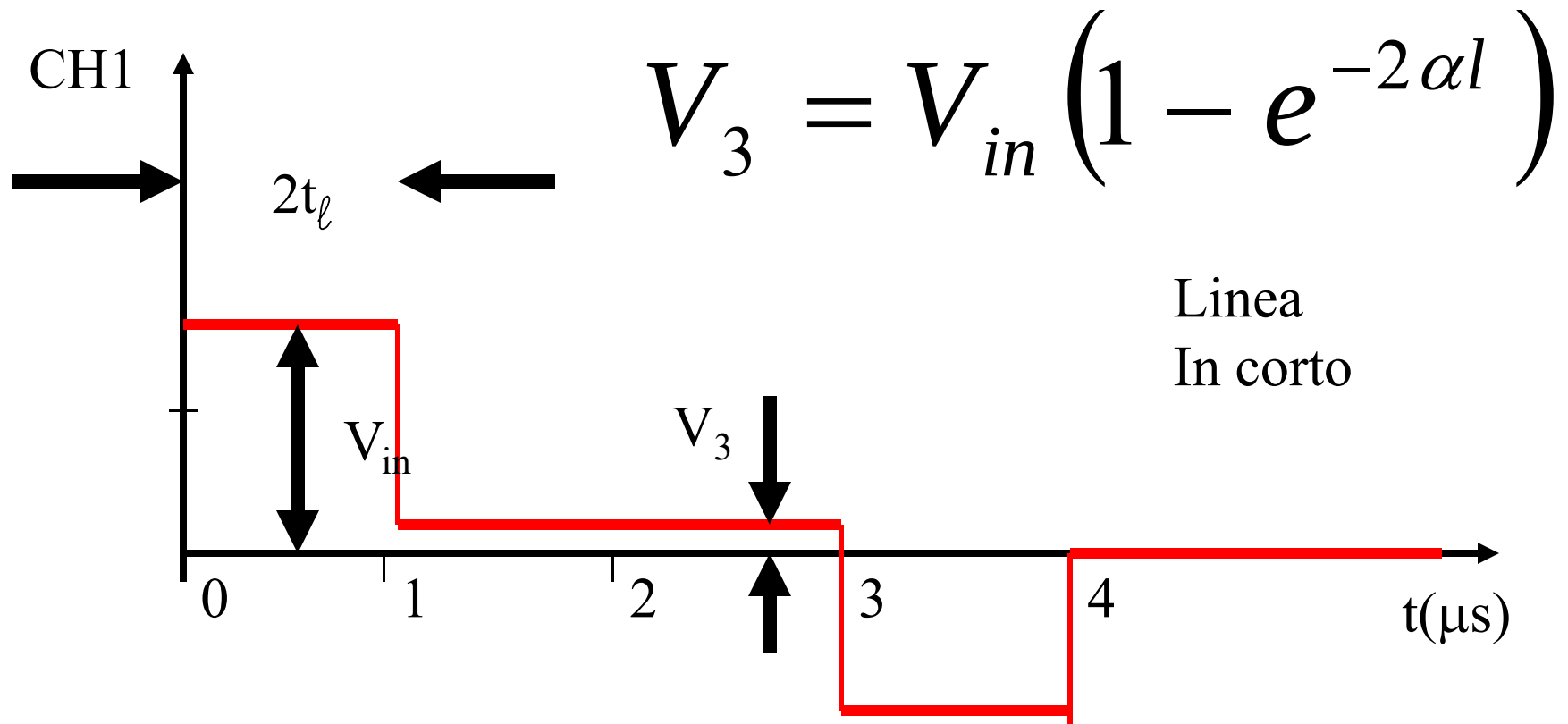
- Numeri tipici per l' RG-58:
 - ☐ $\epsilon_R=2$, $v=c/\text{sqrt}(2)$
- $C_u=100$ pF/m
- $R_o=50\Omega$
- $v=20\text{cm/ns}$
- ☐ $\tau=5\text{ns/m}$
- Quindi un cavo di 100m introduce un ritardo di 500 ns.

- Togliere il tappo a 50Ω e osservare l'onda riflessa in CH1.
- Misurare $2t_\ell$, V_{in} , V_2 ,
- Stimare l'attenuazione α da

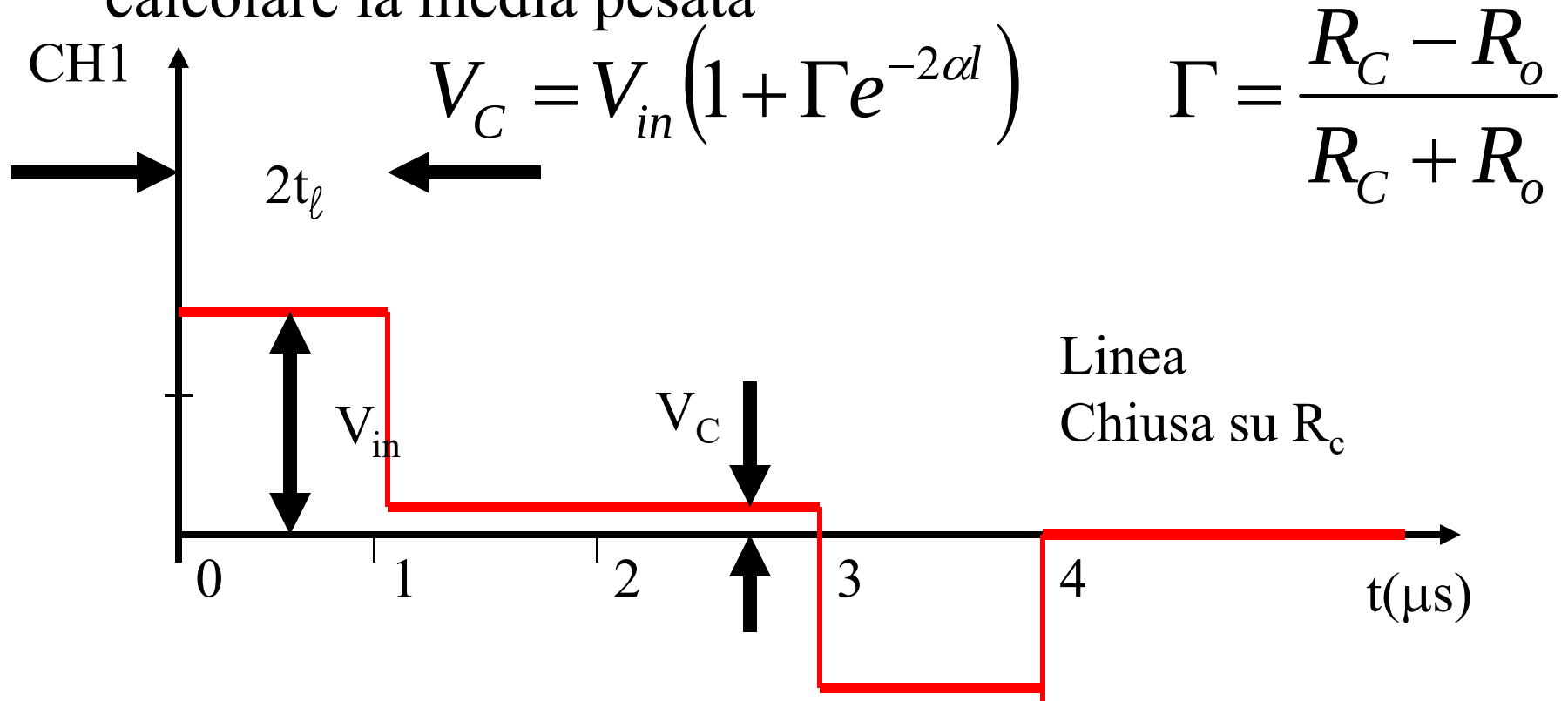
$$V_2 = V_{in} \left(1 + e^{-2\alpha l} \right)$$



- Cortocircuitare la linea con un tappo a 0Ω e osservare l'onda riflessa in CH1.
- Misurare $2t_\ell$, V_{in} , V_3 ,
- Stimare l'attenuazione α da



- Connettere un BNC-coccodrillo all' uscita, e connettere una resistenza di carico $R_c = 10, 22, 33, 47, 100, 330 \Omega$. Misurare $2t_\ell$, V_{in} , V_C ,
- Stimare R_o per ogni R_c dalle due relazioni sotto, e poi calcolare la media pesata

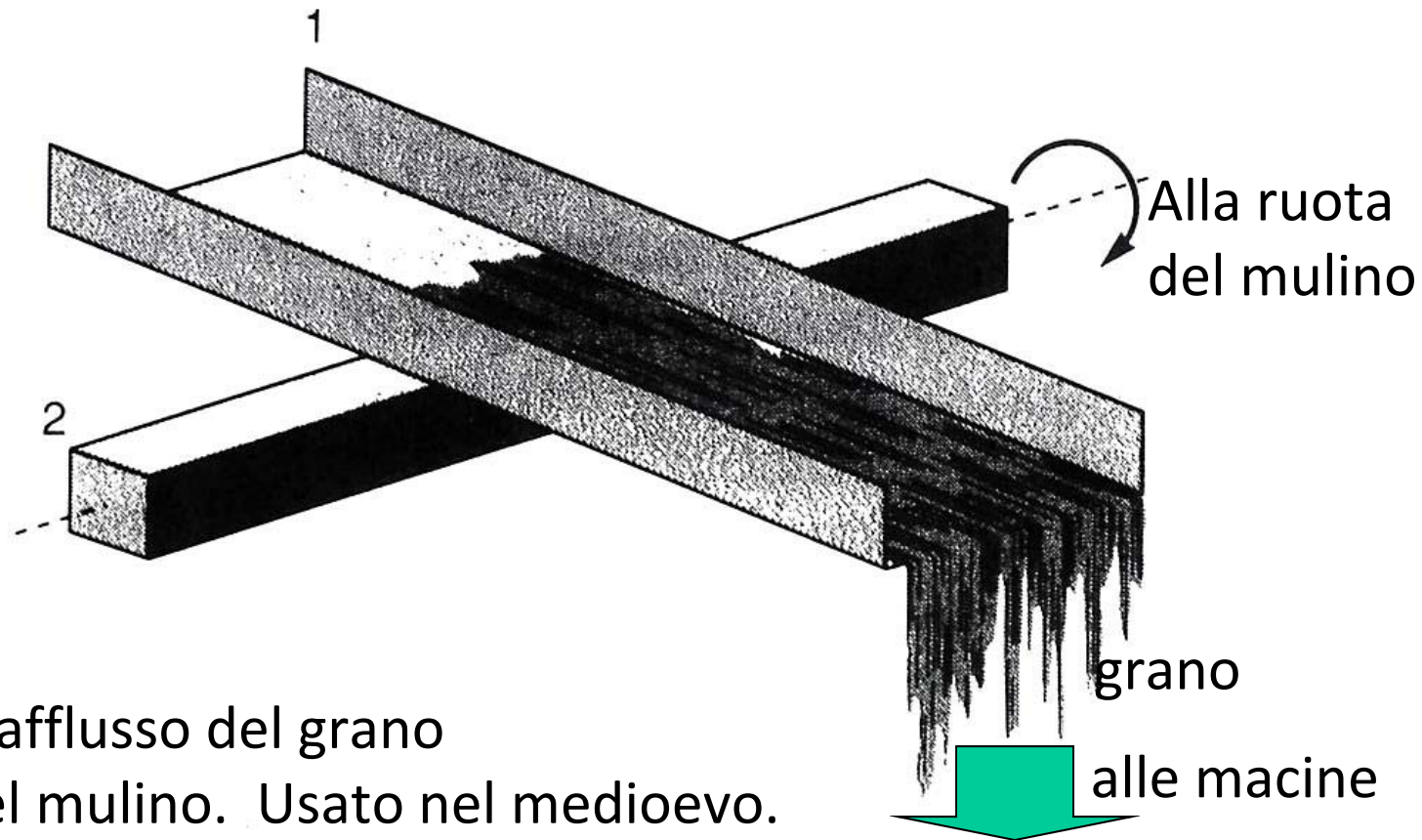


- Verificare anche la compatibilità dei valori ricavati per l'attenuazione α

Il feedback (= retroazione, = controreazione in certi casi)

- In un sistema si ha retroazione tutte le volte che la variabile di uscita influenza in qualche modo la variabile d'ingresso.
- Viene utilizzata dal nostro cervello in tutte le nostre attività, è una procedura innata (quando si vuole prendere qualcosa non si danno alla mano le coordinate dell'oggetto: si muove la mano controllando via via con gli occhi dove si trova e muovendola in modo da minimizzare la differenza tra posizione della mano e posizione dell'oggetto).
- La retroazione è stata utilizzata fin dall'inizio della civiltà tecnologica. Esempi:

1

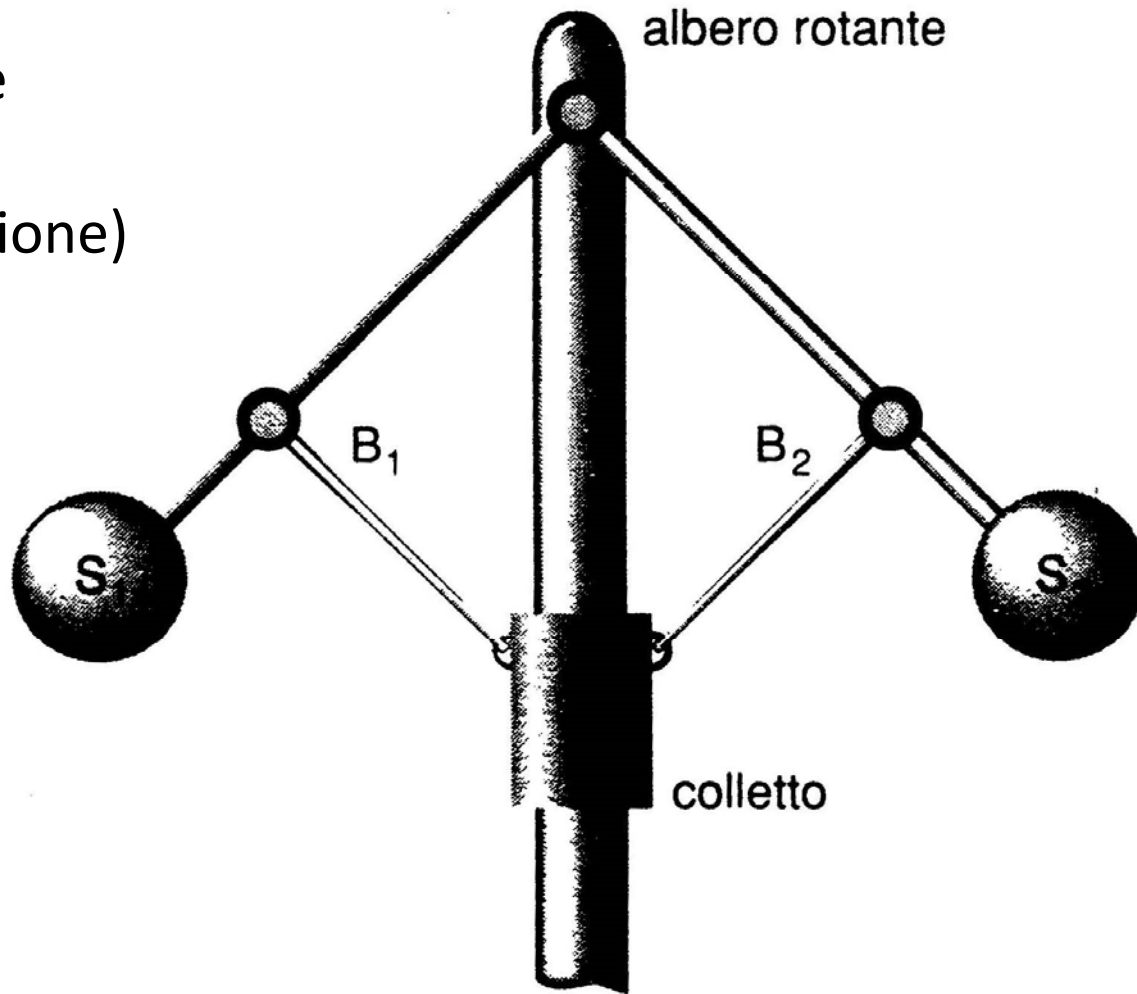


Regolatore di afflusso del grano alle macine del mulino. Usato nel medioevo.

Il grano cade nelle macine grazie ai balzelli dovuti alla rotazione del travicello a sezione quadrata 2.

Se la ruota del mulino, e quindi le macine, ruotano più velocemente, aumenta il numero di balzelli del canale 1 e quindi l'afflusso di grano alle macine. Così viene **stabilizzata** la qualità del macinato in uscita, e ottimizzata la quantità prodotta.

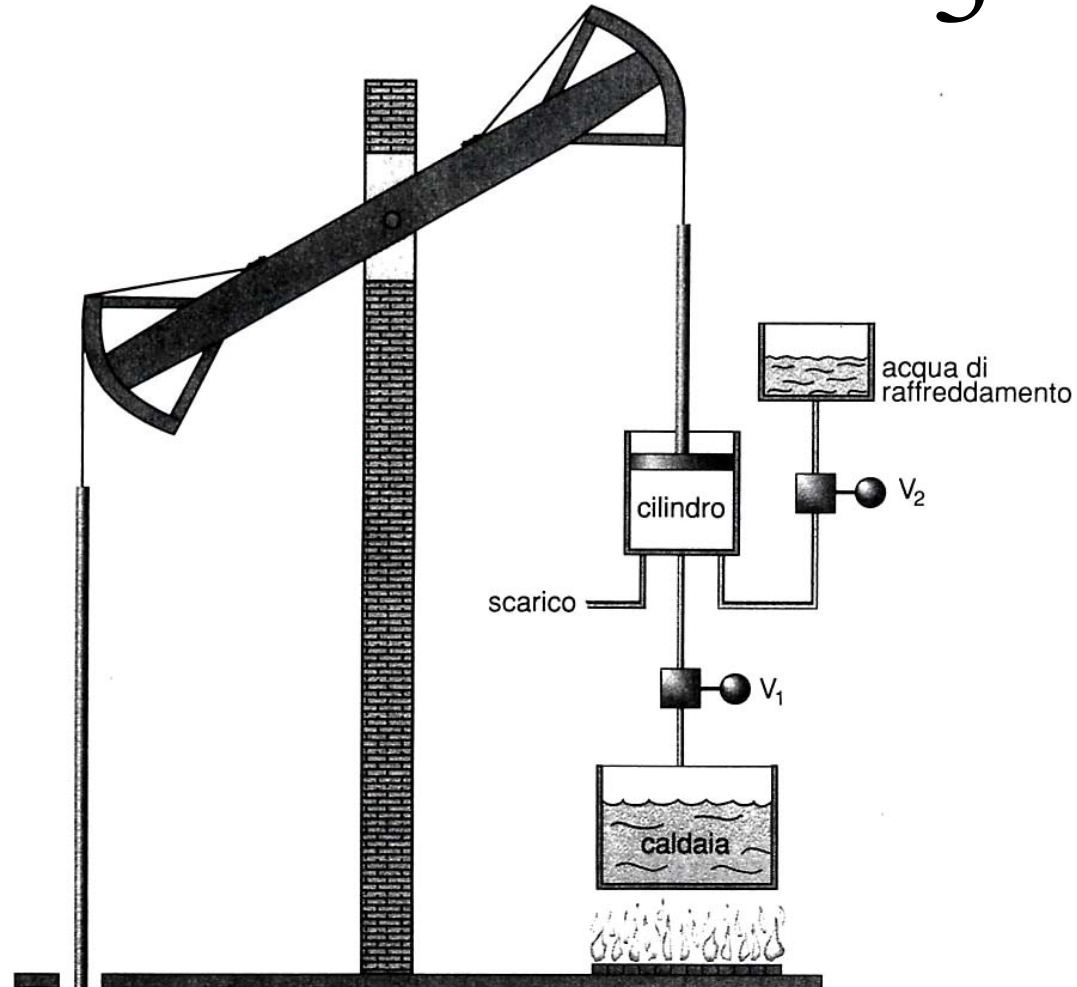
Retroazione
Negativa
(controreazione)



- Regolatore di velocità impiegato da Watt (1787) per le macchine a vapore. Se la velocità aumenta la forza centrifuga aumenta e alza le due sfere pesanti. Il colletto alzandosi agisce sulle valvole del motore diminuendo l' afflusso di vapore e quindi la velocità.

- La macchina a vapore di Newcomen (1705).
- Quando V_1 è aperta il pistone si solleva. V_2 invece raffredda il vapore e quindi il pistone si riabbassa.

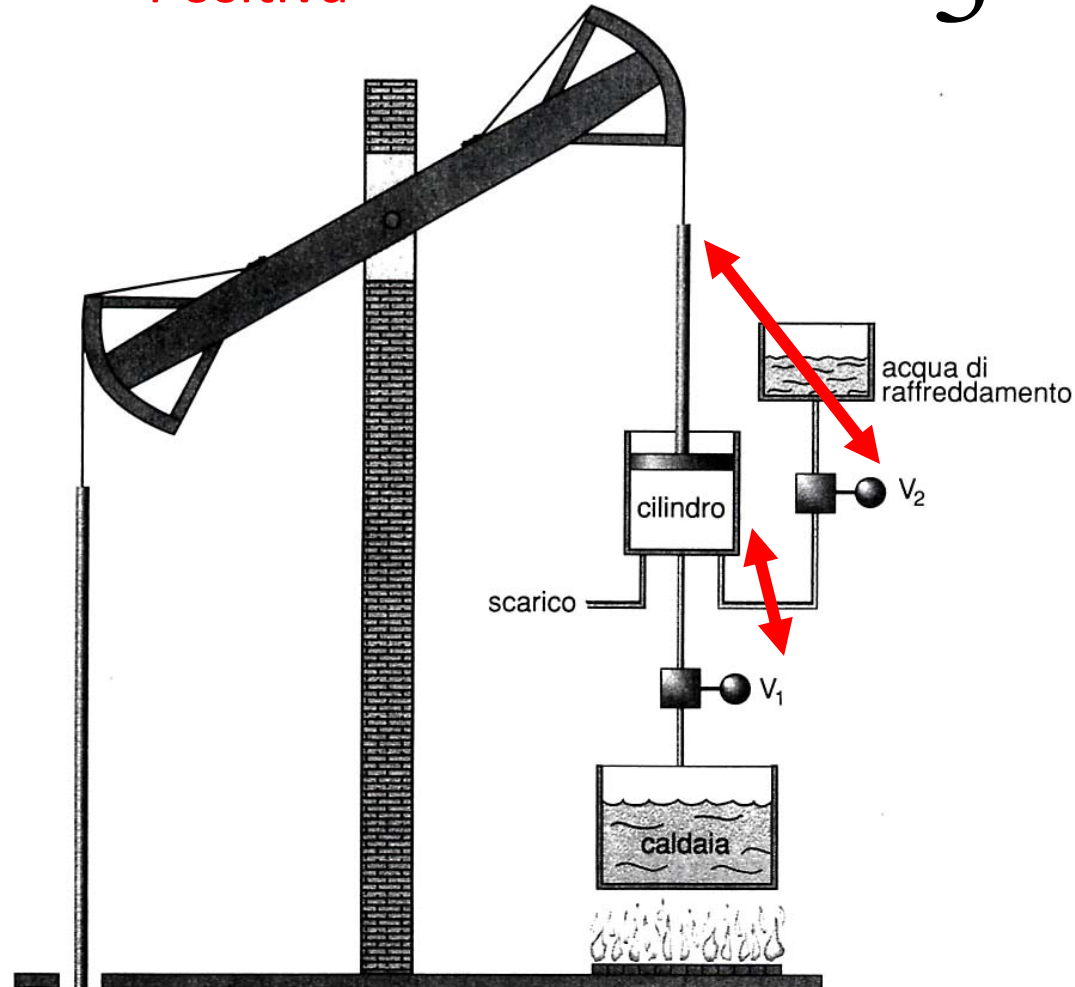
3



- La macchina a vapore di Newcomen (1705).
- Quando V_1 è aperta il pistone si solleva. V_2 invece raffredda il vapore e quindi il pistone si riabbassa.
- Nel 1713 Humphrey Potter modificò la macchina facendo comandare l'apertura e chiusura delle valvole direttamente dallo stantuffo.

Retroazione
Positiva

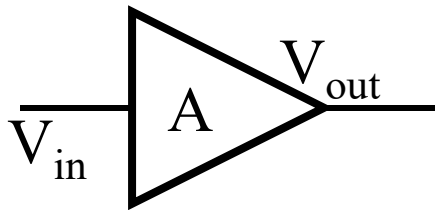
3



In questo caso la retroazione porta ad un movimento **oscillatorio**.

Controreazione in elettronica

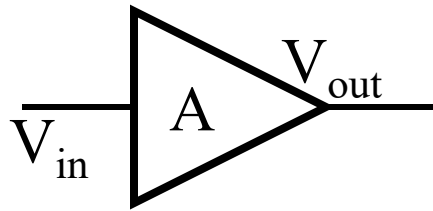
- Un **amplificatore** è un circuito elettronico capace di produrre in uscita una tensione (o una corrente) proporzionale alla tensione (o corrente) in ingresso.
- Non studieremo qui il suo funzionamento (esula dagli scopi di questo corso) ma lo considereremo semplicemente come un blocco circuitale con un ingresso e un'uscita, un po' come i filtri di cui ci siamo già occupati.
- Consideriamo un amplificatore di tensione con guadagno A molto alto (chiameremo A guadagno ad anello aperto). A è il rapporto tra tensione in uscita e tensione in ingresso.



$$V_{out} = AV_{in}$$

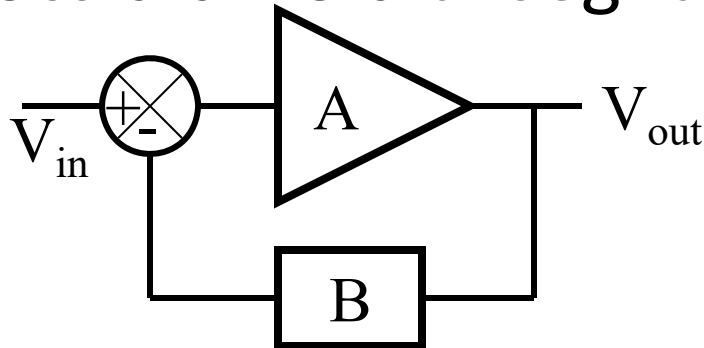
Controreazione in elettronica

- Consideriamo un amplificatore con guadagno A molto alto (chiameremo A guadagno ad anello aperto).



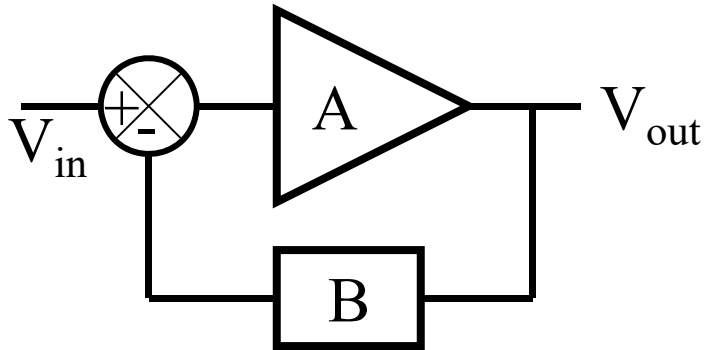
$$V_{out} = AV_{in}$$

- Prendiamo una frazione B del segnale in uscita e **sottraiamola** al segnale d'ingresso.



Controreazione in elettronica

- Prendiamo una frazione B del segnale in uscita, e **sottraiamola** al segnale d'ingresso. Avremo:



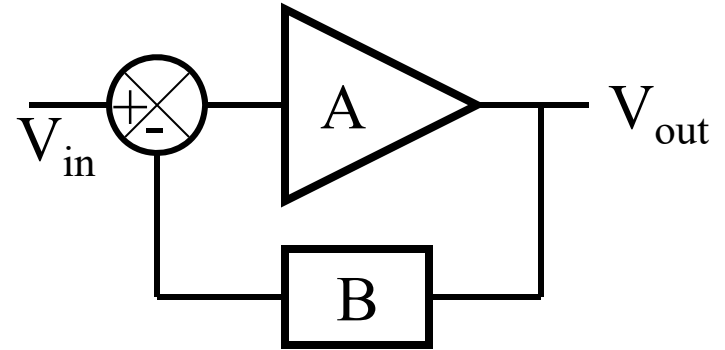
$$V_{out} = A(V_{in} - BV_{out})$$

$$V_{out} = \frac{A}{1 + AB} V_{in}$$

- Abbiamo quindi un nuovo guadagno: $G_C = \frac{A}{1 + AB}$
- Il nuovo guadagno G_C (detto guadagno ad anello chiuso) è inferiore a quello ad anello aperto A di un fattore $1 + AB$, detto fattore di desensibilizzazione.

Controreazione in elettronica

$$G_C = \frac{A}{1 + AB}$$



Se A e' molto grande

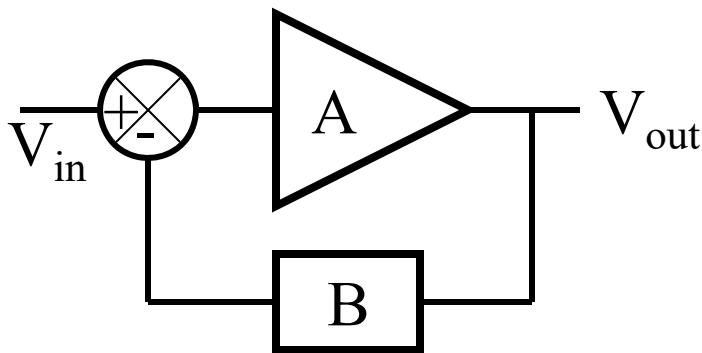
$$G_C \approx \frac{1}{B}$$

$$\text{es. } A = 10^3, B = 0.1 \Rightarrow G_C = \frac{A}{1 + AB} = \frac{1}{1/A + B}$$

$$\approx \frac{1}{B} \frac{1}{1 + \frac{1}{AB}} \approx \frac{1}{B} \left[1 - \frac{1}{AB} \right] = \frac{1}{0.1} \left[1 - \frac{1}{100} \right] = 9.9$$

Controreazione in elettronica

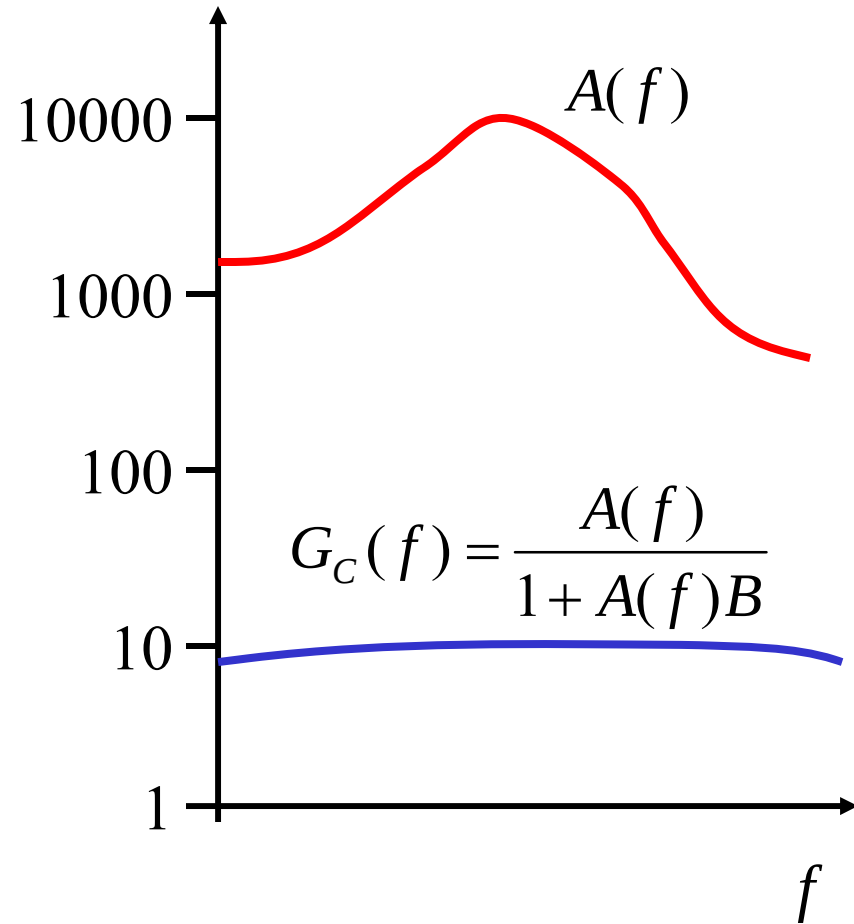
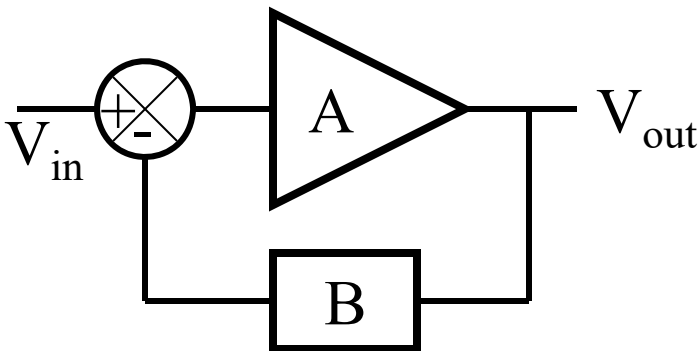
- Siamo partiti da un circuito con guadagno ad anello aperto di 1000, e siamo arrivati ad un nuovo circuito, più complesso, con guadagno 10.
- Dov'è il vantaggio ?
- Il vantaggio è che anche se A non è stabile, G_C lo è !



$$G_C = \frac{A}{1 + AB}$$

Controreazione in elettronica

- Un esempio tipico è un amplificatore con guadagno ad anello aperto $A(f)$ molto alto, ma dipendente dalla frequenza.
- Con controreazione $B=0.1$, il guadagno si riduce a circa 10, ma è praticamente lo stesso a tutte le frequenze (**equalizzazione del guadagno**).



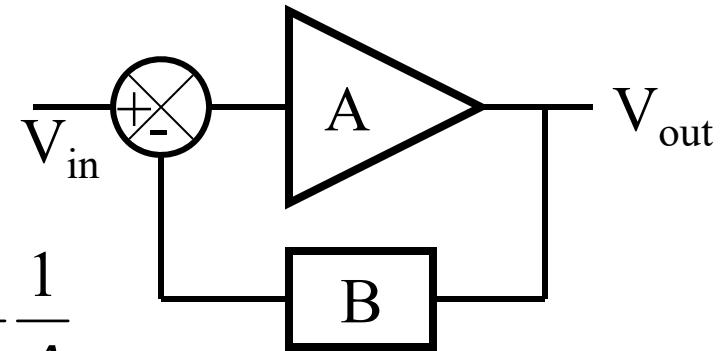
Controreazione in elettronica

- Se A dipende dalla Temperatura o da altri parametri, anche variazioni notevoli di A non modificano molto il guadagno ad anello chiuso, a condizione che sia $AB \gg 1$:

$$G = \frac{A}{1 + AB}$$

$$\frac{dG}{dA} = \frac{(1 + AB) - BA}{(1 + AB)^2} = \frac{A}{(1 + AB)^2} \frac{1}{A}$$

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{1}{1 + AB} \frac{\Delta A}{A}$$



$1 + AB$ = fattore di
desensibilizzazione

- Le non-linearità di un amplificatore (cioè variazioni del guadagno a seconda del livello del segnale d'ingresso) possono essere curate esattamente nello stesso modo.

Controreazione in elettronica

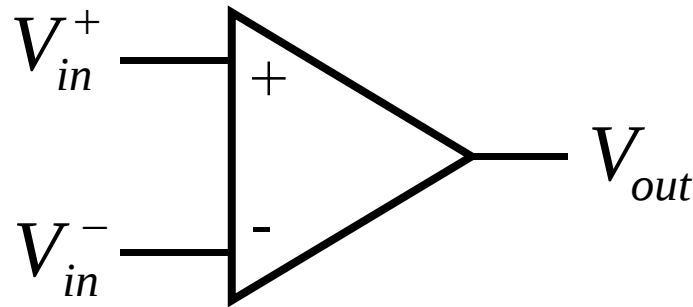
- Si può riottenere un guadagno alto (e stabile) mettendo 4 stadi controreazionati in serie. In tal caso $G_{tot} = (1/B)^4$, e comunque

$$\frac{\Delta G_{tot}}{G_{tot}} = 4 \frac{\Delta G}{G} = \frac{4}{1 + AB} \frac{\Delta A}{A} \ll \frac{\Delta A}{A}$$

- Quando (1928) Harold S. Black tentò di ottenere il brevetto per questa sua idea, (e di applicarla agli amplificatori per le linee telefoniche) fu trattato alla stregua di uno che proponesse il moto perpetuo.
- Oggi il feedback negativo (controreazione) è utilizzato ovunque in elettronica analogica.

Controreazione e amplificatori operazionali.

- L' amplificatore operazionale è un amplificatore **differenziale** (cioè amplifica la differenza tra due tensioni) con **altissimo guadagno**.
- E' un blocco costruttivo di sistemi elettronici importantissimo.
Simbolo dell' amplificatore operazionale:



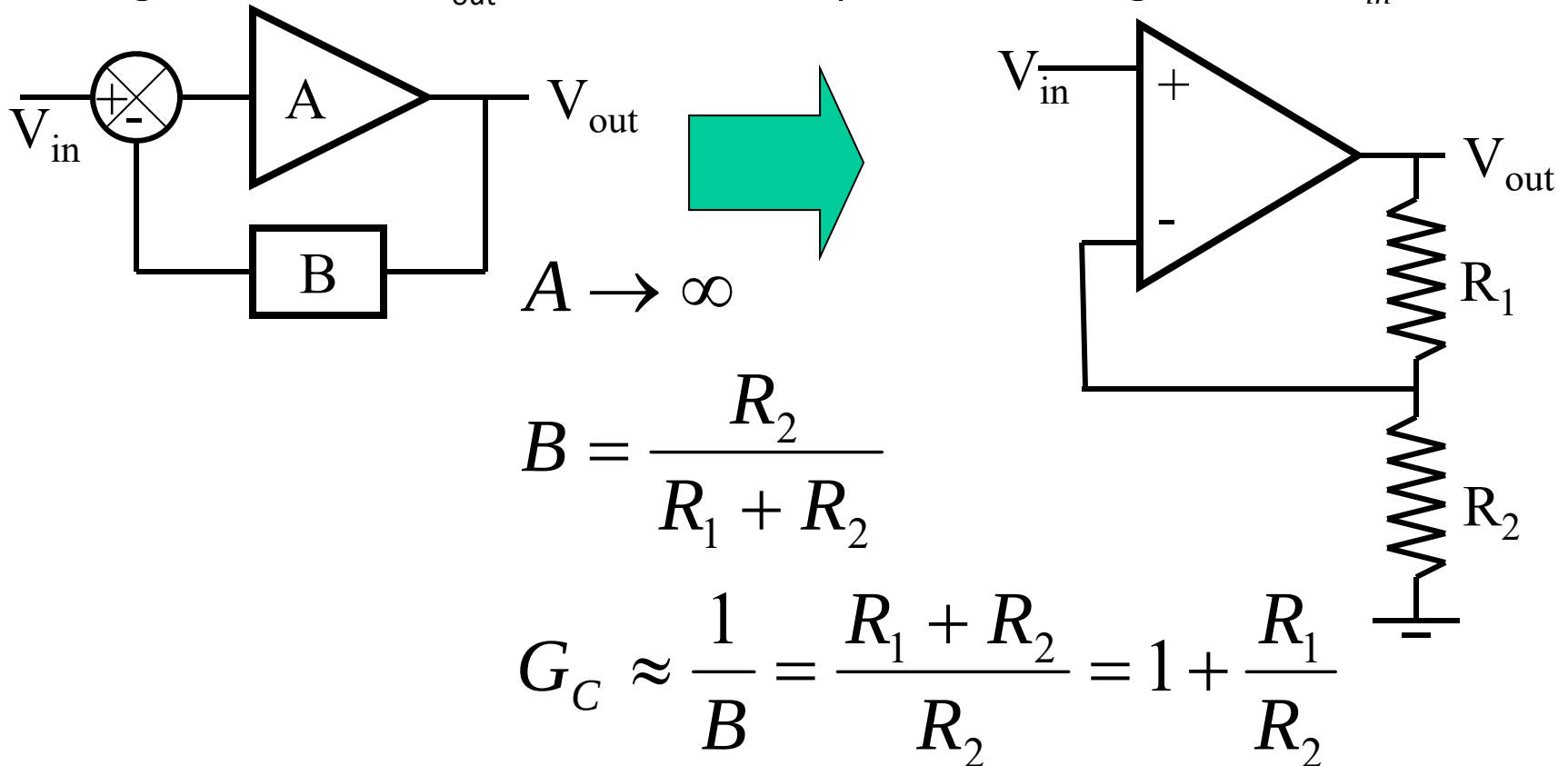
- Funzione:

$$V_{out} = A(V_{in}^{+} - V_{in}^{-})$$

- Dove A (guadagno ad anello aperto) è elevatissimo, $A \gg 10^6$
- Tanto che spesso si assume $A \rightarrow \infty$

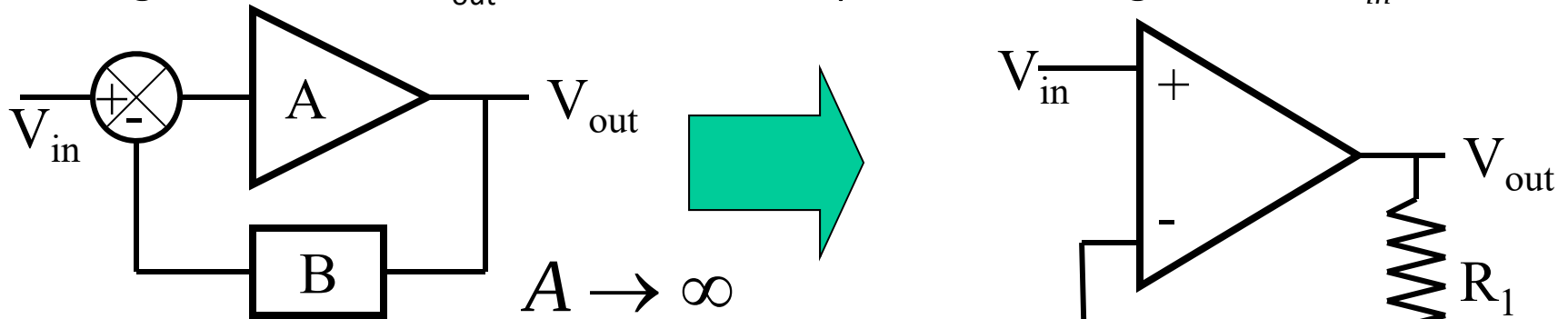
Controreazione e amplificatori operazionali

- L' amplificatore operazionale non viene mai utilizzato ad anello aperto.
- Si applica sempre un feedback per stabilizzarne le prestazioni.
- Data la natura differenziale dell' amplificatore operazionale, è molto facile realizzare in pratica il circuito di feedback.
- Esempio: **amplificatore non invertente**: Si sottrae al segnale V_{in} una frazione del segnale in uscita V_{out} ottenuta con un partitore, collegandola a V_{in}^- .



Controreazione e amplificatori operazionali

- L' amplificatore operazionale non viene mai utilizzato ad anello aperto.
- Si applica sempre un feedback per stabilizzarne le prestazioni.
- Data la natura differenziale dell' amplificatore operazionale, è molto facile realizzare in pratica il circuito di feedback.
- Esempio: **amplificatore non invertente**: Si sottrae al segnale V_{in} una frazione del segnale in uscita V_{out} ottenuta con un partitore, collegandola a V_{in}^- .



L' amplificazione G_c di questo circuito dipende **solo** dal rapporto tra le due resistenze che formano il partitore.

$$B = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$G_c \approx \frac{1}{B} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

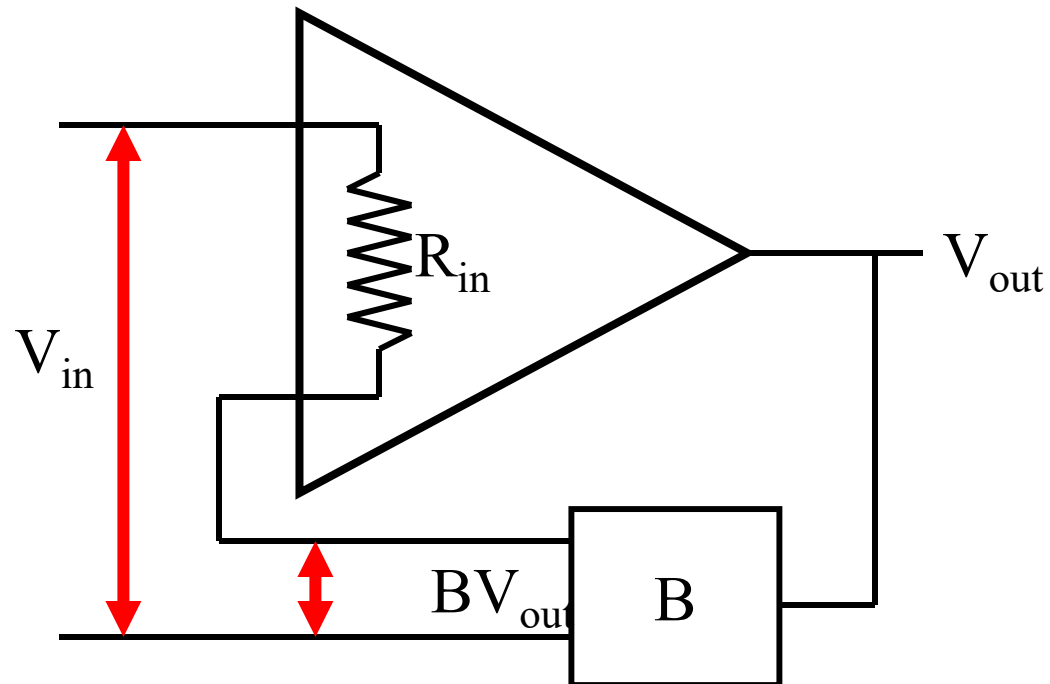
Impedenza d'ingresso

$$V_{in} = R_{in} I_{in} + B V_{out}$$

$$I_{in} = \frac{V_{in} - B V_{out}}{R_{in}} = \frac{V_{in} \left(1 - B \frac{A}{1 + AB} \right)}{R_{in}} =$$

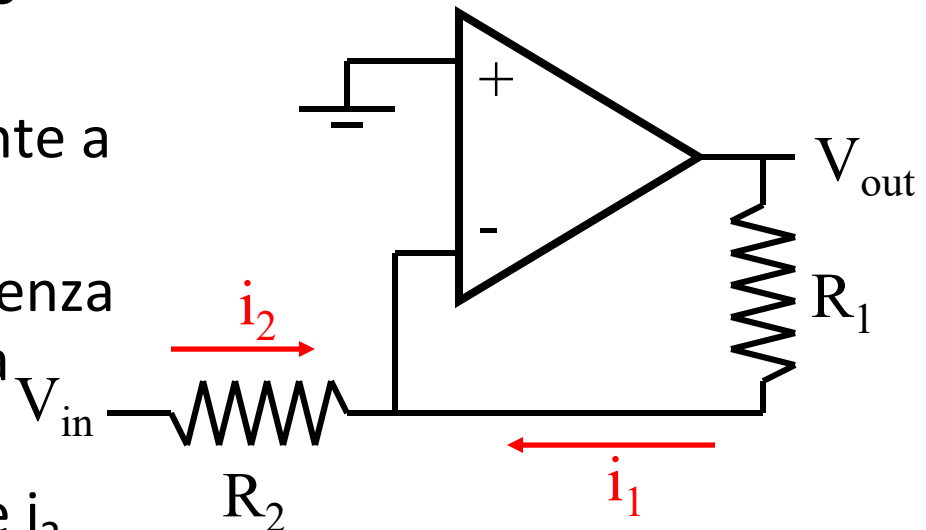
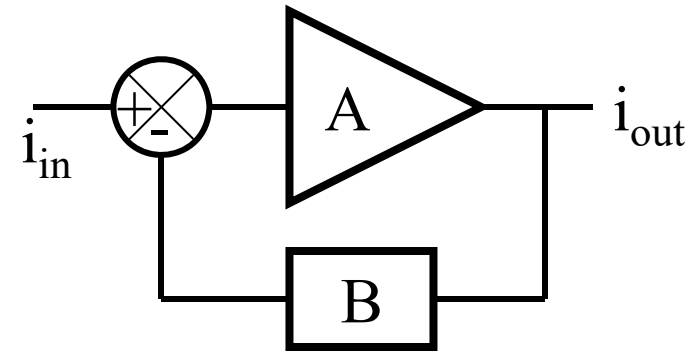
$$= \frac{V_{in}}{R_{in}} \frac{1}{1 + AB} = \frac{V_{in}}{R_{eff}}$$

$$R_{eff} = R_{in} (1 + AB)$$



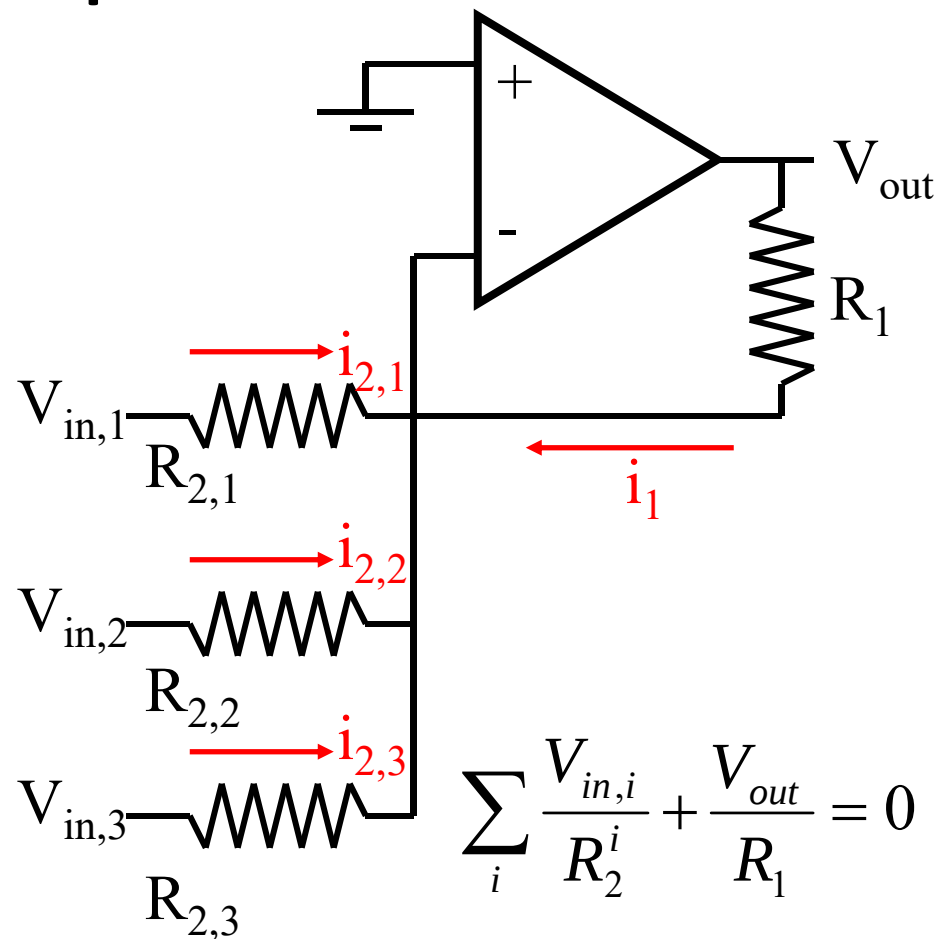
Controreazione e amplificatori operazionali.

- Amplificatore **invertente**. Si ottiene applicando il feedback in corrente.
- Siccome l' amplificazione ad anello aperto è così alta, gli ingressi + e - dell' operazionale devono essere sempre praticamente allo stesso potenziale.
- Quindi l' ingresso - è virtualmente a massa, a potenziale 0.
- Inoltre l' ingresso ha una impedenza alta e praticamente non vi entra corrente.
- La somma delle due correnti i_1 e i_2 deve essere 0
- Ne segue subito $V_{out} = -\left[\frac{R_1}{R_2}\right] V_{in}$



Controreazione e amplificatori operazionali.

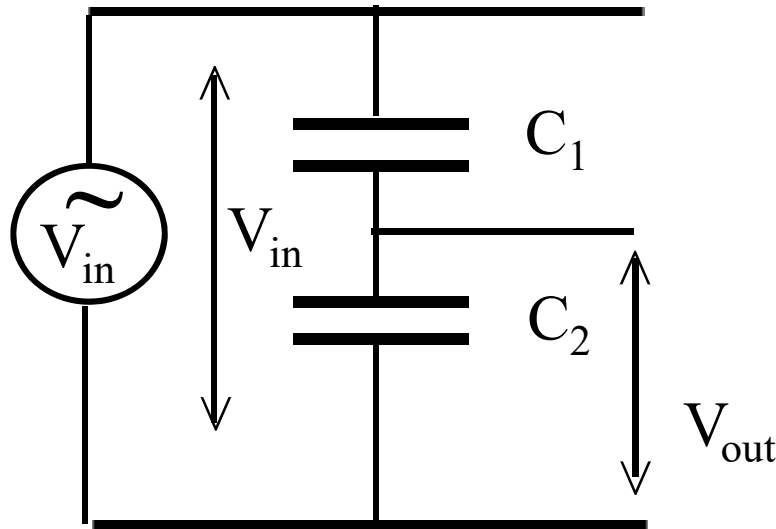
- Una utile generalizzazione dell' amplificatore invertente è il sommatore (mixer).
- E' chiaro che la somma di tutte le correnti che arrivano al nodo dell' ingresso negativo deve annullarsi.
- Il circuito esegue quindi la somma di tutte le tensioni in ingresso, pesando ciascuna con l' inverso della relativa resistenza.



$$\sum_i \frac{V_{in,i}}{R_2^i} + \frac{V_{out}}{R_1} = 0$$

$$V_{out} = -R_1 \sum_i \frac{V_{in,i}}{R_{2,i}}$$

Partitore Capacitivo



$$\begin{aligned} V_{out} &= \frac{Z_2}{Z_2 + Z_1} V_{in} = V_{in} \frac{\frac{1}{j\omega C_2}}{\frac{1}{j\omega C_2} + \frac{1}{j\omega C_1}} = \\ &= \frac{\frac{1}{C_2}}{\frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_1}} \cdot \frac{C_2}{C_2} V_{in} = \\ &= \frac{1}{1 + \frac{C_2}{C_1}} V_{in} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_{in} \end{aligned}$$

Indipendente dalla frequenza (vedi partitore resistivo),
e scegliendo opportunamente le due capacità si ottiene
La frazione di tensione alternata voluta, ma
l'oscilloscopio ha una impedenza di ingresso ed è in
Parallelo a C_2 quindi l'idealità vale a frequenze alte...

Modalità d'esame

- L'esame consiste in una prova pratica in laboratorio il 21 Giugno, in tre turni, (nei prossimi giorni su pag. Web i dettagli per la divisione in turni, e in una prova orale. A partire dal 20 Giugno appenderò un foglio a lato della stanza 148 edificio Marconi, con i giorni per gli orali (orali da calendario esami a partire dai primi di Luglio: prenotarsi su infostud e riempire opis!)
- Il superamento della prova pratica non è vincolante per presentarsi all' orale (ma la valutazione ottenuta è comunque considerata nella valutazione complessiva).
- L'orale verterà sia sul programma trattato a lezione, sia sulle relazioni relative alle misure eseguite in laboratorio.
- Il quaderno di gruppo va portato all'orale
- La prova orale può essere sostituita dal superamento di due esoneri sugli argomenti trattati a lezione e sulle misure eseguite.
- Il programma e le lezioni sono disponibili all'indirizzo
<http://oberon.roma1.infn.it/laboratorioelettrromagnetismo>

Elaborazioni da presentare all'esame (basate sui dati presi in laboratorio)

1. Studio dell'extratensione in un circuito RLC serie
2. Misura della resistenza interna dell'induttanza in un circuito RLC serie
3. Misura dell'impedenza di una linea di trasmissione
4. Misura della resistenza interna del generatore di segnali