

■ INTRODUZIONE

- Amplificatore operazionale:

- circuito integrato, "universale", di piccole dimensioni

- utilizzato per costruire circuiti **analognici**

- posso usarlo senza dovermi confrontare con la complessità dei componenti discreti.

- impiegato in contesti come:

- circuiti di misura

- condizionamento dei segnali

- filtraggio

- Caratteristiche generali

1. Componente **attiva** dotata di **2 alimentazioni** (positiva e negativa), generalmente **simmetriche** (rispetto al componente). $+V_s$ e $-V_s$

(sono spesso omesse negli schemi circuitali)

2. Presenta 3 connessioni:

◦ Ingresso invertente → ' V_- '; ' $-$ '

(non confondere con alimentazione negativa)

◦ Ingresso non-invertente → ' V_+ '; ' $+$ '

(" " positiva)

3. Uscita → V_{out}

- Gli OpAmp nascono dalla necessità di avere un amplificatore con $R_{in} = \infty$ e $R_{out} = 0$ (con avviamente un $G = \frac{V_{out}}{V_{in}} \gg 1$, indipendente da ω o T_c se $G(\omega)$ sia analiticamente semplice), in modo da poter agevolmente collegarli in cascata ed ottenere un guadagno molto grande.

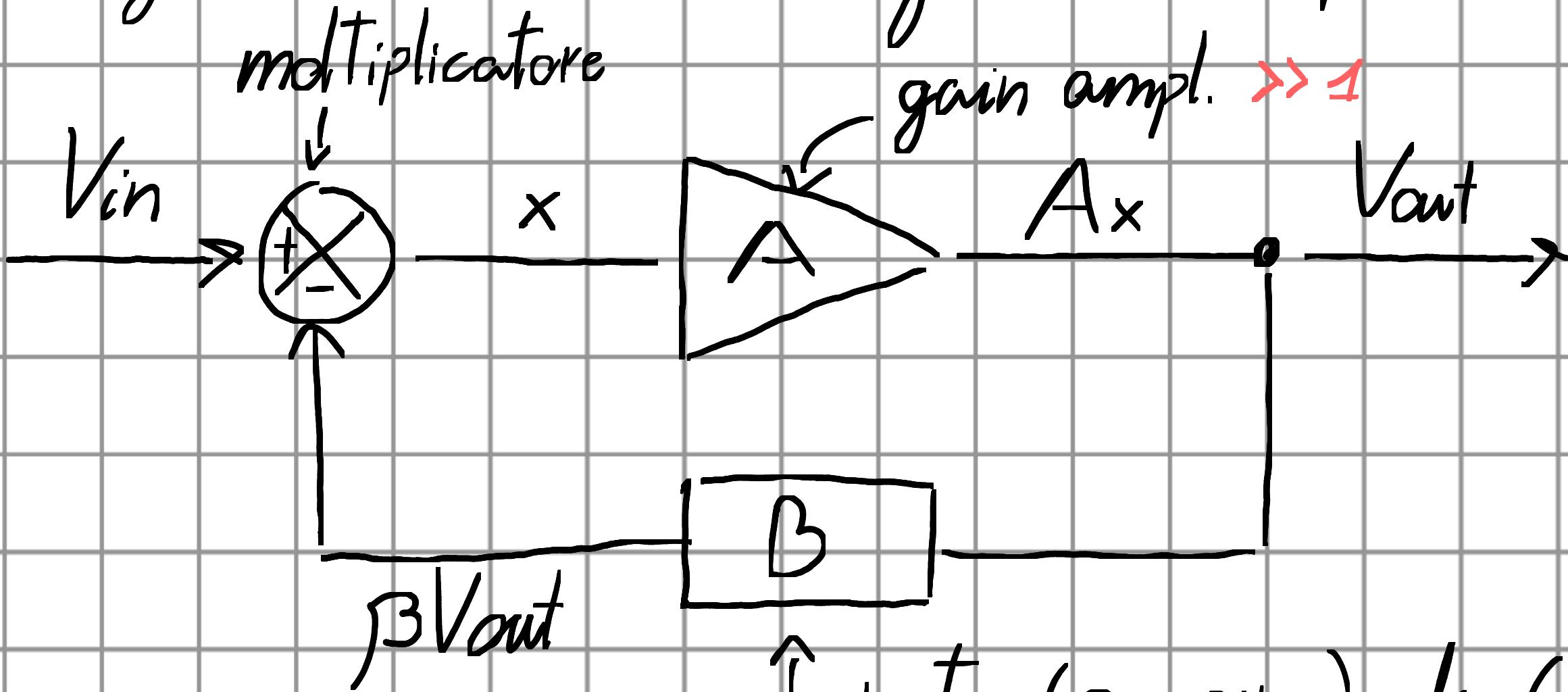
(in più risultano anche avere un comportamento lineare ed essere pressoché indipendenti da T , che sono sempre buone proprietà).

- La soluzione trovata per avere tutte queste caratteristiche in un amplificatore è la seguente:

OpAmp (con $G \gg 1$) autoregolato da feedback negativa (il più semplice possibile).

REGOLE D'ORO DEGLI OpAIP

- In generale ho la seguente amplificazione:



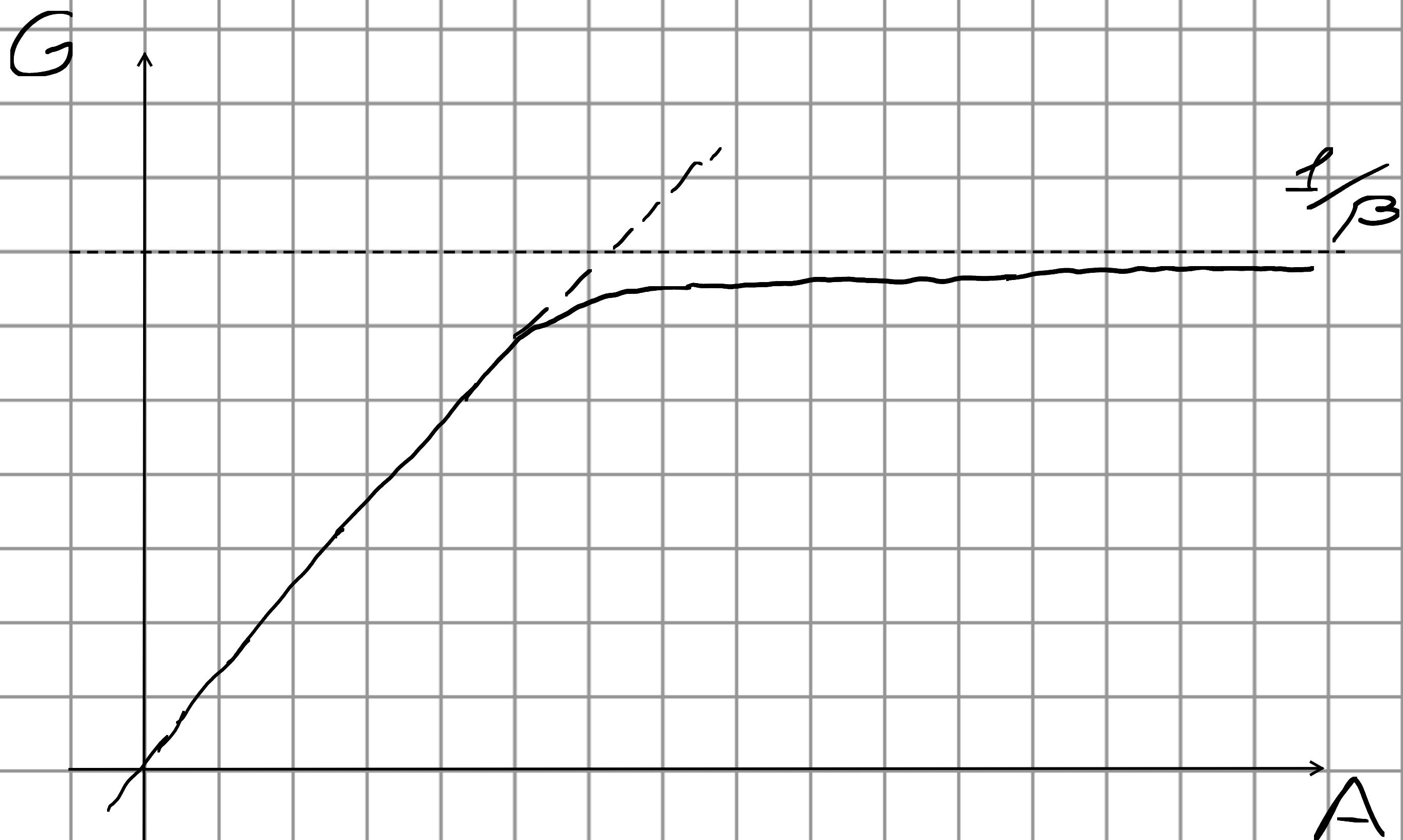
Cette (passiva) di feedback generalmente negativa

Da sopra: $V_{out} = A(V_{in} - \beta V_{out})$

da cui:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{A}{1 + \beta A} \quad (A = \text{open loop gain})$$

$\hookrightarrow G = \text{closed loop gain}$



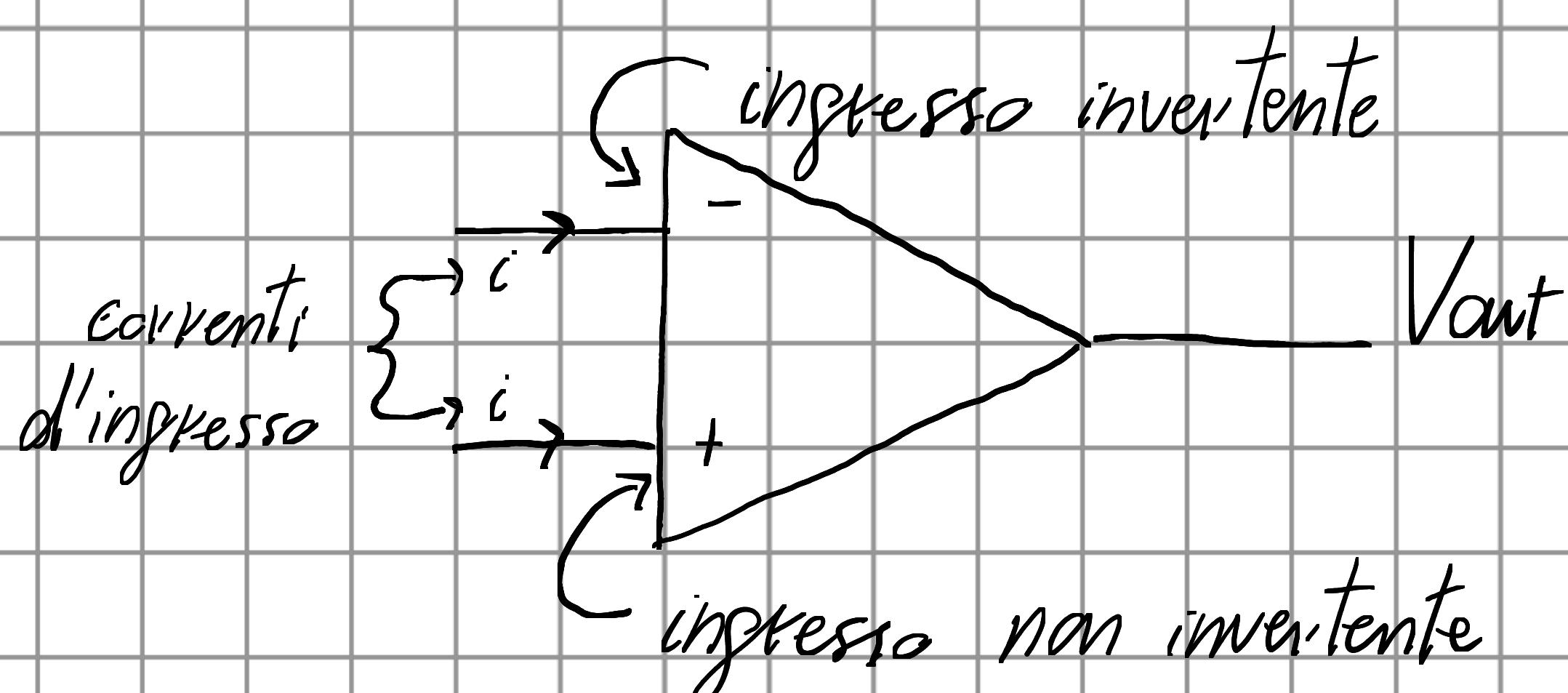
- Nella pratica:

Trasferisco la risposta dell'amplificatore alla rete di feedback, limitando V_{out} e sopprimendo $V_+ - V_-$

- A questo punto è sufficiente che sia $A \gg 1$, così che $G \propto \frac{1}{\beta}$ di modo che G sia indipendente dalle caratteristiche dell'OpAmp e dipen-

da solo dal feedback, che invece posso progettare a piacere, ottienendo quindi, almeno in linea di principio, un guadagno grande a piacere.

- Implementazione pratica



* Amplifica la differenza tra 2 segnali.

OpAmp → **amplificatore differenziale**, * contraddistinto da 3 caratteristiche:

i) Amplificazione A molto grande (grazie a questa caratteristica il guadagno di closed loop dipende solo dal feedback)

ii) V_{out} determinato dai 2 voltaggi in ingresso V_+ , V_-

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

iii) E' disegnato per avere un assorbimento di corrente trascurabile ai due ingressi.

- OPAAMP IDEALE.

1 $A \rightarrow \infty$

2 Correnti assorbite nulle

- Da 1 ottengo: $A \rightarrow \infty \Rightarrow V_+ = V_-$ (perché V_{out} deve restare finito)

ed ottengo le 2 regole d'oro degli OpAmp:

Reg. 1. $V_+ = V_-$ i 2 voltaggi in ingresso sono identici

Reg. 2. La corrente assorbita ai 2 ingressi è nulla

- Con l'aiuto di queste 2 regole è possibile risolvere i circuiti che presentano OpAmp nel limite ideale.

Oss: La Reg. 2 non viola la legge dei nodi di Kirchhoff perché la corrente entra nel componente attraverso le alimentazioni.

- Riassumendo: un OpAmp ideale ha un'amplificazione infinita e non assorbe corrente.

■ CIRCUITI AD OpAmp CON FEEDBACK NEGATIVO RESISTIVO.

- 2 configurazioni di amplificatori che godono delle seguenti proprietà:

i) Derivano da un'applicazione delle regole d'uso appena definite

ii) Il guadagno di questi amplificatori è determinato univocamente dalle resistenze connesse nella retroazione ed è indipendente dalle caratteristiche dell'OpAmp

iii) Output connesso ad ingresso invertente

$\Rightarrow V_{out} \uparrow \Rightarrow V_- \uparrow \Rightarrow$ ha retroazione negativa

\Rightarrow in tale regime (controllato) valgono le regole
d'uso degli OpAmp

- Ricordando: collegando l'uscita dell'OpAmp al suo ingresso inversore tramite una rete di feedback passiva (feedback negativo) otengo una configurazione di amplificazione indipendente dalle caratteristiche dell'OpAmp (difficilmente controllabile), ma dipendente dalle caratteristiche del ramo di feedback (controllabili a piacere)

AUTORIZZATORE NON INVERTENTE

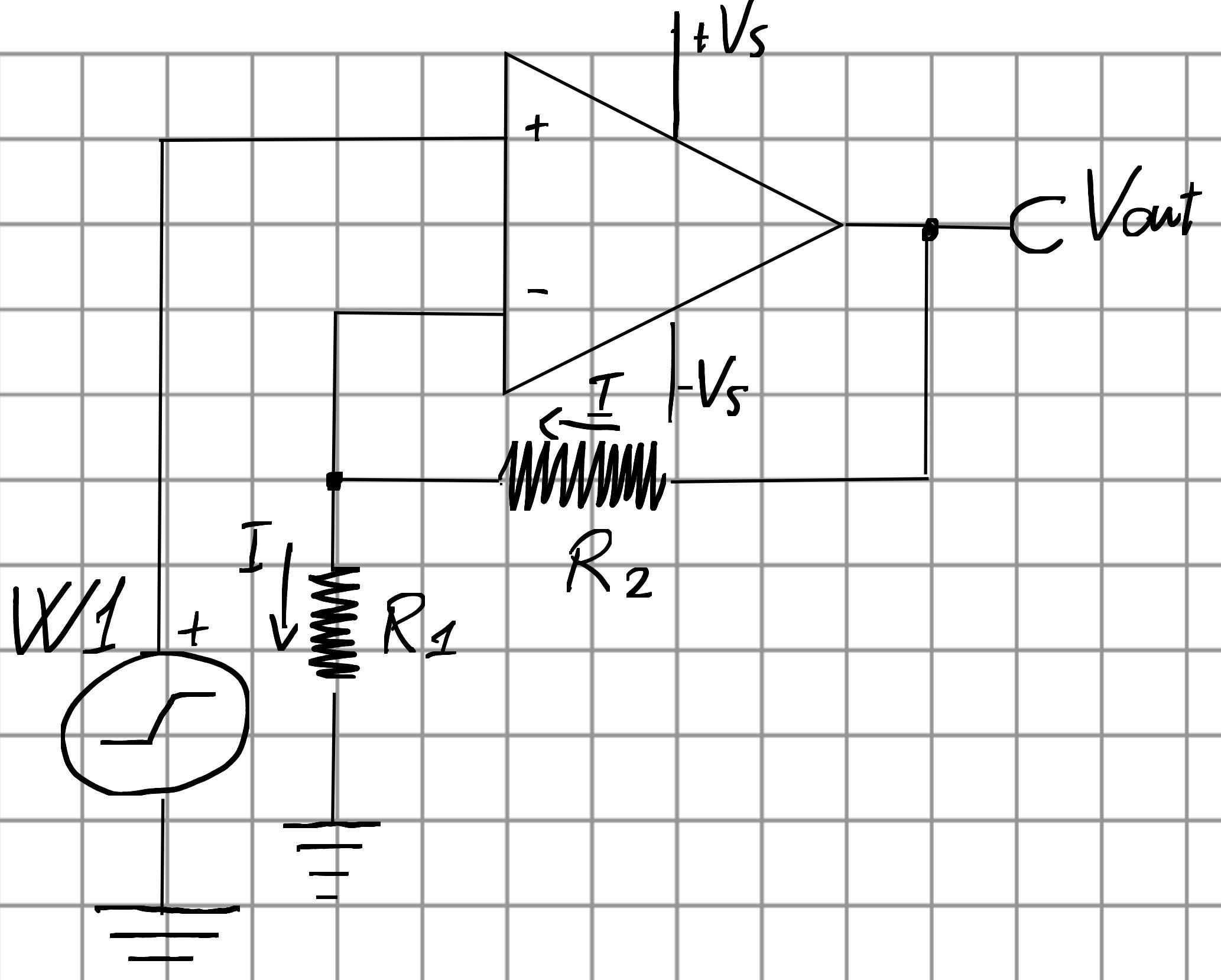
- V_{in} connesso a polo non inversore

I° regola d'oro:

$$V_+ = V_- = V_{in}$$

$\Rightarrow R_1$ attraversata da corrente:

$$I = \frac{V_{in}}{R_1}$$



II° regola d'oro: l'aumento di corrente da parte di V_- è trascurabile

$\Rightarrow I$ attraversa anche R_2 (legge dei nodi)

Allora considerando che $R_2 + R_1$ costituisce un partitore di tensione, ha che:

$$\frac{V_{in}}{R_1} = \frac{V_{out} - V_{in}}{R_2} \quad (= I)$$

(Oss: questa è un'equazione nei moduli della corrente.)

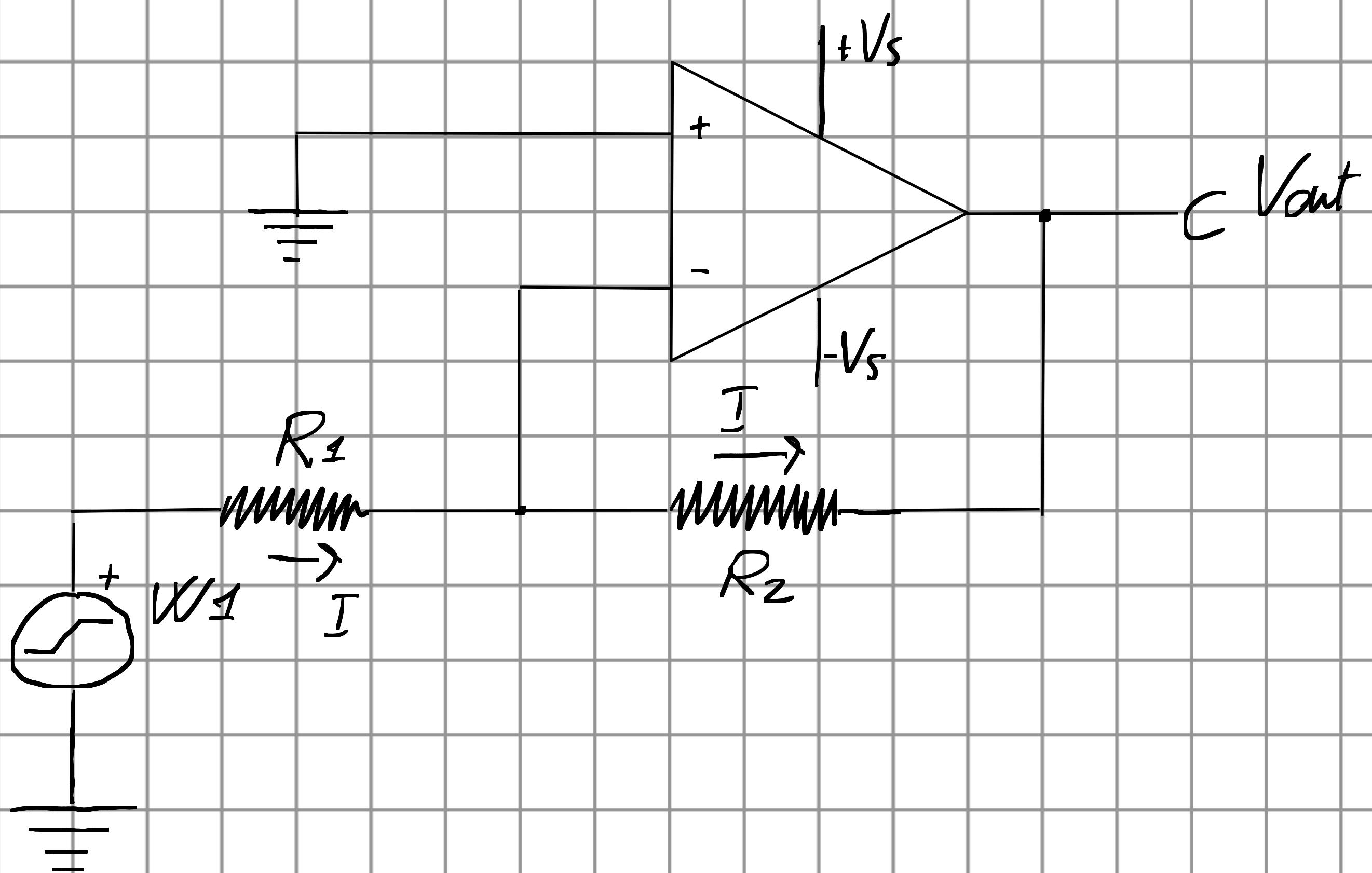
$$\Leftrightarrow \frac{R_2}{R_1} V_{in} + V_{in} = V_{out} \Leftrightarrow V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

$$\Leftrightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = G > 0 \quad (\Rightarrow \text{non invertente})$$

- Come preannunciato G è indip. dalle caratteristiche del OpAmp e dipende soltanto, in questa config. di ampl. non invertente, dalle **resistenze del partitore** R_1, R_2 .

Amplificatore INVERTENTE.

- V_+ collegato a **riferimento a Terra**



- **I° regola d'oro:** $V_+ = V_- = 0$

$$\Rightarrow R_1 \text{ percorsa da corrente: } I = \frac{V_{\text{in}}}{R_1}$$

- **II° regola d'oro:** V_- non assorbe corrente

$\Rightarrow I$ scorre anche in R_2

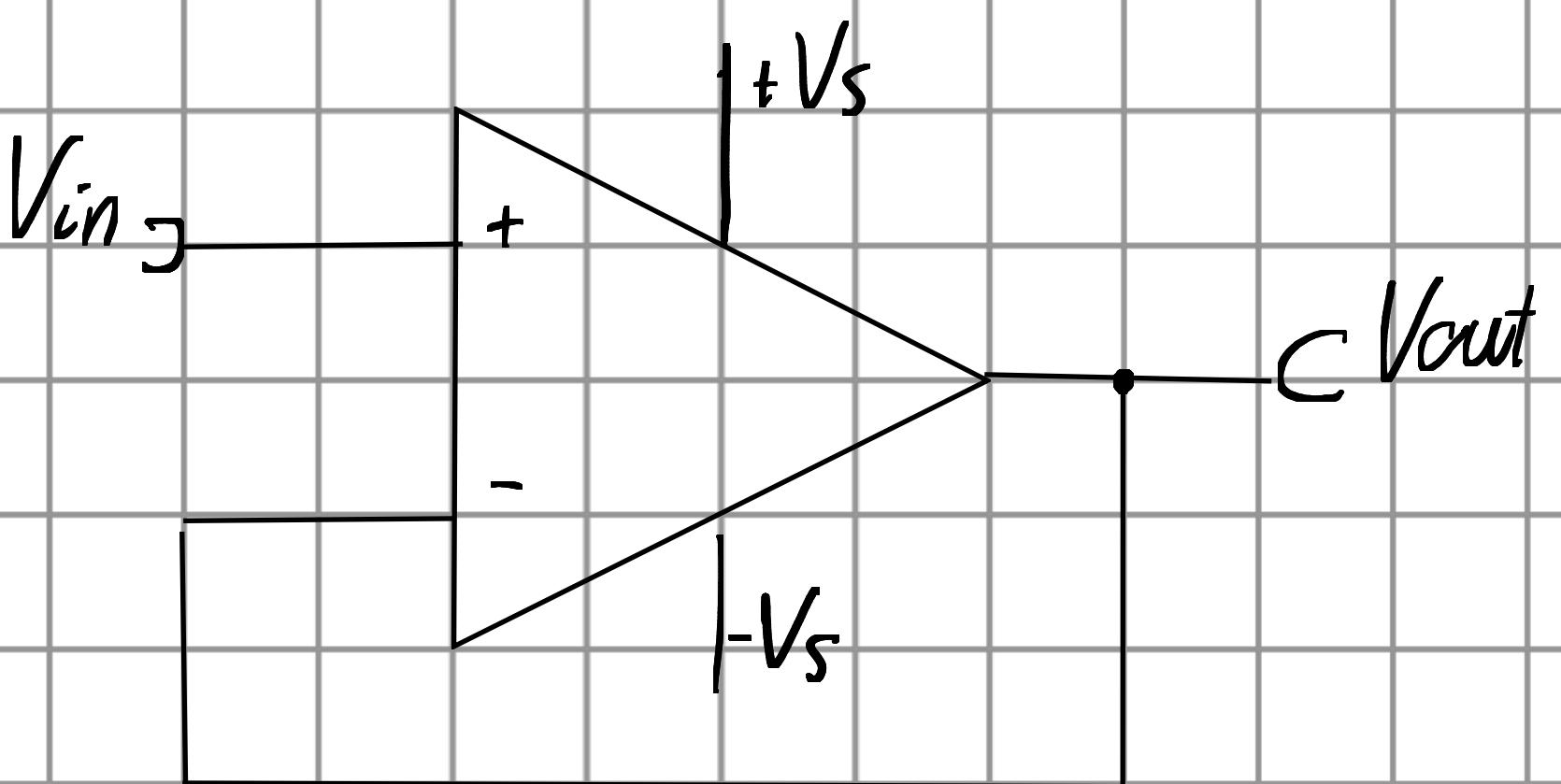
$$\Rightarrow \frac{V_{in}}{R_1} = -\frac{V_{out}}{R_2} \Leftrightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$\therefore G = -\frac{R_2}{R_1} < 0 \Rightarrow \text{invertente}$

• BUFFER.

Detta anche:

Op segnale o voltage follower



è una configurazione che produce una copia del segnale in ingresso

- Consiste in un amplificatore non invertente con resistenza di feedback nulla, i.e. l'uscita è cortocircuitata all'ingresso V_- invertente.

Per questa config. il guadagno (di closed loop) di V_+ è unitario 1.

- Può essere utilizzato per disaccoppiare delle maglie di circuiti in cascata, matchandone le resistenze di ingresso ed uscita (dell'una e dell'altra) sfruttando la $R_{in} = \infty$ e la $R_{out} = 0$ dell'OpAmp ideale.

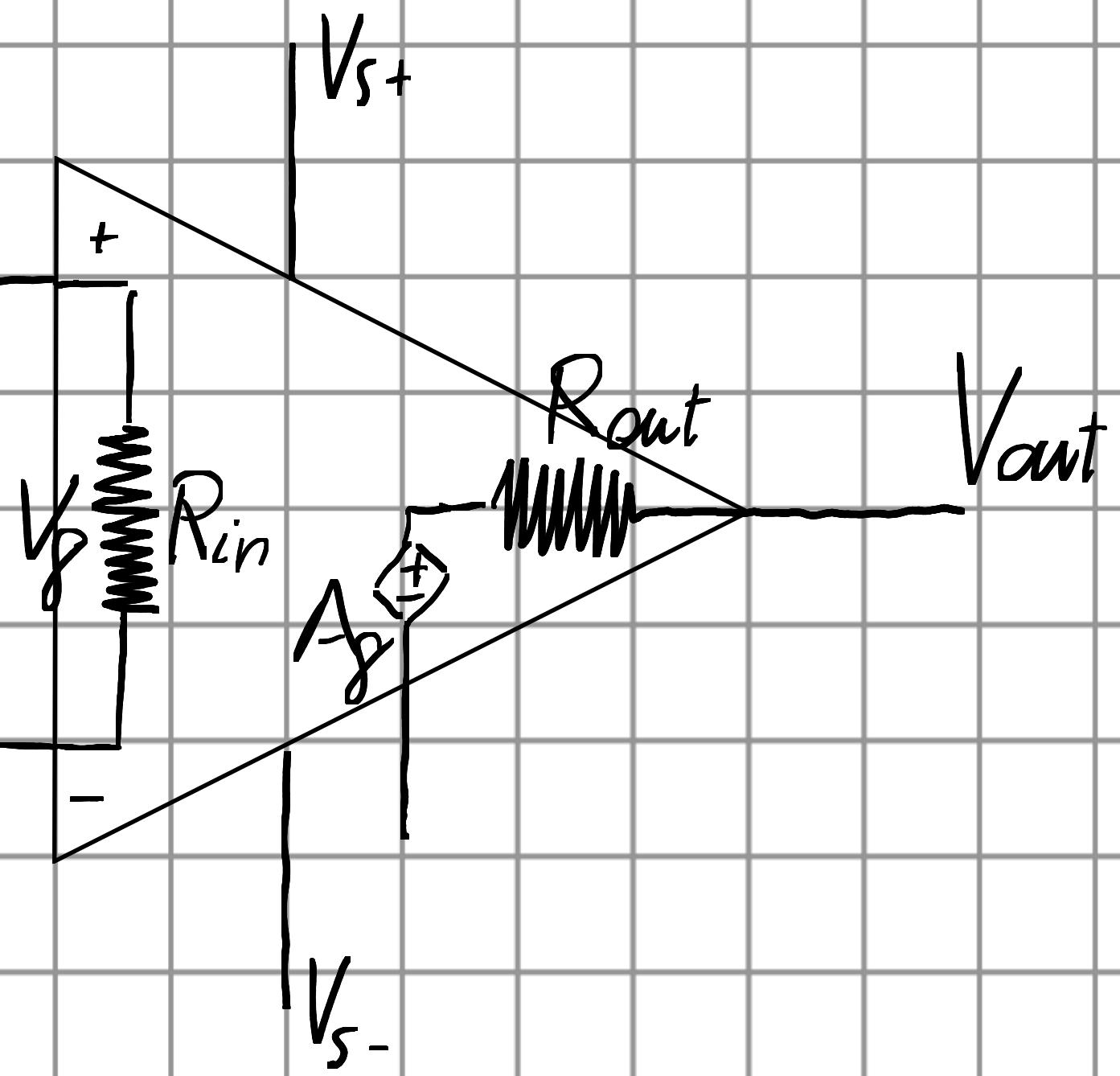
NON IDEALITÀ.

Nella realtà le idealità supposte nella sezione precedente non sono presenti:

- i) Resistenza in ingresso finita: $R_{in} < \infty \Rightarrow$ il componente assorbe corrente (poco, sperabilmente, ma l'assorbe)
- ii) Resistenza in uscita non nulla: $R_{out} > 0$
- iii) Amplificazione finita: $A < \infty$

- Queste sono le principali, ma se ne presentano anche altre, ovviamente anche dovute al design del componente, anche relative a particolari risposte in frequenza dello stesso.

- Un primo modello di OpAmp ideale è il seguente, in cui si tiene conto di (i), (ii) e (iii):



Con $R_{in}, A_g < \infty$

$R_{out} > 0$

Si possono suddividere le non idealità in 2 categorie 'A' e 'B':

A) Abbattute dal feedback

B) Che non possono essere eliminate

- Poi c'è presente anche un'altra categoria:

C) Non idealità volute per compensarne altre

↳ Vedi config di "Duffer" che **autooscilla**, effetto per altro osservato nel suo impiego per disaccoppiare le maglie del passa banda CRRC

↳ Il punto fondamentale nel contesto presente è che **risultano necessarie delle modifiche all'integrato per contrastare dei suoi brutti comportamenti**

Oss: molte delle non idealità dell'OpAmp sono dovute al fatto che si basa sulla tecnologia **CMOS** basando il suo funzionamento sui Transistor **FET** (ad effetto di campo).

- Di seguito un elenco di non idealità sia di tipo A che B

1. OFFSET VOLTAGE

- Comportamento ideale atteso:

$V_{out} = 0$ quando entrambe gli ingressi hanno esattamente lo stesso voltaggio (voltage offset nullo)

- Nella realtà accade che gli ingressi dell'OpAmp non sono "simmetrici" (o bilanciati), e meglio il circuito di ingresso dell'OpAmp non lavora allo stesso modo per i 2 ingressi (i.e. non è simmetrico sotto scambio degli ingressi), ciò è dovuto a problemi di costruzione (in particolare con i transistori, soprattutto se FET, agli ingressi non perfettamente uguali, che li sbilanciano o da una parte o dall'altra)

↳ Quello che osserva nella pratica è che se collega entrambi gli ingressi (V_+ , V_-) dell'OpAmp per avere un segnale differenziale in uscita esattamente nullo, V_{out} si **satira** ad V_{S+} od a V_{S-} (imprevedibilmente).

- Offset voltage, V_{os} → differenza tra i voltaggi in ingresso per portare l'output a zero

↳ come se ci fosse una batteria con V_{os} in serie ad uno dei 2 ingressi

Oss: Questa non idealità è di tipo 'B', i.e. **non risolta dal feedback**.

- Ottengo quindi:

$$V_{out} = A(V_+ - V_- + V_{os})$$

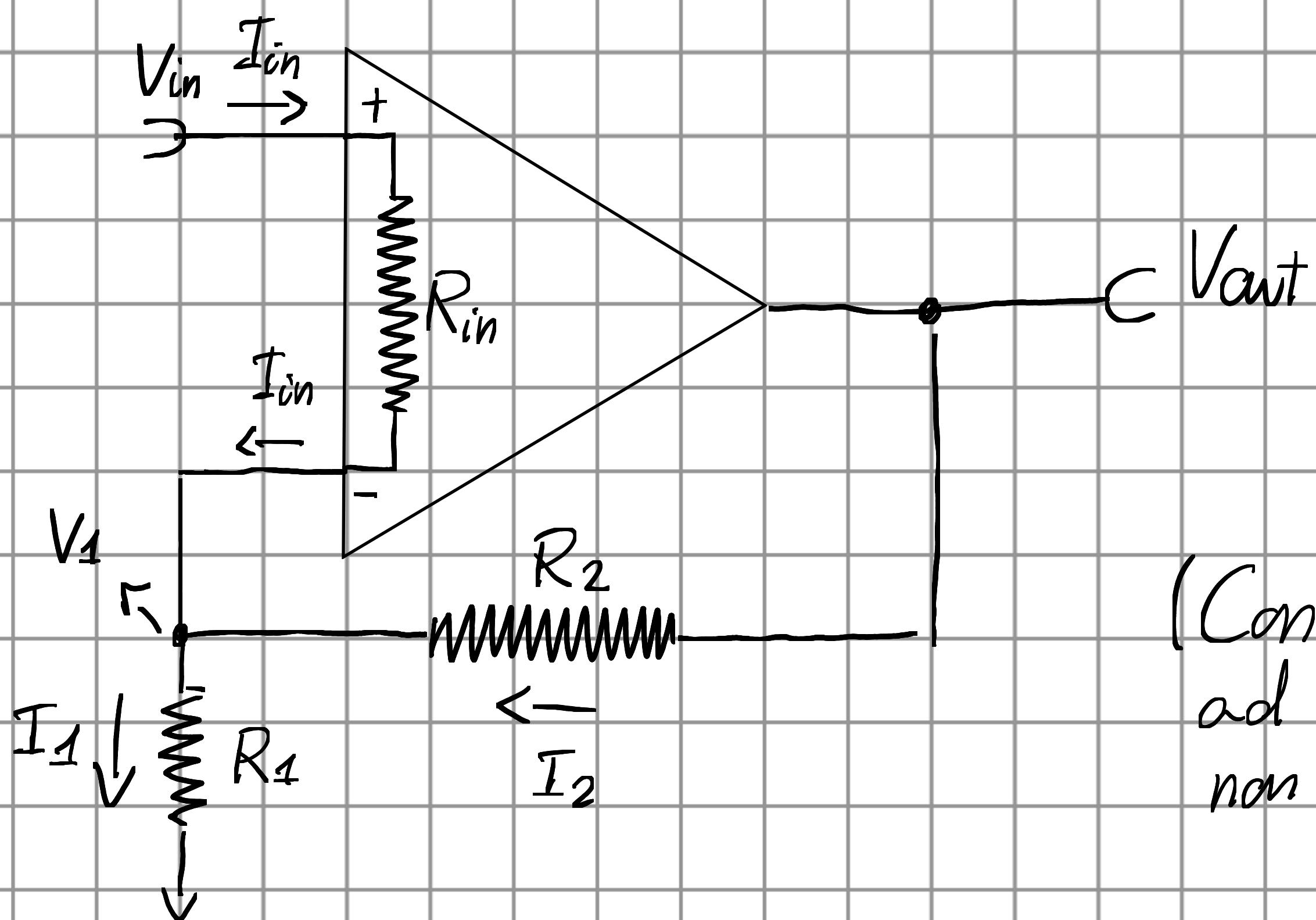
$$V_{out} = G(V_{in} + V_{os})$$

In generale, per OpAmp genericci, vale $V_{os} \approx mV$

2. RESISTENZA IN INGRESSO.

- Resistenza in ingresso \rightarrow resistenza vista tra i 2 ingressi differenziali

(Quella misurata guardando in un ingresso, con l'altro collegato a terra)



(Configurazione ad amplificazione non invertente)

- Se $R_{in} < \infty$ la I° golden rule non è più valida

$$V_- \neq V_+, \quad R_{in} < \infty \Rightarrow V_+ = V_- + R_{in} I_{in}$$

$$\Rightarrow I_2 \neq I_1$$

- Posso calcolare una stima al I° ordine di $\frac{V_{in}}{I_{in}}$ considerando $A < \infty$ e $R_{in} < \infty$, ma trascurando l'offset voltage e mantenendo tutto il resto ideale:

$$\text{in generale: } V_{out} = G V_{in} \quad \text{con} \quad G = \frac{A}{(1 + \beta A)}$$

- Supponendo $A = \infty$, ho che:

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

se $A < \infty$ e $V_+ \neq V_-$ (non vale la I° golden rule), trovo:

$$I_{in} = \frac{V_+ - V_-}{R_{in}} = \frac{V_{out}}{AR_{in}} = \frac{GV_{in}}{AR_{in}} \Leftrightarrow \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{A}{G} R_{in}$$

$$\Rightarrow \frac{V_{in}}{I_{in}} = (1 + \beta \Delta) R_{in} \simeq \beta \Delta R_{in}$$



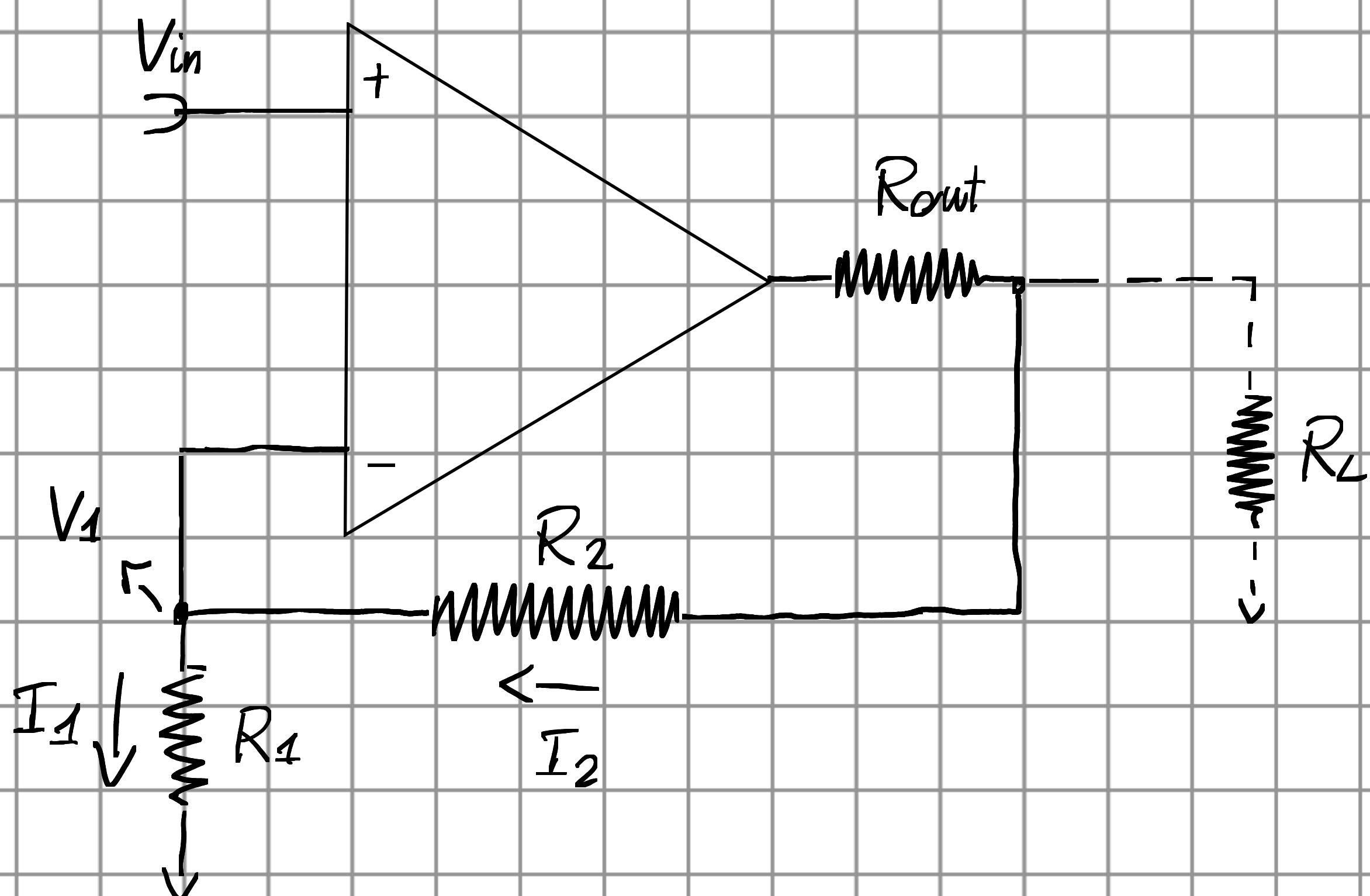
con $A \gg 1$ e $R_{in} < \infty$

Oss: questa non è ideale e di tipo 'A' (abbattuta dal feedback)

3. RESISTENZA DI USCITA

ovviamente lo vedo solo
se aggiunge un carico al
circuito.

- Si parla di resistenza d'uscita **intrinseca** dell'OpAmp (misurata senza feedback collegato)
- Sempre con la config. di amplificatore non invertente:

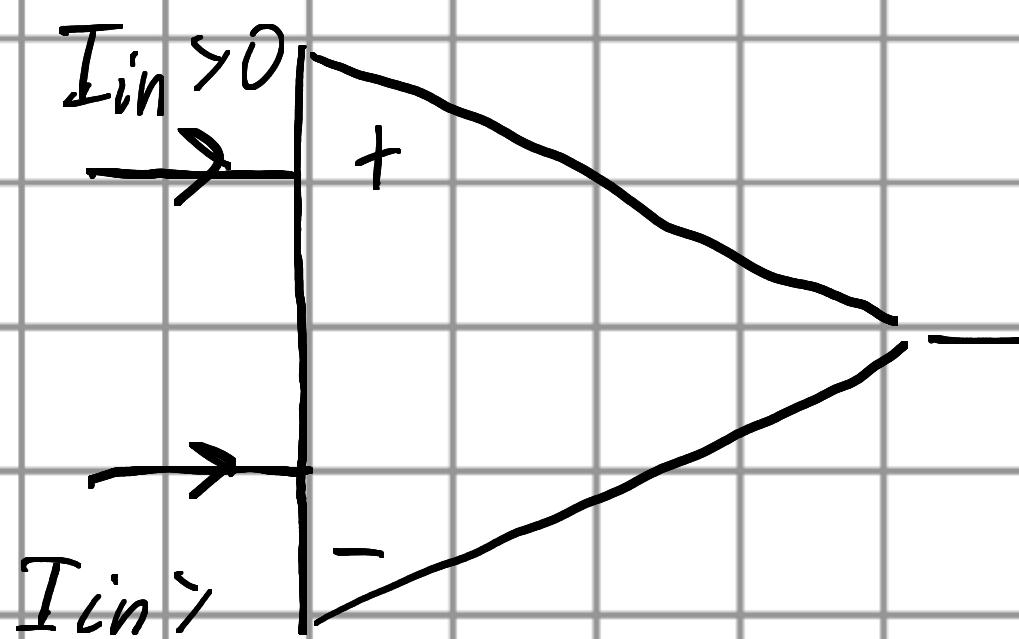


Oss: non idealità di tipo Δ , abbattuta dal feedback che può abbassare di molto R_{out} .

Il parametro determinante è la **massima corrente di uscita $\sim 10\text{mA}$**

Se $I_{out} > 10\text{mA}$ l'OpAmp esce dal regime di idealità
(non valgono le golden rules ed il ramo di feedback non abbatta R_{out})

4. Corrente di bias



Gli OpAmp assorbono / formiscono corrente

Devota alla presenza di 2 transistori in ingresso che costituiscono una coppia differenziale (che risponde bene a differenze tra segnali di ddp, ma non bene a variazioni sincrone)

I_{in} = corrente di base (o di gate per i FET) dei BJT

↳ Oss: se la coppia differenziale dell'OpAmp è costituita da FET, I_{in} è molto piccola (essendo FET vicini ai condensatori come design)

$$\frac{\Delta}{1+\beta\Delta} = 1 + \frac{R_1}{R_2} \Rightarrow \frac{\Delta R_2}{R_1+R_2} = 1 + \beta\Delta$$

$$\Rightarrow \frac{R_2}{R_1+R_2} - \frac{1}{\Delta(\omega)} = \beta(\omega)$$

$$\Delta(\omega) = \frac{\Delta(0)}{1+i\omega\tau} \quad \beta(\omega) = \frac{R_2}{R_1+R_2} - \frac{1+i\omega\tau}{\Delta(0)}$$

$$\beta(\omega)\Delta(\omega) = \frac{R_2}{R_1+R_2} \frac{\Delta(0)}{1+i\omega\tau} - 1$$

$$\frac{\Delta(0)}{1+i\omega\tau}$$

$$\frac{1+i\omega\tau + \beta\Delta(0)}{1+i\omega\tau}$$

$$\beta(\omega) = \frac{R_1}{R_2+R_1} \frac{\Delta(0)}{1+i\omega\tau} \frac{1+i\omega\tau}{1+i\omega\tau + \beta\Delta(0)}$$

$$\frac{\Delta(0)}{1+i\omega\tau} \frac{1+\beta}{1+i\omega\tau} \frac{\Delta(0)}{1+i\omega\tau}$$

$$\frac{\Delta(0)}{1+i\omega\tau + \beta\Delta(0)}$$