

UFSM – CT – DELC

O Amplificador Operacional

Parte I

Giovani Baratto
6/26/2007

Introdução

Neste texto, o amplificador operacional será considerado como uma caixa preta. Estamos interessados em compreender o seu funcionamento sem estudar os seus componentes: transistores, resistores, capacitores.

O amplificador operacional foi um dos componentes básicos dos computadores analógicos. O nome operacional devia-se ao seu uso na implementação de operações matemáticas. Hoje o nome operacional continua, mas este componente é usado em uma grande quantidade de aplicações.

O símbolo do amplificador operacional é apresentado na Figura 1. O símbolo é um triângulo, com dois terminais de entrada (+) e (-) à esquerda e uma saída, desenhada à direita do símbolo.

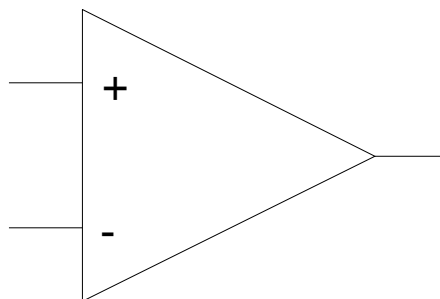


Figura 1 – Símbolo do amplificador operacional.

Na Figura 2, são apresentadas as tensões e correntes de um amplificador operacional. Foram adicionados ao símbolo do amplificador operacional dois terminais para a alimentação do dispositivo. O circuito é alimentado por duas fontes de tensão VCC. Não é necessário, mas geralmente as fontes de tensão para a alimentação do amplificador operacional são simétricas. A referência para as tensões do circuito será entre as fontes do circuito. As correntes serão consideradas positivas se estiverem entrando no amplificador operacional, como representadas na figura. O amplificador operacional possui um ganho de tensão A. O ganho de tensão é da ordem de 100.000 ou mais. O amplificador operacional possui uma resistência de entrada elevada, da ordem de 1 MΩ ou mais. A resistência de saída do amplificador é baixa, normalmente da ordem de dezenas de ohms. A tensão de saída v_o é dada por:

$$v_o = A \cdot (v_p - v_n)$$

Nesta equação, v_p e v_n são as tensões presentes nas entradas (+) e (-), respectivamente.

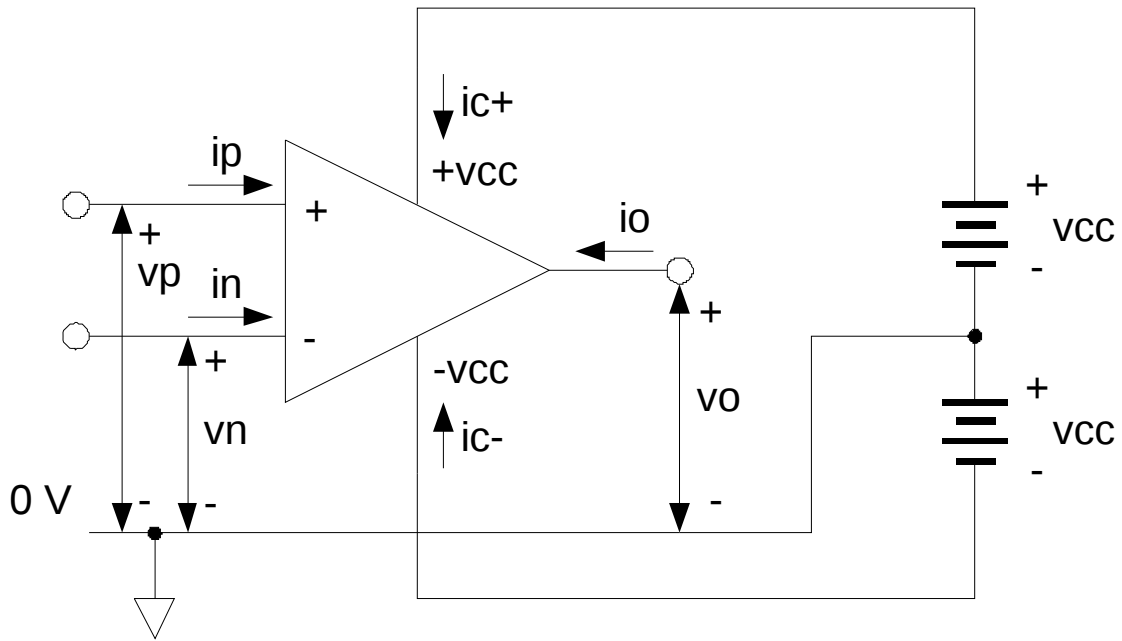


Figura 2 – Tensões e correntes em um amplificador operacional.

A curva de transferência de tensão para um amplificador operacional é apresentada na Figura 3. Ela possui uma região linear, para diferenças de tensões na entrada $|v_p - v_n|$ menores ou iguais a $vsat/A$. Quando a tensão de entrada é maior que este valor, a saída vo satura em um valor $\pm vsat$. A tensão $vsat$ é próxima à tensão de alimentação vcc . Utiliza-se normalmente a região linear no funcionamento do amplificador operacional. Nesta região, a diferença de tensão na entrada do amplificador operacional é pequena, pois o ganho deste é elevado. Para um amplificador operacional alimentado com uma fonte dupla de 30 V e com ganho de 100.000 V/V, a máxima diferença de tensão nos terminais de entrada do amplificador deverá ser de $30/100.000 = 300 \mu V$. Ou seja, para o amplificador operacional trabalhar na região linear, a tensão $v_p \cong v_n$. Esta é a chamada condição de curto circuito virtual. A corrente nas entradas de um amplificador operacional é pequena, pois a resistência de entrada é elevada. Isto nos permite escrever que $i_p \cong i_n \cong 0 A$. Isto é como se as entradas do amplificador operacional estivessem abertas. A corrente de saída do amplificador operacional é dada por: $i_o = -(i_{c+} + i_{c-})$. Esta corrente pode ser elevada, mesmo para pequenas correntes na entrada do amplificador operacional.

A curva de transferência de tensão para um amplificador operacional é dada por:

$$v_o = \begin{cases} -vsat, & A(v_p - v_n) < -vsat \\ A(v_p - v_n), & -vsat \leq A(v_p - v_n) \leq +vsat \\ +vsat, & A(v_p - v_n) > +vsat \end{cases}$$

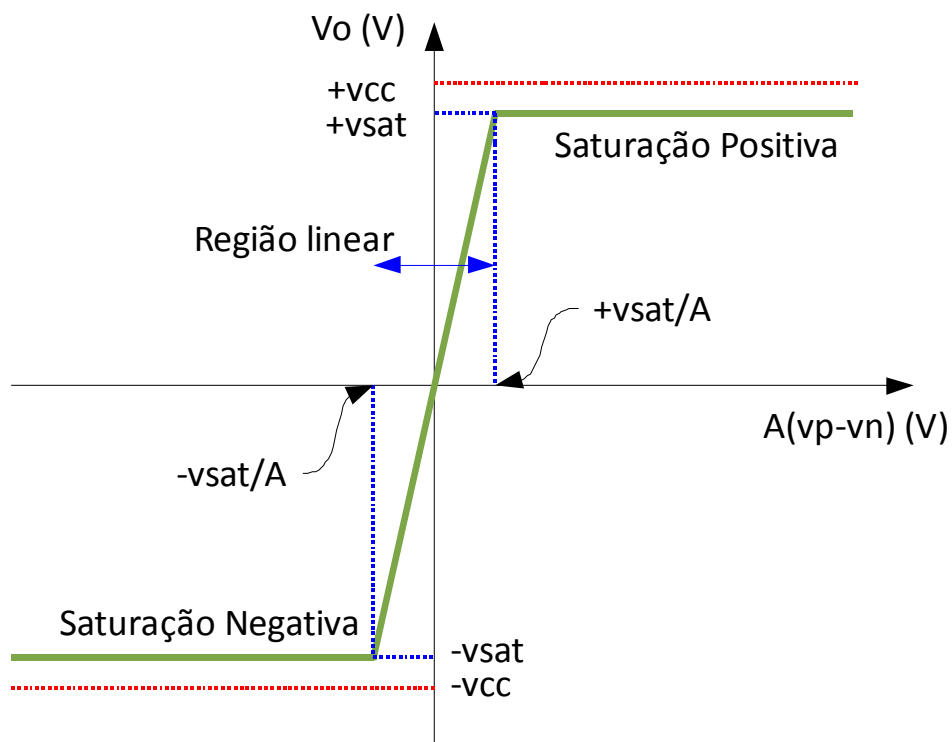


Figura 3 – Curva de transferência de tensão para um amplificador operacional.

O Amplificador Operacional Ideal

O amplificador operacional ideal possui as seguintes características:

- O ganho de tensão A em malha aberta é infinito.
- A resistência de entrada é infinita
- A resistência de saída é zero.

Com o ganho de tensão infinito, a condição de curto-circuito virtual será $v_p = v_n$. Com a resistência de entrada infinita, as correntes de entrada $i_p = i_n = 0$ A.

O modelo do amplificador operacional ideal é apresentado na Figura 4.

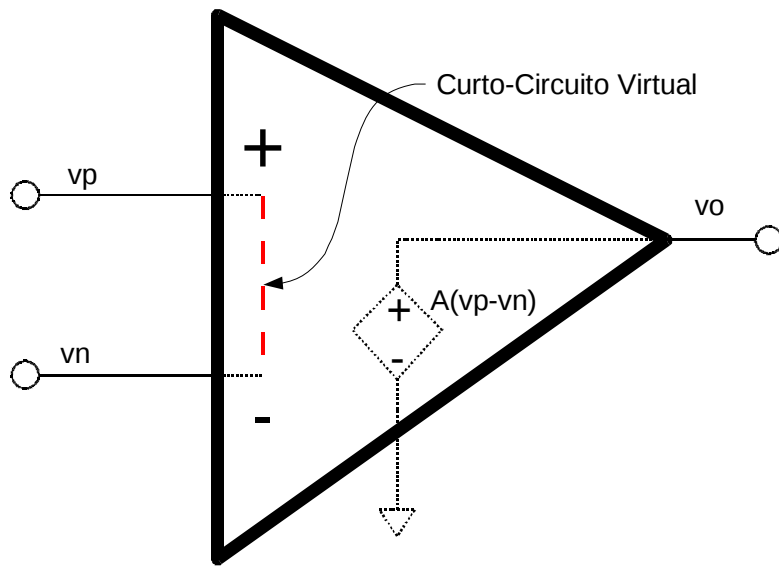


Figura 4 – Ilustração do modelo ideal de um amplificador operacional.

O Amplificador Inversor

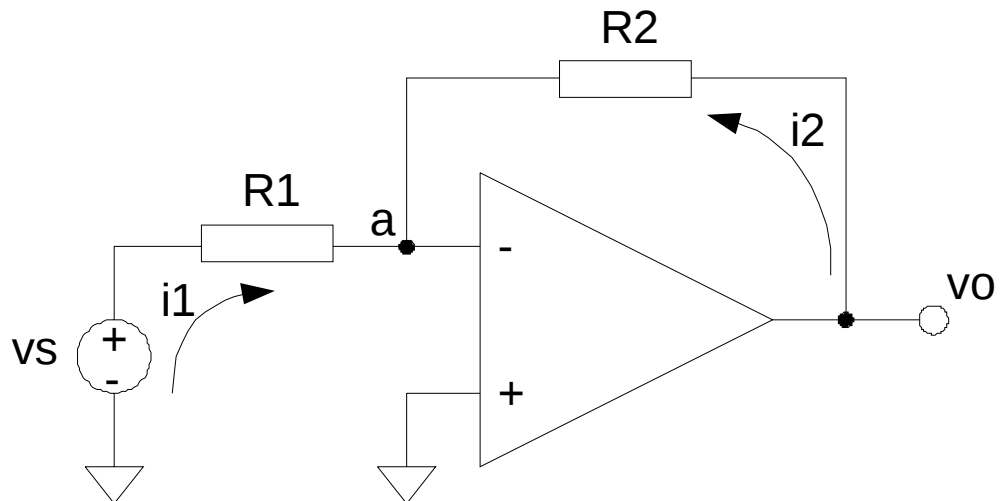


Figura 5 – Diagrama de um amplificador operacional na configuração inversora.

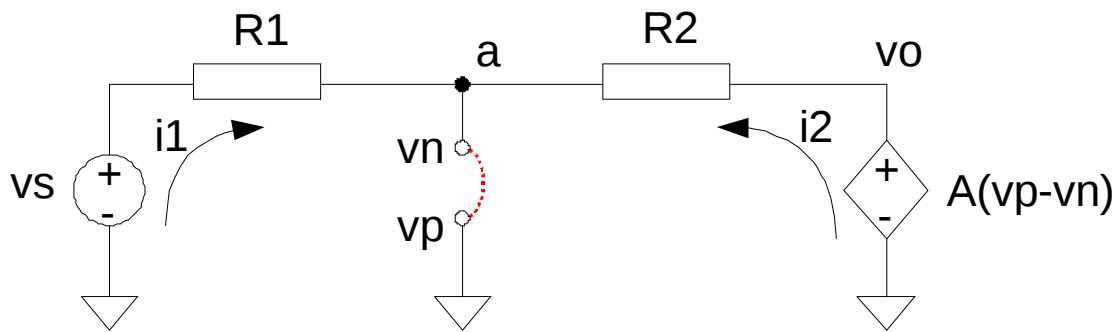


Figura 6 – Modelo para o amplificador operacional ideal na configuração inversora.

Na Figura 6, os terminais v_n e v_p têm um curto-circuito virtual. Como v_p está ligado ao terra, v_n também deve ter o potencial 0 V. A tensão sobre o resistor R_1 será igual a v_s . A corrente i_1 é encontrada pela lei de ohm: $i_1 = v_s/R_1$. A tensão sobre o resistor R_2 é igual a v_o . A corrente i_2 será: $i_2 = v_o/R_2$. No nó a, existem as correntes i_1 e i_2 . Os terminais v_n e v_p apesar de estarem no mesmo potencial, pela condição de curto-circuito virtual, não estão conectados. A corrente entre v_n e v_p é zero. Usando a lei de Kirchhoff para correntes no nó a:

$$-i_1 - i_2 = 0$$

Substituindo os valores de i_1 e i_2 :

$$\frac{v_s}{R_1} + \frac{v_o}{R_2} = 0$$

$$v_o = -\frac{R_2}{R_1} v_s$$

O Amplificador Integrador

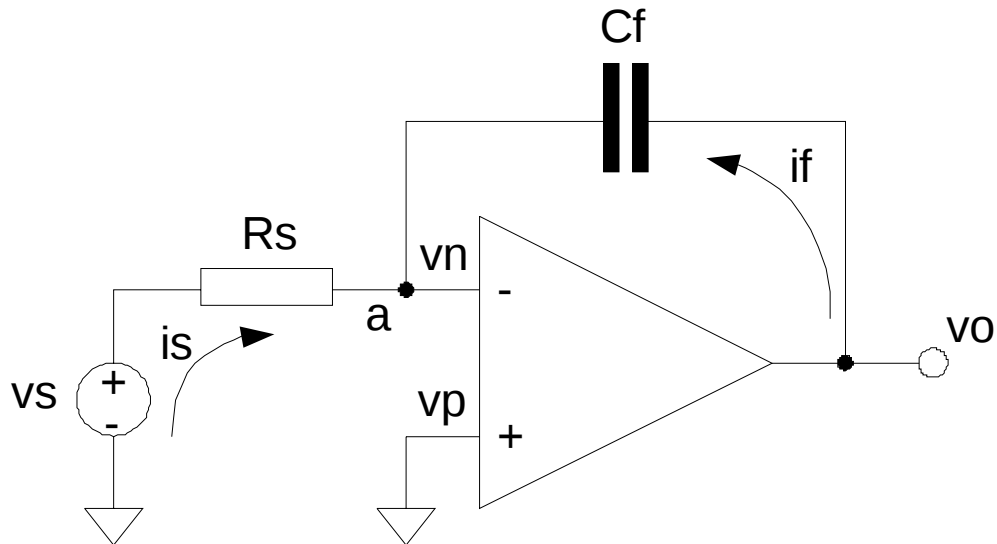


Figura 7 – Diagrama de um amplificador operacional como integrador.

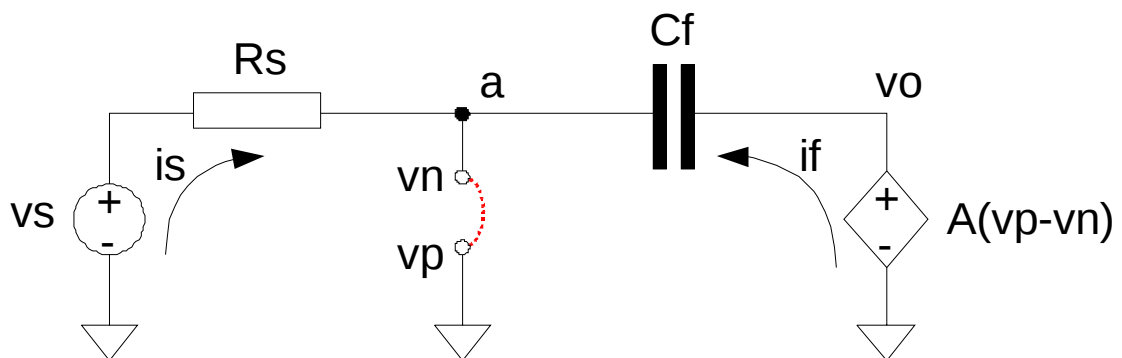


Figura 8 – Circuito equivalente para um amplificador operacional ideal na configuração de integrador.

A lei de Kirchhoff no nó a é:

$$-i_s - i_f = 0$$

A corrente i_s é encontrada com a lei de Ohm:

$$i_s = \frac{v_s}{R_s}$$

A corrente i_f é dada por:

$$i_f = C_f \frac{dv_o}{dt}$$

Substituindo as duas equações da corrente na equação encontrada com o auxílio da lei de Kirchhoff:

$$\frac{v_s}{R_s} + C_f \frac{dv_o}{dt} = 0$$

Ou

$$\frac{dv_o}{dt} = -\frac{1}{R_s C_f} v_s$$

Multiplicando os dois lados da equação por dt e integrando:

$$\int_{v_o(t_0)}^{v_o(t)} dv_o = -\frac{1}{R_s C_f} \int_{t_0}^t v_s(t) dt$$

Ou

$$v_o(t) = -\frac{1}{R_s C_f} \int_{t_0}^t v_s(t) dt + v_o(t_0)$$

Esta última equação nos diz que a tensão na saída do integrador em um instante t é igual a tensão em um instante $t = t_0$ mais a integral do sinal de entrada de t_0 a t multiplicada por uma constante que depende dos componentes do integrador.

Na Figura 9, é apresentado um exemplo da resposta para o integrador.

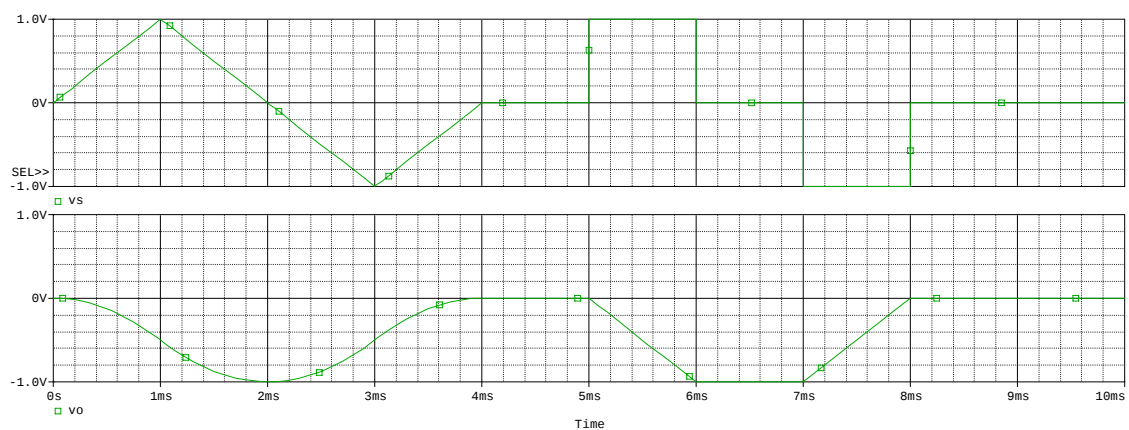


Figura 9 – Exemplo da resposta do integrador. Foram usados $R_s = 10\text{ k}\Omega$, $C_f = 100\text{ nF}$, resistência de entrada de $10\text{ M}\Omega$ e o ganho do amplificador operacional igual a 10^5 .

O Amplificador Diferenciador

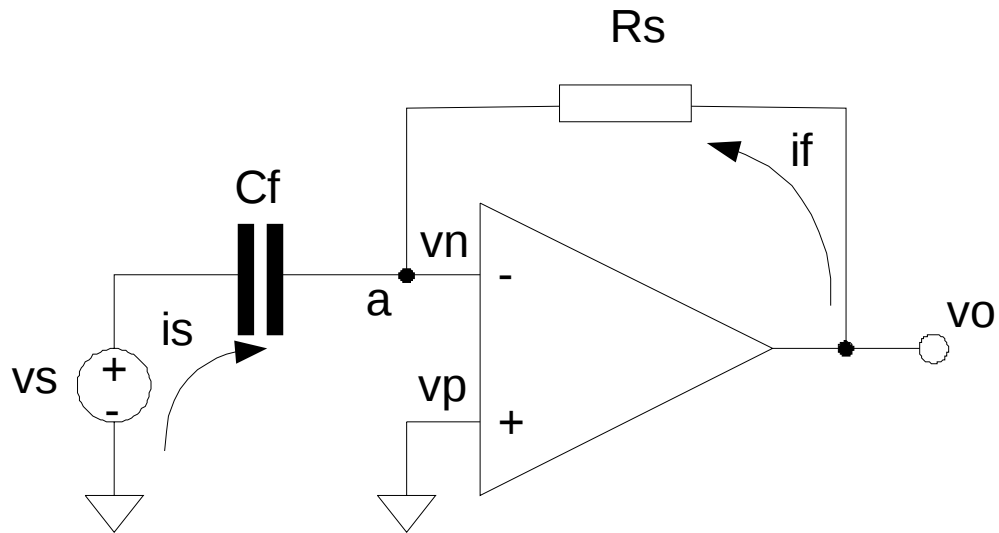


Figura 10 – Diagrama do amplificador operacional na configuração de diferenciador.

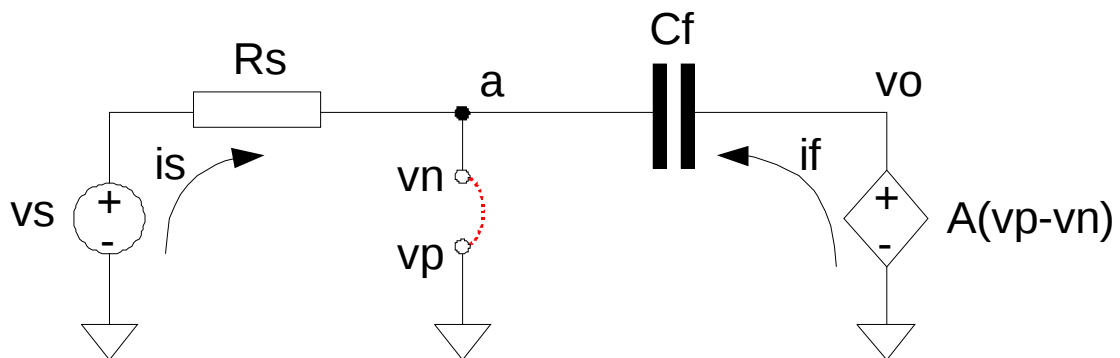


Figura 11 – Circuito equivalente para um amplificador operacional na configuração de diferenciador.

No nó a temos:

$$-i_s - i_f = 0$$

A corrente i_s é dada por:

$$i_s = C_f \frac{dv_s}{dt}$$

A corrente i_f é encontrada com a lei de Ohm:

$$i_f = \frac{v_o}{R_s}$$

Substituindo estas equações da corrente na lei de Kirchhoff para o nó a do modelo:

$$C_f \frac{dv_s}{dt} + \frac{v_o}{R_s} = 0$$

Ou

$$v_o = -R_s C_f \frac{dv_s}{dt}$$

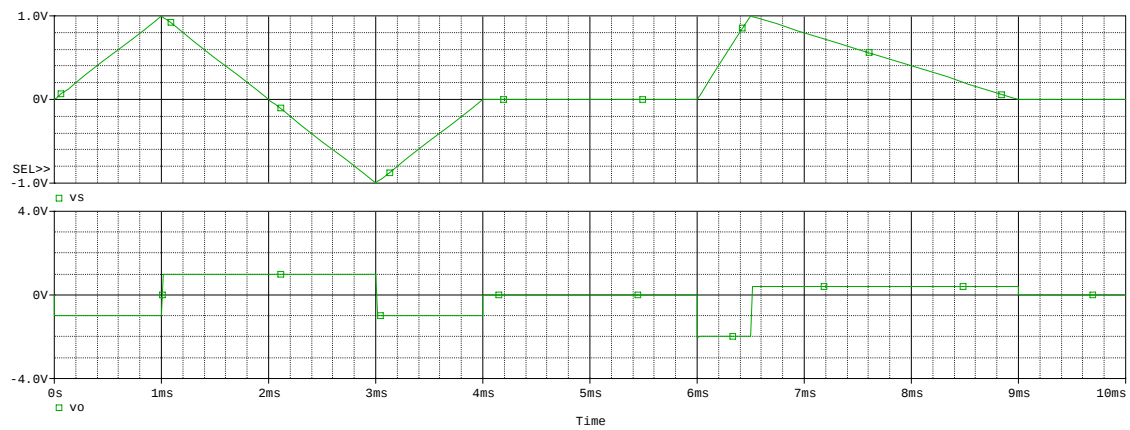


Figura 12 – Exemplo da resposta do diferenciador. Foram usados $R_s = 10 \text{ k}\Omega$, $C_f = 100 \text{ nF}$ de entrada de $10 \text{ M}\Omega$ e o ganho do amplificador operacional igual a 10^5 .