

# Diseño con OpAmp

Author Rodrigo

## Problema

Una termocupla de cromo-constantán tiene las características que se muestra en la siguiente figura (curva E). Diseñe una interface que produzca una salida de  $-5\text{ V}$  a  $5\text{ V}$ , donde  $-5\text{ V}$  hace referencia a  $0^\circ\text{C}$  y  $5\text{ V}$  a  $1000^\circ\text{C}$ . El transductor puede ser modelado como una fuente de voltaje en serie con un resistor de  $15\Omega$ .

De la gráfica podemos observar que la recta perteneciente a  $E$  cruza exactamente por el punto  $(400^\circ\text{C}, 30\text{ mV})$ , con esto obtenemos dos pares de coordenadas, a saber:

$$\underbrace{P_1(0, 0)}_{x_1, y_1} \quad \underbrace{P_2(400, 30)}_{x_2, y_2} \quad (1)$$

Con el par de coordenadas mostrado en (1) podemos construir una ecuación lineal de la forma  $y = \pm mx \pm b$ , donde los parámetros  $m$  y  $b$  representan la *pendiente* y la *ordenada* al origen, respectivamente. Para la construcción de la recta utilizamos la **Ecuación de la recta que pasa por dos puntos**:

### Ecuación de la recta que pasa por dos puntos

Dados los puntos  $P_1(x_1, y_1)$  y  $P_2(x_2, y_2)$  de la recta, su ecuación es:

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1) \quad (2)$$

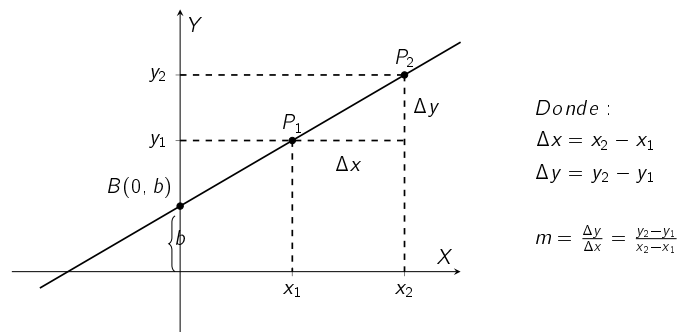


Figure 1: Línea Recta

Al sustituir los valores dados en (1) en la ecuación (2) obtenemos:

$$y - 0 = \frac{30 - 0}{400 - 0}(x - 0)$$

$$y = \frac{30}{400}x$$

o bien

$$y = \frac{\overset{\text{mV}}{\downarrow} 3}{40}x \quad (3)$$

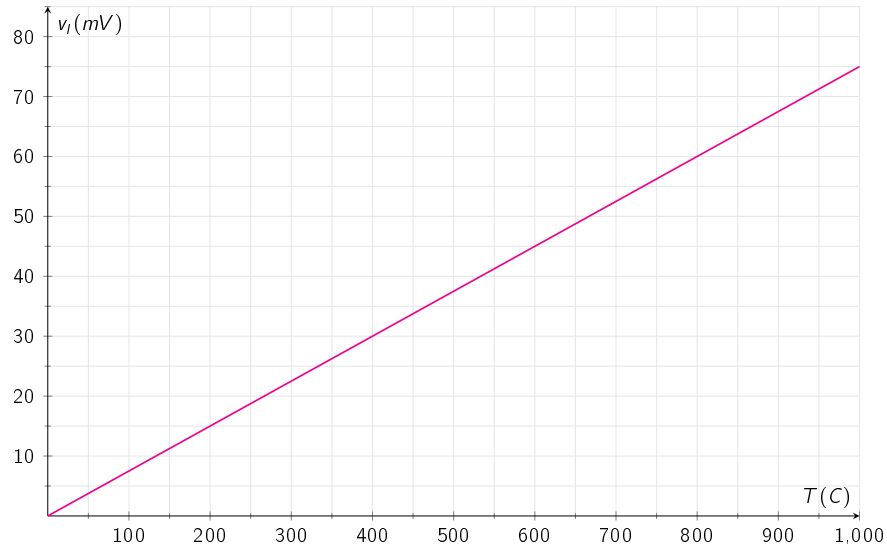


Figure 2: Gradiente de temperatura para una termocupla de cromo-constantán

Con la ecuación dada en (3) podemos fácilmente predecir el voltaje a cualquier temperatura dada, lo reescribiremos empleando las unidades correspondientes:

$$V_o[mV] = \frac{3}{40} T[^\circ C] \quad (4)$$

Ahora, el objetivo del diseño es diseñar una interface que produzca una salida en el rango de  $-5 \leq V_o \leq +5$  para una temperatura en el rango de  $0 \leq T \leq 1000$ . Utilizamos (4) para conocer los valores del sensor dadas las temperaturas  $T_1 = 0^\circ C$  y  $T_2 = 1000^\circ C$

$$V_{sensor_1} = \frac{3}{40}(0) = 0 \text{ V} \quad (5)$$

$$V_{sensor_2} = \frac{3}{40}(1000) = 75 \text{ mV} \quad (6)$$

Ya tenemos los dos valores de entrada y los dos valores de salida por lo que podemos armar nuevamente un segundo par de coordenadas como se muestra a continuación.

$$\begin{array}{cc} P_1(\underbrace{V_{sensor_1}, V_{out_1}}_{x_1, y_1}) & P_2(\underbrace{V_{sensor_2}, V_{out_2}}_{x_2, y_2}) \\ P_1(0, -5) & P_2(0.075, 5) \end{array} \quad (7)$$

Es decir, cuando el voltaje de entrada  $V_{sensor_1} = 0$  el voltaje de salida será de  $V_{out_1} = -5 \text{ V}$  y cuando el voltaje de entrada  $V_{sensor_2} = 75 \text{ mV}$  el voltaje de salida será de  $V_{out_2} = 5 \text{ V}$

Con el par de coordenadas dadas en (7) utilizamos nuevamente la ecuación (2)

$$\begin{aligned} y - (-5) &= \frac{5 - (-5)}{0.075 - 0}(x - 0) \\ y + 5 &= \frac{10}{0.075}x \\ y &= \frac{400}{3}x - 5 \end{aligned}$$

Reescribiendo la ecuación anterior con las unidades apropiadas obtenemos

$$V_{out} = \left(\frac{400}{3}\right) V_{sensor} - 5 \quad (8)$$

La ecuación en (8) nos sugeriría un diseño como el que se muestra en el diagrama de bloques de la figura 3, el cual es de hecho, el de un amplificador sumador. Para este diseño, emplearemos un amplificador sumador inversor como el que se muestra en la figura 4.

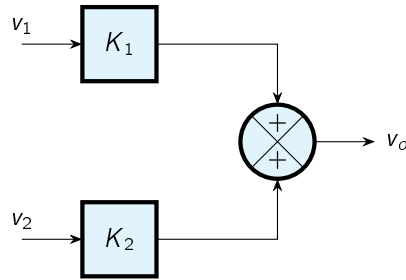


Figure 3: Diagrama de bloques de un amplificador sumador

La ecuación de salida de un amplificador no inversor está dada por

$$v_o = -\frac{R_F}{R_1} v_1 - \frac{R_F}{R_2} v_2 \quad (9)$$

Donde

$$K_1 = -\frac{R_F}{R_1} \quad K_2 = -\frac{R_F}{R_2} \quad (10)$$

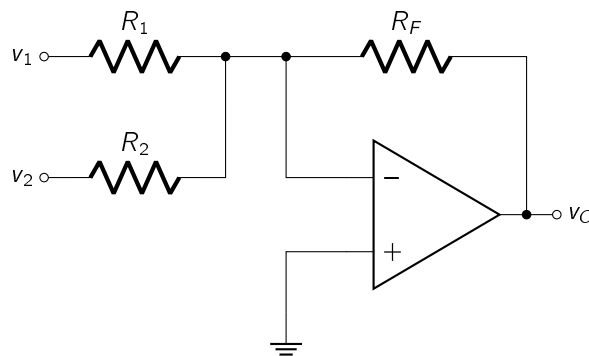


Figure 4: Amplificador sumador inversor

En la ecuación (9) observamos que el voltaje de salida es negativa en ambos operandos, sin embargo, la ecuación (8) sugiere que el primer término debe ser positivo. La forma de volver positivo el primer término en (9) es invirtiendo dicha señal, esto se logra conectando un amplificador inversor en la entrada de  $v_1$  en el diagrama de la figura 3, esta modificación se muestra en el diagrama de la figura 5.

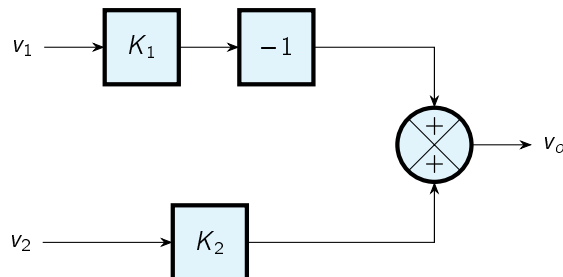


Figure 5: Diagrama de bloques

La ecuación de salida está dada ahora por:

$$v_o = \frac{R_F}{R_1} v_1 - \frac{R_F}{R_2} v_2 \quad (11)$$

Comparemos ahora la ecuación (11) con la ecuación (8)

$$v_o = \underbrace{\frac{R_F}{R_1}}_m \underbrace{v_1}_x - \underbrace{\frac{R_F}{R_2}}_b v_2 \quad (12)$$

$$V_o = \underbrace{\left(\frac{400}{3}\right)}_m \underbrace{V_{sensor}}_x - \underbrace{5}_b \quad (13)$$

Por simplicidad, la ganancia del amplificador inversor será de 1. Ahora, al igualar términos obtenemos

$$\frac{R_F}{R_1} = \frac{400}{3}$$

O

$$R_1 = \frac{3}{400} R_F$$

Si establecemos  $R_F = 100 \text{ k}\Omega$ , entonces  $R_1 = 750 \Omega$ . Ya tenemos la ganancia  $K_1$  (figura 5), nos faltaría la ganancia  $K_2$  que de acuerdo a la ecuación (13), ésta sería de 5. La ecuación (12) nos indica que debemos tener una señal de entrada llamada  $v_2$ . Podemos aprovechar la tensión de alimentación positiva que conectaremos al OpAmp para poder obtener esa señal de voltaje  $v_2$ . Supongamos que a nuestro OpAmp lo alimentamos con una fuente de  $V_{CC} = 15 \text{ V}$  y  $V_{EE} = -15 \text{ V}$ . Una opción sería bajar el voltaje de  $15 \text{ V}$  a  $1 \text{ V}$  a través de un simple divisor de tensión con dos resistores, ese voltaje de  $1 \text{ V}$  sería la entrada  $v_2$  y al establecer la ganancia  $\frac{R_F}{R_2} = 5$  cumpliríamos con la condición de  $\frac{R_F}{R_2} v_2 = 5$ , donde  $v_2 = 1 \text{ V}$

Sólo nos queda establecer la relación:

$$\begin{aligned} \frac{R_F}{R_2} &= 5 \\ R_F &= 5R_2 \\ R_2 &= \frac{R_F}{5} \end{aligned}$$

Ya que establecimos  $R_F = 100 \text{ k}\Omega$ , entonces  $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ . Diseñemos ahora la red divisora de voltaje para obtener un voltaje de  $1 \text{ V}$  a partir del voltaje de alimentación  $V_{CC} = 15 \text{ V}$ . Sea el siguiente circuito:

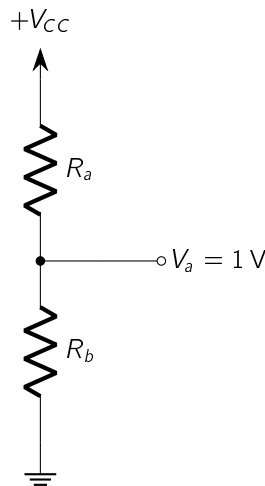


Figure 6: Red divisora de voltaje

Para ahorrar en el consumo de energía, asumamos que por dicha red circulará una corriente de  $10 \mu\text{A}$ . Conociendo dicha corriente podemos encontrar fácilmente el valor de las dos resistencias, es decir:

$$R_b = \frac{V_a}{10 \mu\text{A}} = 100 \text{ k}\Omega$$

Y

$$R_a = \frac{V_{CC} - V_a}{10 \mu A} = 1.4 \text{ M}\Omega$$

En apariencia, utilizaremos sólo dos amplificadores operacionales para el diseño, sin embargo, si conectásemos esa red divisora de voltaje y el sensor, el cual se modela como una fuente de voltaje en serie con una resistencia directamente a las entradas del amplificador sumador estaríamos generando una impedancia de carga, por lo tanto, conectaremos un par de seguidores de tensión, el primero entre el sensor y la entrada  $v_1$  del amplificador sumador, y el segundo entre la red divisora de tensión y la entrada  $v_2$  del amplificador sumador, como se muestra a continuación

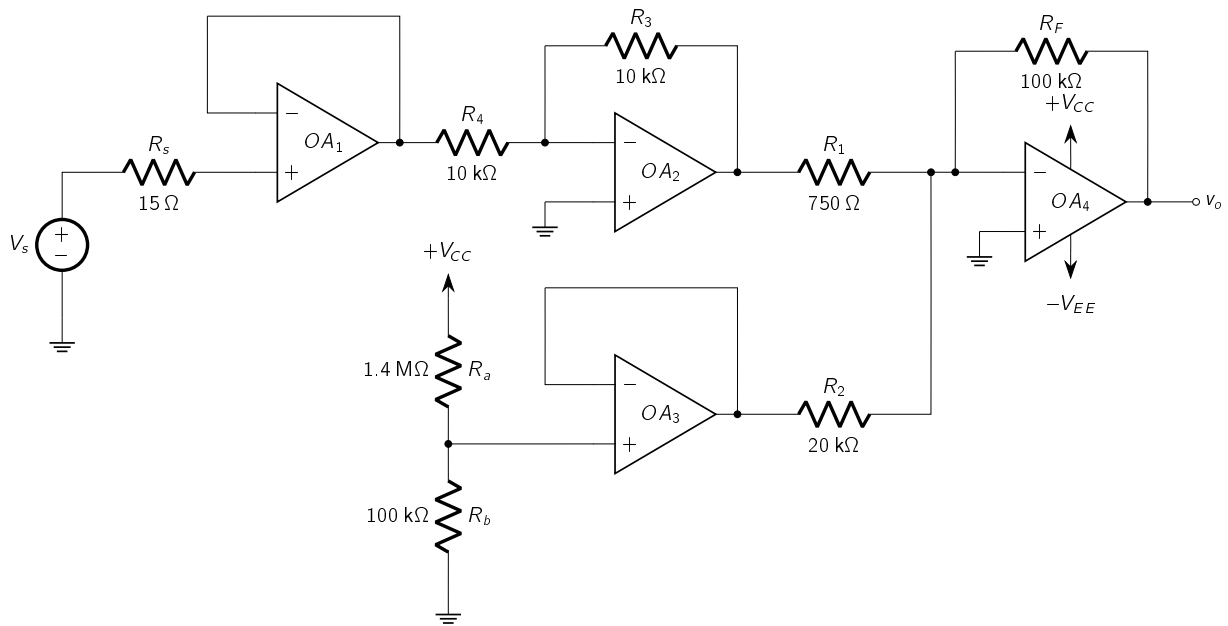


Figure 7: Circuito completo

Como se mencionó anteriormente, por simplicidad establecemos una ganancia unitaria para el amplificador inversor, por lo que podemos establecer  $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ .

Simulación

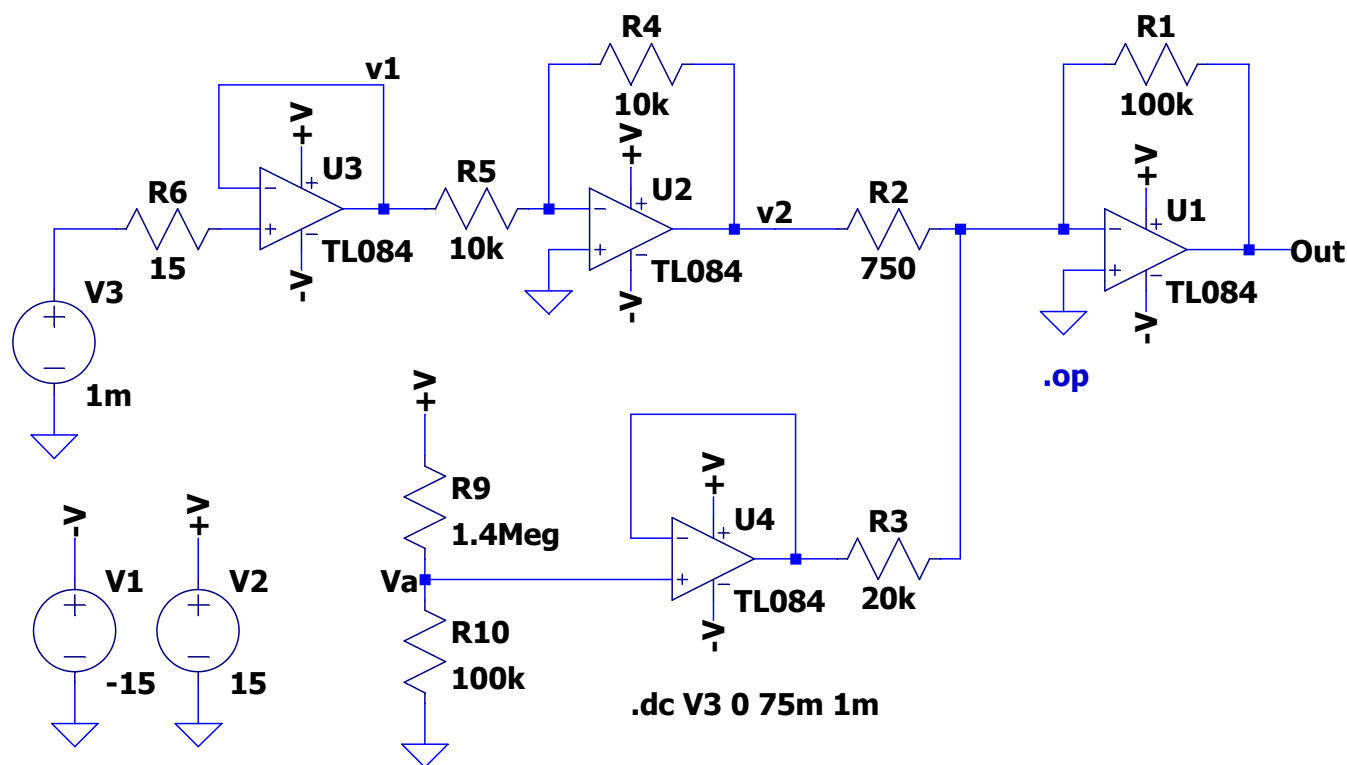


Figure 8:

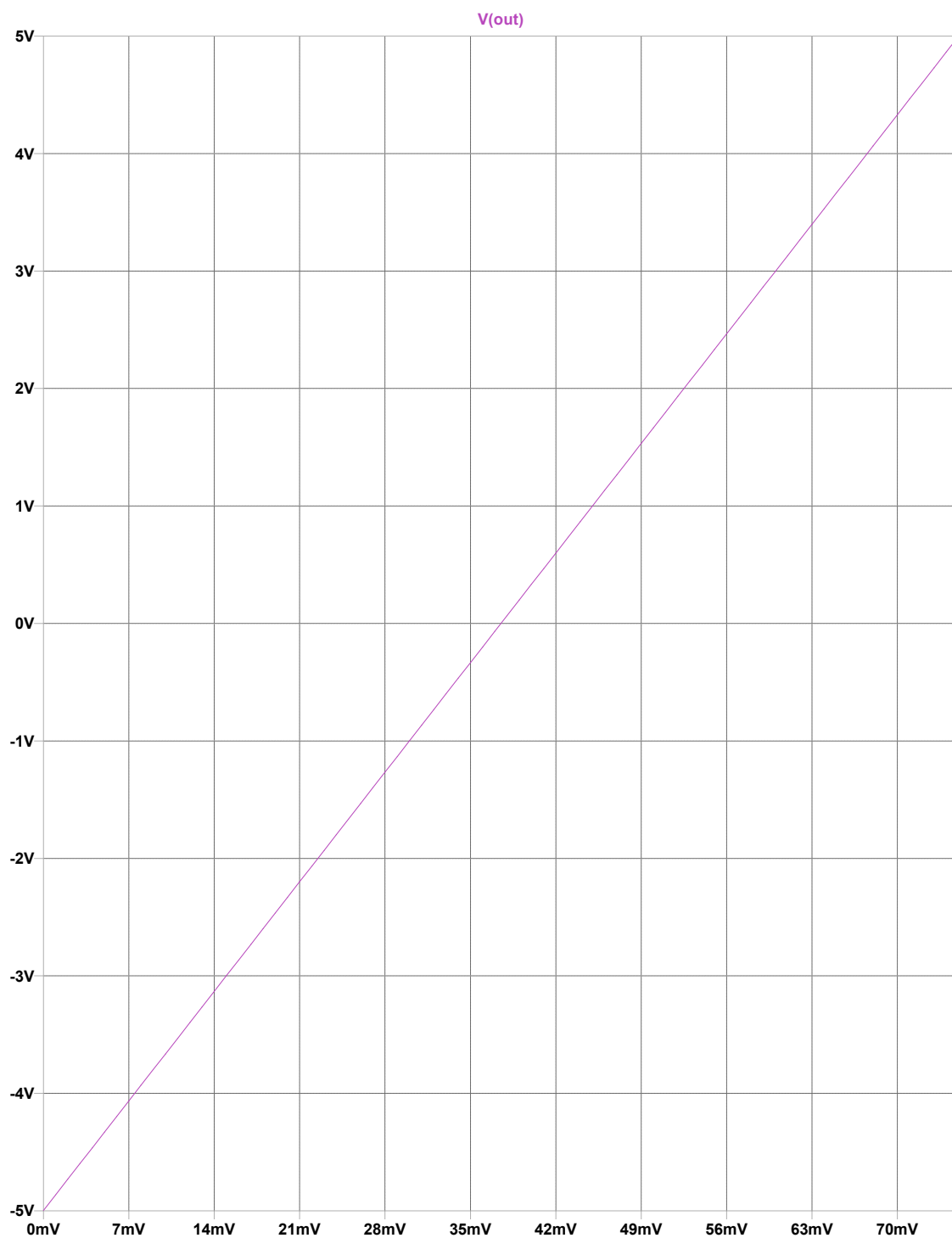


Figure 9:

## Montaje

Para el montaje de esta interface, y debido a las limitaciones provenientes del equipo, se utiliza una señal de rampa ascendente con una amplitud pico de 3 V y una frecuencia de 1 kHz como se muestra en la figura (10).

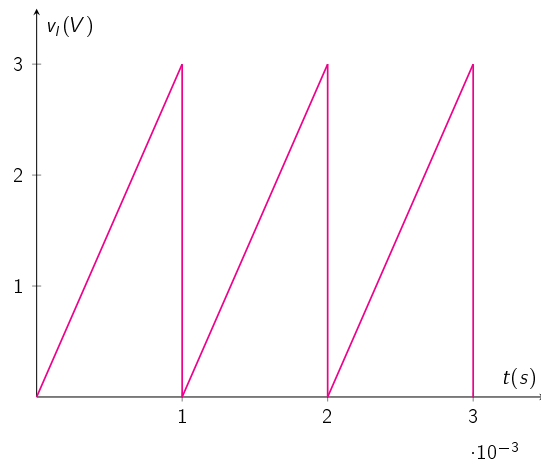


Figure 10: Señal de entrada

Se diseña una red divisora de tensión para atenuar la señal de entrada a un valor de 75 mV

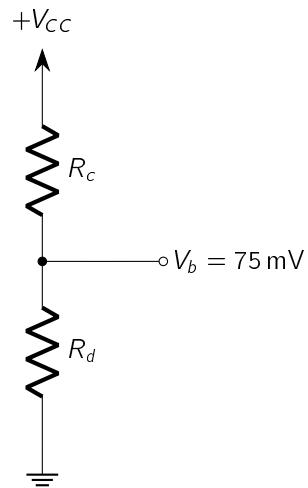


Figure 11: Red divisora de voltaje

Establecemos una corriente de  $15 \mu\text{A}$  y determinamos  $R_d$

$$R_d = \frac{75 \text{ mV}}{15 \mu\text{A}} = 5 \text{ k}\Omega$$

Ahora, determinamos el valor de  $R_c$

$$R_c = \frac{15 \text{ V} - 75 \text{ mV}}{3 \mu\text{A}} = 195 \text{ k}\Omega$$



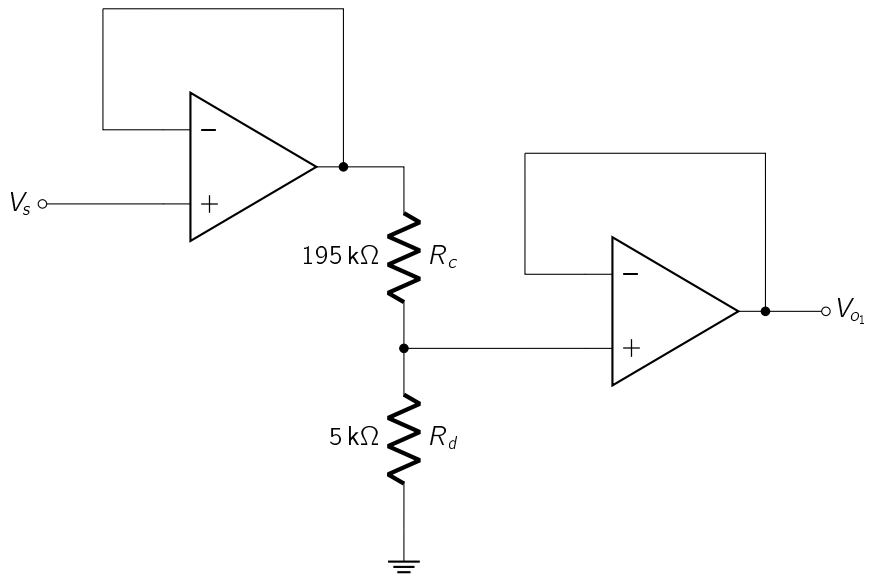


Figure 12: Etapa acondicionadora para la señal de entrada

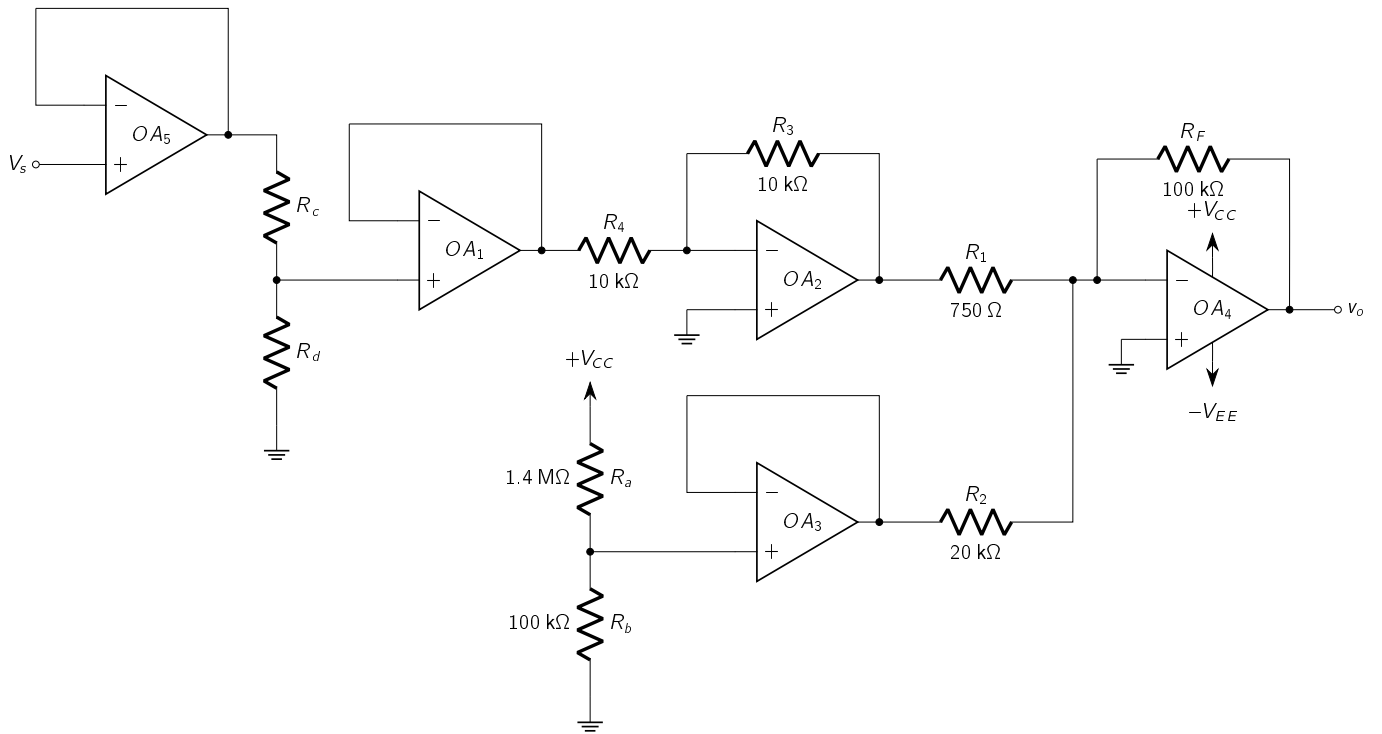


Figure 13: Circuito completo



Figure 14: Voltaje de salida (morado) y voltaje de entrada original (amarillo)

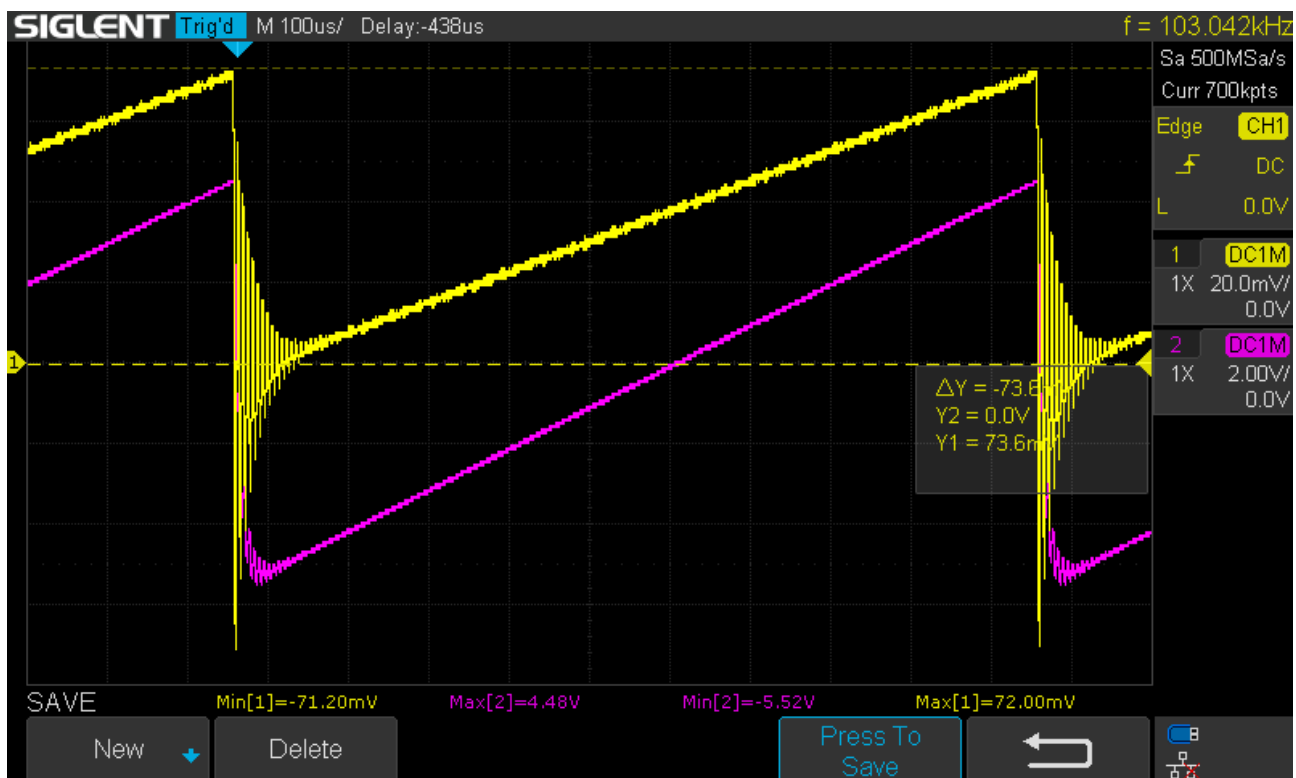


Figure 15: Voltaje de salida (morado) y voltaje de entrada escalado (amarillo)

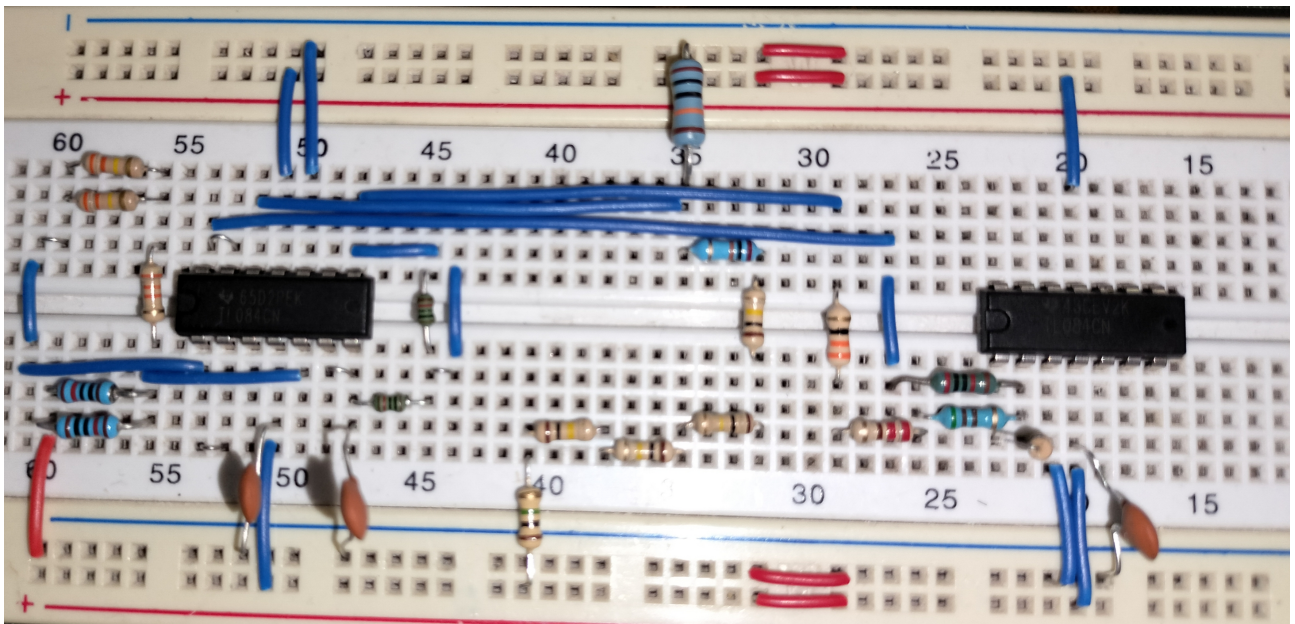


Figure 16: Voltaje de salida (morado) y voltaje de entrada escalado (amarillo)