6. ACONDICIONAMIENTO DE CIRCUITOS RESISTIVOS

Existen esencialmente 3 formas de acondicionar un sensor resistivo:

- Divisor de tensión.
- Fuente decorriente.
- Puente de Wheatstone.

Vamos a describir cada una de estas opciones, señalando algunas ventajas y desventajas de su uso.

6.1 Acondicionamiento por divisor de tensión

Probablemente la forma más simple de acondicionar un sensor resistivo es formar un divisor de tensión entre el sensor y un resistor fijo, como se ve en la figura, donde R_1 es una resistenciade valor fijo y R_S Representa el sensor resistivo.

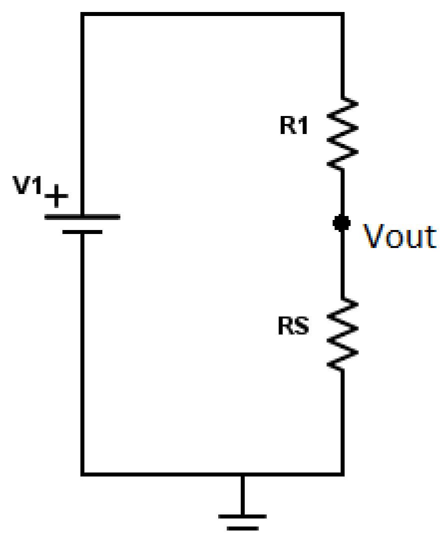

Figura 1

Si analizamos este circuito podemos observar que el voltaje V_{out} está dado por

$$V_{out} = V_1 \frac{R_S}{R_S + R_1} \qquad \text{Eq. 6.1}$$

De este modo, si el valor de R_S varía, el valor de V_{out} también los hace proporcionalmente.

Evidentemente este circuito es muy simple y económico de implementar, por lo cual puede resultar conveniente. Sin embargo, debemos analizar un poco más sus características para encontrar las consideraciones que debemos tener a la hora de implementarlo y las posibles desventajas de esta configuración.

6.1.1 Relación directa o inversa

En el circuito de la Figura anterior, vemos que la ecuación nos presenta una relación directa entre elvoltaje y la resistencia, puesto que a mayor resistencia tendremos mayor voltaje.

En caso de requerir que la relación sea inversa, bastará con invertir el orden de las resistencias como se aprecia en la Figura siguiente:

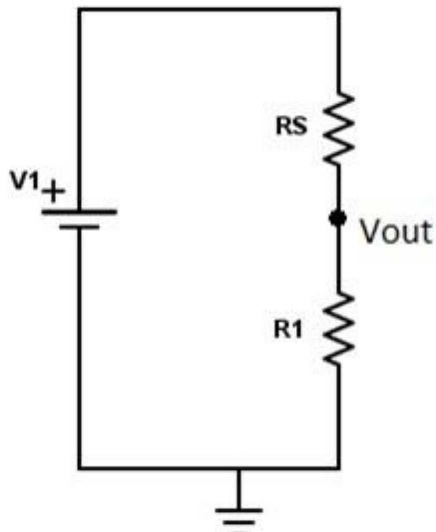

Figura 2

En este caso la ecuación para el voltaje V_{out} sería:

$$V_{out} = V_1 \frac{R_1}{R_S + R_1} \qquad \text{Eq. 6.2}$$

Y tendríamos que, a medida que sube la resistencia, baja el voltaje de salida.

La elección acerca de cuál de las dos opciones es más conveniente, depende de cual sea la relación entre la resistencia y la variable a medir (si es directa o inversa) y de la conveniencia o necesidades propias del sistema de medición.

6.1.2 Linealidad de la relación

Una consideración importante que tenemos que tener es la forma que tiene la relación existente entre la resistencia y el voltaje, que está dada por la ecuación 6.1. Es evidente que esta no es una relación lineal, pero vemos en detalle con un ejemplo.

- **Ejemplo 6.1**

Suponga que en el circuito de la Figura 1, el resistor R_1 tiene un valor de 1kΩ, que el sensor R_S tendrá una variación entre 100Ω y 5K para la variación de la variable a medir y que V1 es igual a 5V.

Primero, sabemos que el voltaje V_{out} variará entre un voltaje mínimo (cuando R_s vale 100Ω) y un máximo (cuando R_s vale 5kΩ), así:

$$V_{out\ mínimo} = 5\frac{100}{100+1000} = 0.4545\ \text{V}$$

$$V_{out\ máximo} = 5\frac{5000}{5000+1000} = 4.166\ \text{V}$$

Pero, ¿cómo será la variación en este rango? En la figura siguiente se puede ver una gráfica *voltaje versus resistencia* para este caso, donde se aprecia la NO linealidad en la relación. Esto implica que cuando tengamos un voltaje V_{out} que representa la variable a medir, la relación entre voltaje y la variable a medir no es lineal, aun si la relación entre la resistencia y la variable a medir sí lo es. Esto hace más compleja la interpretación del voltaje en términos de la variable. Es decir, si por ejemplo este se tratara de un sensor resistivo, no podríamos decir que tenemos una relación (por poner un caso) de 0.1V por grado centígrado, porque esta sería una relación lineal, que este caso no existe.

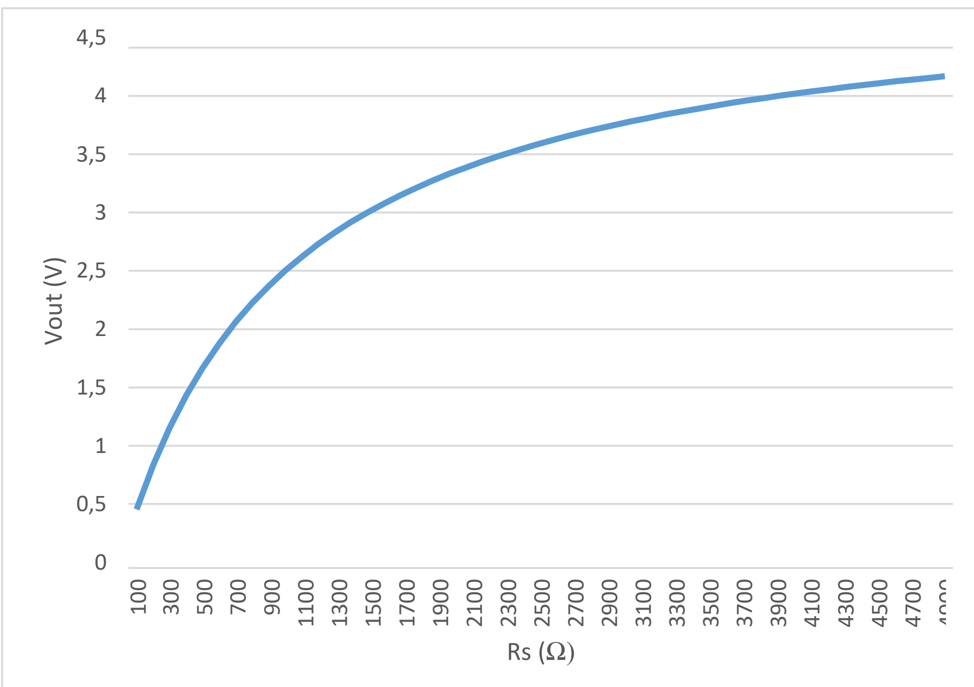

Figura 3. Relación resistencia- voltaje en divisor de tensión.

6.1.3 Variación de la resistencia y variación del voltaje

Algunos sensores resistivos presentan una amplia variación de la resistencia con la variable a medir, pero otros tienen una variación de resistencia muy limitada. Para ilustrar esto veamos el ejemplo de dos sensores resistivos diferentes:

- Las fotorresistencias son elementos resistivos sensibles a la luz. Cuando una luz incide sobre este elemento, su resistencia se reduce y cuando están en condiciones de oscuridad, la resistencia aumenta. Los valores de una fotorresistencia pueden variar desde un valor de 100Ω a plena luz hasta 1MΩ o más, en la oscuridad. La variación exacta depende del elemento específico, dado que existen de varios valores; pero en general tenemos una variación bastante amplia.

- La pt100 es un RTD, un tipo de sensor de temperatura muy utilizado que varía su resistencia de acuerdo a la temperatura. Su nombre se deriva de la resistencia que presenta a 0°C (es decir, la resistencia a =0°C es de 100Ω). La variación de la resistencia puede consultarse en tablas que se especifican en la base de datos, pero como referencia podemos mencionar que a 100°C la resistencia de la pt100 es de 138.5Ω. ¡En 100 °C la resistencia sólo ha cambiado en 38.5Ω!

Por su puesto, si la variación de la resistencia es pequeña, la variación en el voltaje también lo será. Veamos esto con un ejemplo.

- **Ejemplo 6.2**

Hemos visto que la pt100 tiene una variación de resistencia entre 100Ω y 138.5Ω en el rango de 0°C a 100°C. Veamos que pasa al conectar esta pt100 a un circuito divisor de tensión como se muestra en la

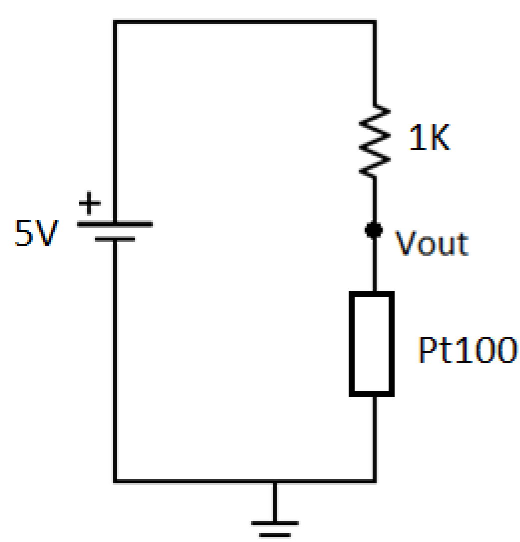

Figura 4. Pt100 en divisor de tensión

Con estos valores tendremos una variación de voltaje entre un mínimo y un máximo así:

$$V_{out\ mínimo} = 5\frac{100}{100+1000} = 0.4545\ \mathrm{V}$$

$$V_{out\ máximo} = 5\ \frac{138.5}{138.5 + 1000} = 0.6082\ \mathrm{V}$$

Esto implica que la variación total de voltaje de V_{out} en el rango de 0°C a 100°C será de 0.6082-0.4545=0.1537 voltios.

Esta variación de voltaje es muy pequeña, sobre todo si estamos en ambientes ruidosos (como suele ser un ambiente industrial). Eso se convertiré en un problema que hace que cuando las variaciones de resistencia sean pequeñas, un divisor de tensión no sea la forma más adecuada para acondicionar un sensor resistivo.

6.1.4 "Autocalentamiento" (para sensores de temperatura)

Uno podría pensar que una buena opción para solucionar el problema de baja variación de voltaje que acabamos de ver en la sección anterior es cambiar el valor de la resistencia fija, de tal forma que varíe la relación. Veamos un ejemplo de qué ocurre al cambiar este valor, con lo que podremos entender un concepto importante: el "autocalentamiento".

- **Ejemplo 6.3**

Para el mismo caso del ejemplo 6.2, analicemos el circuito si cambiáramos la resistencia fija por un valor de 100Ω.

$$V_{out\ mínimo} = 5\frac{100}{100+100} = 2.5\ \mathrm{V}$$

$$V_{out\ máximo} = 5\frac{138.5}{138.5+100} = 2.9035\ \mathrm{V}$$

En este caso hemos aumentado la variación hasta 2.9035-2.5=0.4035 V, que sigue siendo pequeña, pero es un poco mayor. Sin embargo, debemos tener en cuenta que también esto implica un cambio en la cantidad de corriente que circula por la pt100. En este caso la corriente que pasa por la pt100 a 0°C es de 25mA, mientras que para el circuito con resistencia de 1K la corriente es de 4.5mA.

¿Por qué es esto importante? Simplemente porque cuando una corriente elevada circula por la pt100 esta puede sufrir “autocalentamiento”. Esto quiere decir que en la pt100 se genera calor debido a la circulación de corriente por el efecto joule. Si el sensor resistivo es de temperatura (como es el caso de la pt100) esto genera un error en la medición. Cuanto mayor sea la corriente, mayor puede ser el problema de “autocalentamiento”. De hecho, una corriente de 25mA sería muy elevadapara usar en la pt100, siendo ideal que esté por debajo de 1mA.

6.2 Acondicionamiento por fuente de corriente

La siguiente opción que tenemos a la hora de acondicionar un sensor resistivo es utilizar una fuente de corriente, como se ve en la Figura 5, donde I_1 es una fuente de corriente y R_s representa un sensor resisitivo.

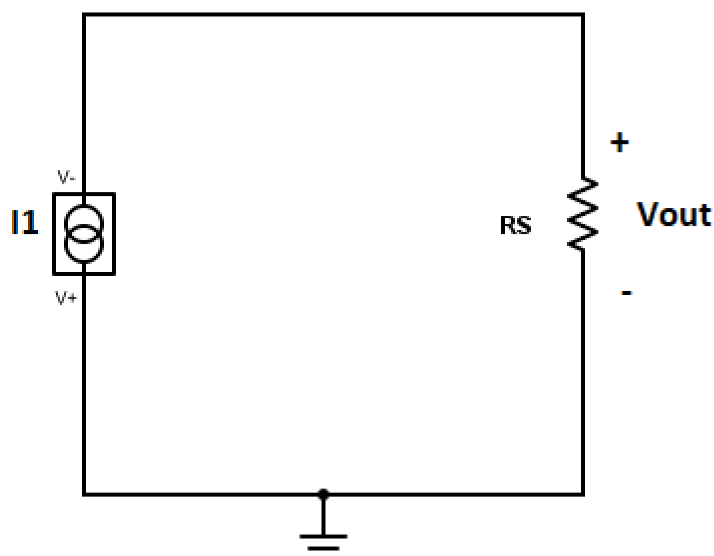

Figura 5. Acondicionamiento de sensor resistivo por fuente de corriente

En este caso tendremos que el voltaje de salida será:

$$V_{out} = I_1 R_s \qquad \text{Eq. 6.3}$$

Vemos que el voltaje será directamente proporcional a la variación de la resistencia.

Con respecto al circuito anterior de divisor de voltaje, este acondicionamiento tiene la particularidad de ser más complejo, en cuanto a que debe implementarse una fuente de corriente. Sin embargo, tendrá algunas ventajas con respecto al divisor de tensión como veremos a continuación.

6.2.1 Linealidad de la relación

Vamos a examinar la relación entre voltaje y resistencia de forma similar al ejemplo 6.1.

- **Ejemplo 6.4**

Suponga que en el circuito de laFigura 6-5, la fuente de corriente I_1 tiene un valor de 1mA y que el sensor R_S tendrá una variación entre 100Ω y 5K para la variación de la variable a medir.

Primero, sabemos que el voltaje V_{out} variará entre un voltaje mínimo (cuando R_s vale 100Ω) y un máximo (cuando R_s vale 5kΩ), así:

$$V_{out\ mínimo} = 1mA * 100\Omega = 0.1V$$

$$V_{out\ máximo} = 1mA * 5000\Omega = 5V$$

En todo el rango puede verse la relación voltaje- resistencia, la cual de la misma ecuación puede verse que es lineal.

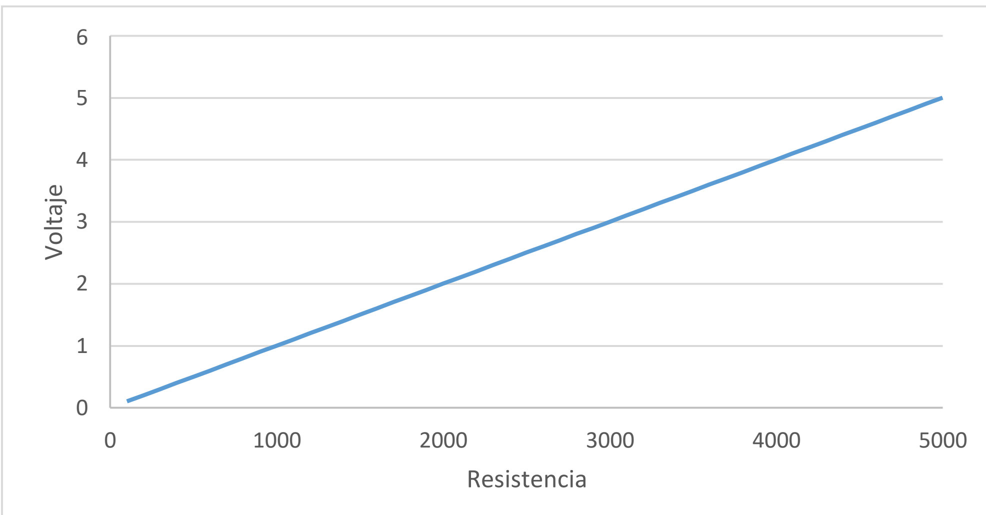

Figura 6-6. Acondicionamiento de sensor resistivo por fuente de corriente

6.2.2 Limitaciones en el voltaje

Otro elemento que debe tenerse en cuenta es que la relación descrita por la ecuación 6.3 tiene un límite dado por la saturación, dependiendo de la implementación que se haga de la fuente de corriente. Para entender esto, veamos el siguiente ejemplo con una implementación específica de la fuente de corriente.

- **Ejemplo 6.5**

En la Figura 7 se muestra una posible implementación de una fuente de corriente con un sensor resistivo. En este caso, R_s representa el sensor resistivo y el resto del circuito garantiza una corriente constante sobre R_s, como se explica a continuación. V_{out} será la salida de voltaje proporcional a la variable a medir.

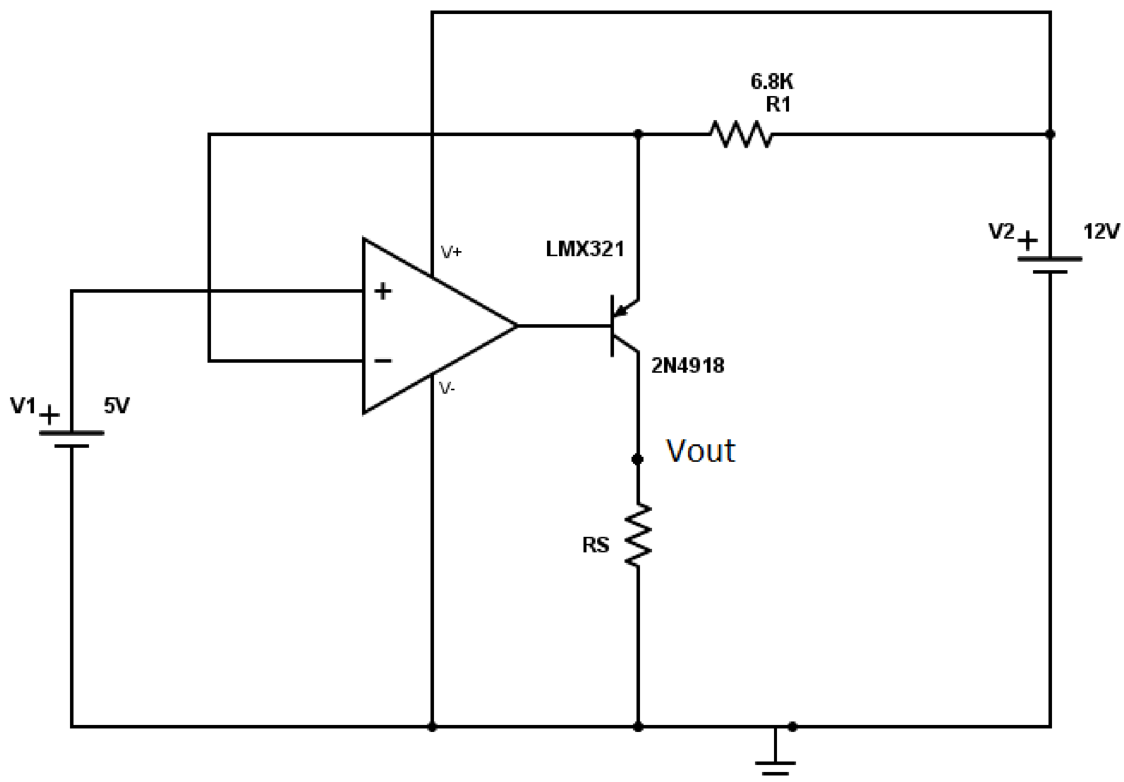

Figura 7. Implementación acondicionamiento fuente de corriente

Sabemos que el voltaje en las entradas inversora y no inversora del amplificador operacional son iguales. Por lo tanto, podemos calcular la corriente en R_1 como:

$$I_{R1} = \frac{12 - 5}{6.8k} = 1.029mA$$

Esta es la corriente en el emisor del transistor. El transistor 2N4918 tiene un β de 150, por lo tanto, tenemos que la corriente de la base del transistor es:

$$I_{base} = \frac{1.029mA}{150} = 6.863\mu A$$

Y podemos calcular la corriente del colector como:

$$I_{colector} = 1.029mA - 6.863\mu A = 1.022mA$$

Esta sería la corriente que pasa por el sensor resistivo, independientemente del valor de resistencia que este tome. Así, si el sensor toma 1KΩ, el voltaje sobre la resistencia, V_{out} tendrá un valor de 1.022V. Veamos a continuación la simulación.

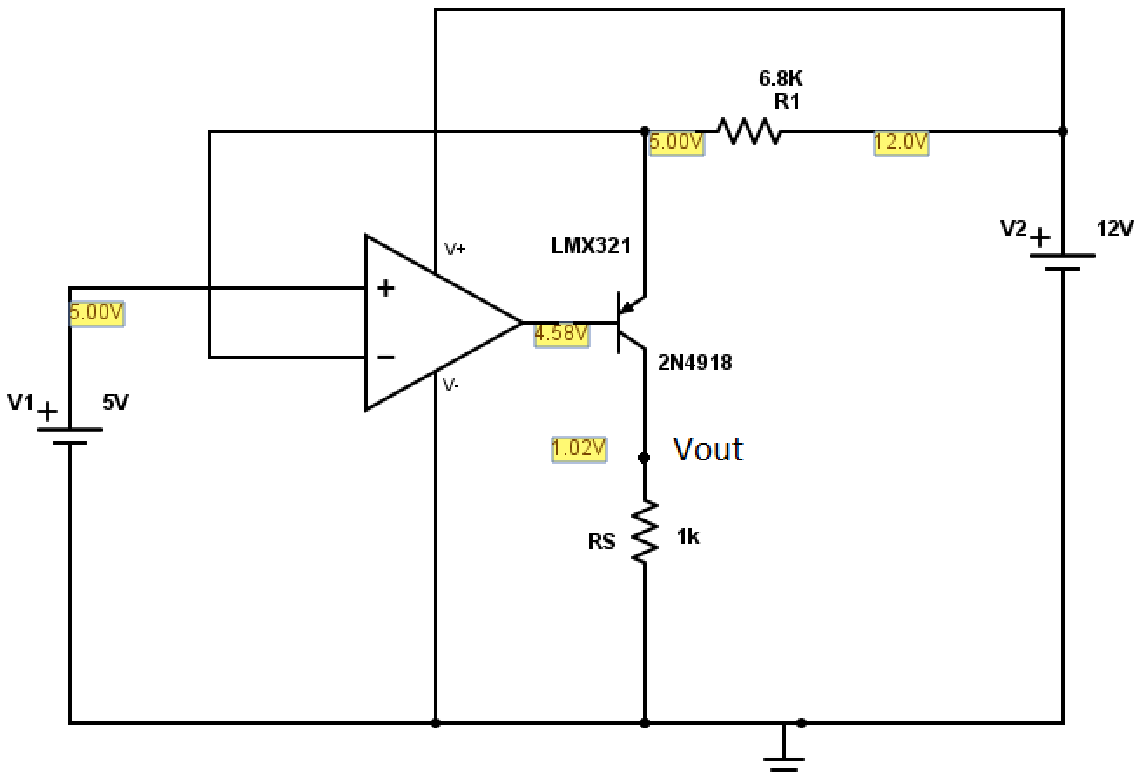

Figura 8. Simulación implementación acondicionamiento fuente de corriente con R_s de 1KΩ

Así mismo, si Rs toma un valor de 2K, podemos esperar un V_{out} de 2.044.

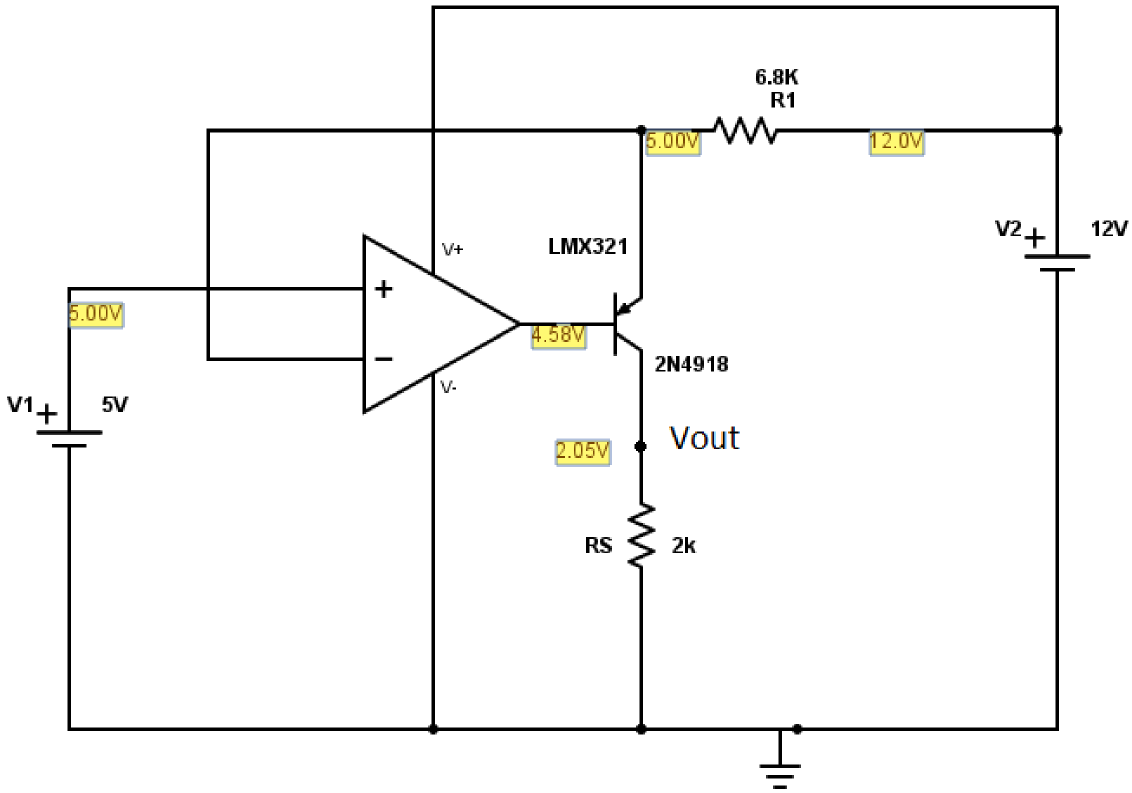

Figura 9. Simulación implementación acondicionamiento fuente de corriente con R_s de 2KΩ

Sin embargo, si el valor de la R_s sigue aumentando, llegará un momento en el que se satura, dado que las fuentes de voltaje limitan este valor y el voltaje en R_s será siempre menor a 5v. Así, si R_s es igual a 10kΩ, se podría pensar que el voltaje será igual a 10.22V, pero en realidad será algo menor a 5 V como se ve en la siguiente simulación.

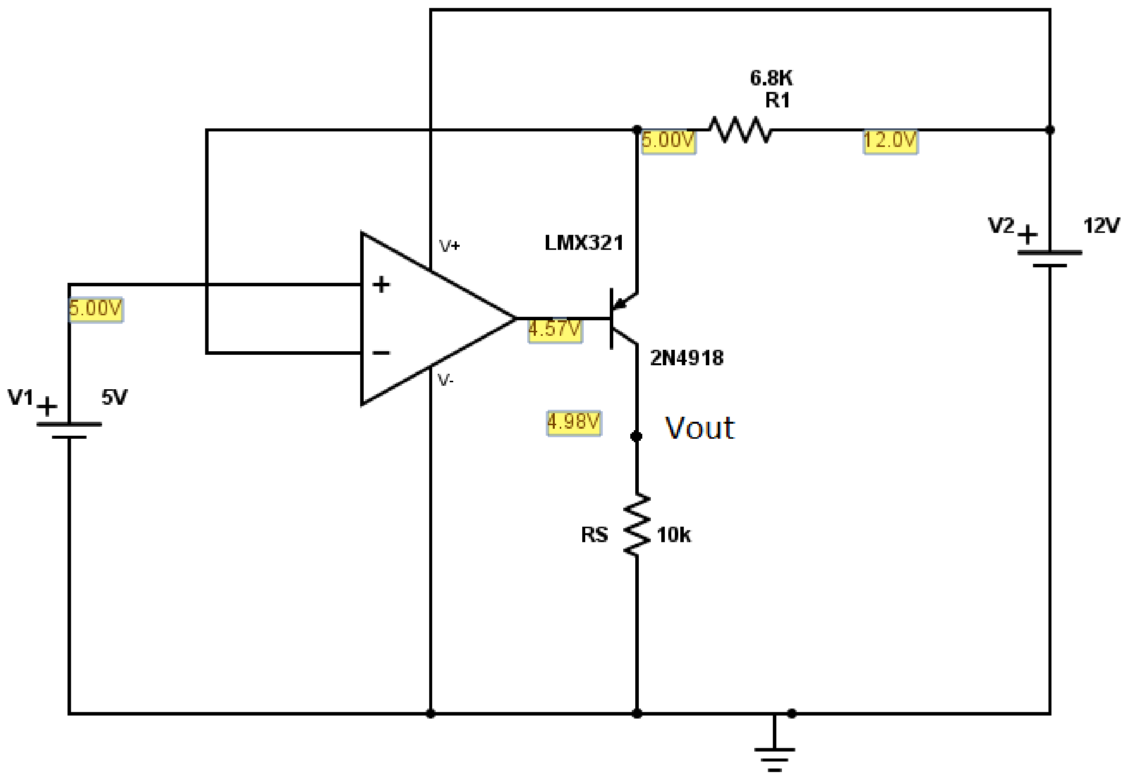

Figura 10. Simulación implementación acondicionamiento fuente de corriente con R_s de 10KΩ

6.2.3 Variación de la resistencia y variación del voltaje

En cuanto al problema del que hablamos en el divisor de voltaje donde al tener baja variación en la resistencia se tiene baja variación ene le voltaje, en este caso se sigue presentando de igual manera. Esto es evidente de la Eq 6.3.

6.3 Acondicionamiento por puente de Wheatstone

La siguiente opción para el acondicionamiento de un sensor resistivo es el uso de un puente de Wheatstone como el que se ve en la Figura 6-11.

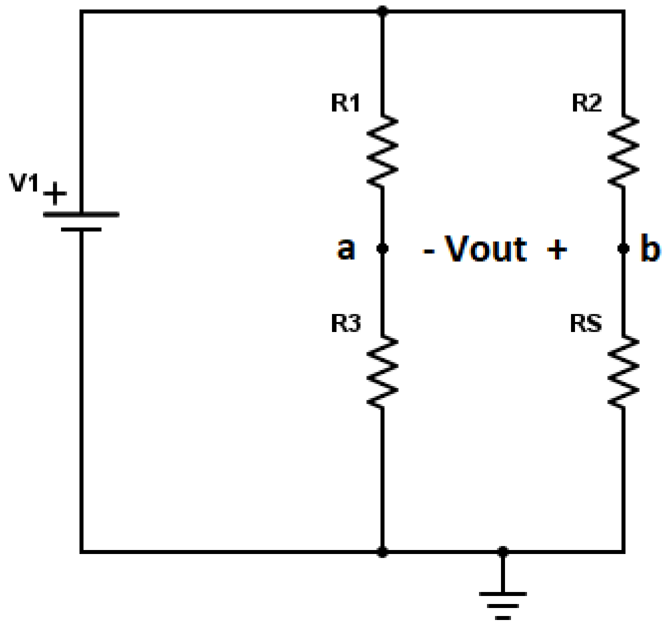

Figura 6-11. Acondicionamiento por puente de Wheatstone

En este caso el voltaje de salida V_{out} no estará entre un determinado punto y tierra, si no entre los puntos a y b del esquema. Es decir, $V_{out}= V_b- V_a$.

La elección de las resistencia se hace de forma que se verifique:

R1 / R3 = R2 / RS => RS = R2 X R3 / R1.

Escogiendo las resistencias adecuadamente, podremos escoger en qué punto queremos que la tensión V_{AB} = 0 => **PUENTE EQUILIBRADO**

Veamos las ecuaciones para entender este circuito.

$$V_a = V_1 \frac{R_3}{R_1+R_3} \quad \text{Eq.6.4}$$

$$V_b = V_1 \frac{R_s}{R_2+R_s} \quad \text{Eq.6.5}$$

$$V_{out=} V_b - V_a = V_1 \left(\frac{R_s}{R_2+R_s} - \frac{R_3}{R_1+R_3}\right) \quad \text{Eq.6.6}$$

Para entender este circuito veamos un ejemplo numérico.

- **Ejemplo 6.6**

Para el circuito de la Figura 6-11, supongamos que V1= 5V, R_1=R_2=1kΩ, R_3=300Ω y R_s es un sensor resistivo que varía entre 300Ω y 5kΩ de resistencia para el rango de la variable a medir.

Veamos cuáles serán los valores mínimo y máximo del voltaje $V_{out.}$

$$V_{out\ mínimo} = 5\left(\frac{300}{300 + 1000} - \frac{300}{300 + 1000}\right) = 0$$

$$V_{out\ máximo} = 5\left(\frac{5000}{5000+1000} - \frac{300}{300+1000}\right) = 3.013$$

6.3.1 Linealidad de la relación

Ahora, vemos que forma tiene exactamente esta relación si graficamos resistencia contra voltaje. En la Figura 12 se ve esta gráfica para el ejemplo anterior (ejemplo 6.6).

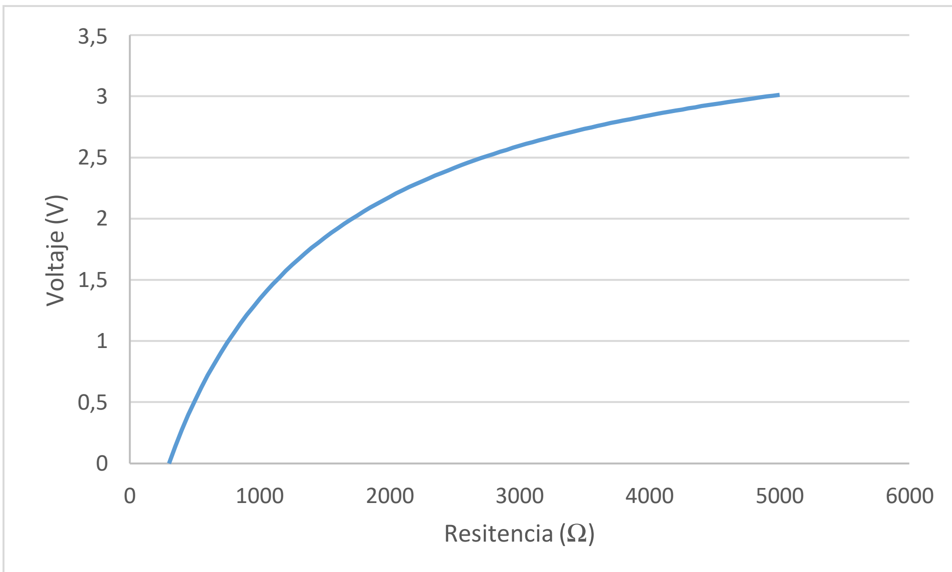

Figura 12. Relación resistencia- voltaje en el puente de Wheatstone

Al igual que en el divisor de tensión vemos que la relación no es lineal, lo cual es evidente de la ecuación 6.6.

6.3.2 Elección de los valores de los resistores

Un detalle importante en el puente de Wheatstone es la elección de los valores de R_1, R_2,, y R_3. Vamos a abordar este tema paso por paso.

Primero, observemos que el puente está compuesto básicamente por dos divisores de tensión: el formado por R_1 y R_3 (que da lugar al voltaje V_a) y el formado por R_2 y R_s (que da lugar al voltaje V_b). El primer divisor es fijo (ambas resistencias son fijas), pero el segundo es variable por la variación de R_s.

Dado que V_{out} es el resultado de restar los voltajes de estos dos divisores de tensión, las resistencias suelen elegirse para balancear el puente de la siguiente forma:

- $R_1 = R_2$. El valor específico de estas puede variar. Por ejemplo, en caso de ser un puente para un sensor de temperatura, se elige de tal manera que la corriente no sea muy alta para que evitemos el auto calentamiento del sensor.

- R_3 debe tener el mismo valor que toma R_s en el punto de medición en el que deseamos que circuito entregue 0V. Por ejemplo, si es una pt 100 y queremos que el circuito entregue 0V a 0°C, entonces R_3=100Ω.

Vamos a ver todo esto con un ejemplo numérico.

- **Ejemplo 6.7**

Supongamos que tenemos como sensor una pt 100, la cual es un sensor resistivo que presenta 100Ω a 0°C y 138.5Ω a 100°C. Supongamos que deseamos medir temperatura en ese rango y que deseamos tener 0V a 0°C.

Vamos a acondicionar el sensor usando el circuito de la Figura 11, tomando R_1=R_2=4.7KΩ, R_3=100Ω y V_1= 5V.

Analizaremos el circuito para los casos externos (0°C y 100°C)

  - Cuando la temperatura es 0°C:

  En este caso, tendremos que la pt 100 presenta una resistencia de 100Ω, y siendo R_1 = R_2=4.7KΩ,

$$V_a = 5\frac{100}{100 + 4700} = 0.104V$$

$$V_b = 5\frac{100}{100 + 4700} = 0.104V$$

  Es decir, que V_{out}=0V, y esto se da porque a esta temperatura ambos divisores de voltaje son iguales siendo R_1=R_2 y R_3=R_s. De esta misma manera, si se quisiera (por poner un caso cualquiera) que el voltaje fuera 0V cuando la temperatura fuera de -20°C, sólo tendría que revisar que la resistencia de la pt100 es de 92.13Ω, y en consecuencia poner R_3=92.13Ω.

  - Cuando la temperatura es 100°C:

  En este caso, tendremos que la pt 100 presenta una resistencia de 100Ω, y siendo R_1 = R_2=4.7KΩ, tenemos:

$$V_a = 5\frac{100}{100 + 4700} = 0.104V$$

$$V_b = 5\frac{138.5}{138.5 + 4700} = 0.143V$$

Entonces Vout= 0.143V-0.104V=0.039V.

Es evidente que el cambio de voltaje es muy pequeño, al ser pequeño el cambio de resistencia. Este es el mismo problema que nos hemos encontrado con todas las configuraciones. En este caso, sin embargo, hay una ventaja: **el voltaje es diferencial**, lo cual lo hará más inmune al ruido que potencialmente pueda afectar la señal. Para entender por qué esto es una ventaja, debemos entender qué es una señal diferencial y cuáles son sus características, lo cual no forma parte de este tema.

6.3.3 Relación directa o inversa

La ecuación 6.6 nos muestra una relación directa entre voltaje y resistencia. Al igual que en el divisor de tensión esto puede modificarse si cambia la posición de la resistencias como se ve en la Figura 13.

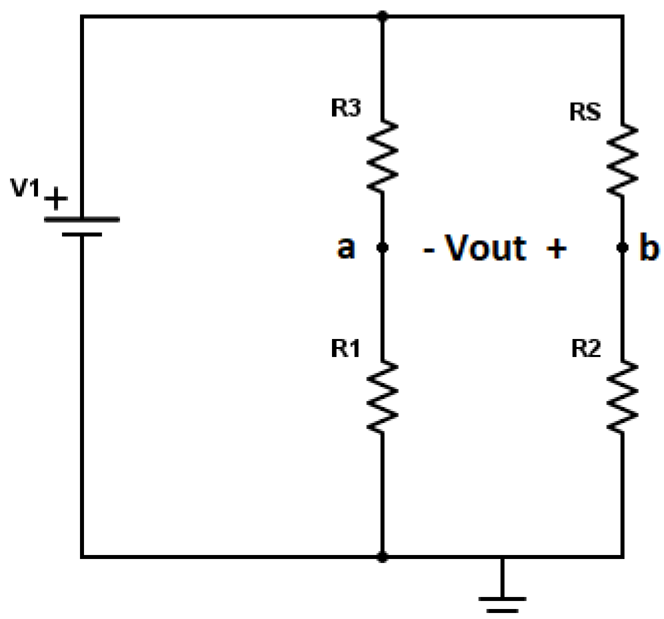

Figura 13. Alternativa en acondicionamiento por puente de Wheatstone

En este caso tendremos las siguientes ecuaciones.

$$V_a = V_1 \frac{R_1}{R_1+R_3} \quad \text{Eq.6.7}$$

$$V_b = V_1 \frac{R_2}{R_2+R_s} \qquad \text{Eq.6.8}$$

$$V_{out} = V_b - V_a = V_1 \left(\frac{R_2}{R_2+R_s} - \frac{R_1}{R_1+R_3}\right) \qquad \text{Eq.6.9}$$

De la ecuación 6.9 puede verse que en este caso tendremos una relación inversa en la cual al aumentar R_S el valor de V_{out} decrecerá. AL igual que para la relación directa, puede notarse que la relación no es lineal.