

Laboratório de Circuitos Eletrônicos

Circuitos Básicos a Amplificadores Operacionais (Parte II)

Amplificador de Instrumentação

Rev. 3.0

1. Objetivos

- i) Estudo de circuitos em pontes (Ponte de Wheatstone)
- ii) Projeto de um amplificador de instrumentação.

2. Equipamento Necessário

- osciloscópio de duplo canal, fonte de tensão, multímetro.
- Amplificadores Operacionais (5xLM741, 3xLM747) ou (5xLF351, 3xLF353)
- protoboard
- resistores e capacitores
- cabos, conectores
- papel milimetrado

3. Introdução Teórica

3.1 Pontes Resistivas

Na Figura 1 tem-se a ponte de Wheastone¹ em sua forma mais simples, composta por quatro elementos de 2 terminais (resistores, no caso), formando um quadrilátero, uma fonte de excitação (tensão ou corrente), conectada ao longo de uma diagonal e um instrumento de medição (tensão ou corrente), conectado à outra diagonal. A ponte possibilita a medida de uma propriedade elétrica de um elemento indiretamente, comparando-se com um elemento similar. Assim,

$$V_o = \frac{R_1}{R_1 + R_4} V_{in} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} V_{in} \quad (1)$$

$$V_o = \frac{\frac{R_1}{R_4} - \frac{R_2}{R_3}}{\left(1 + \frac{R_1}{R_4}\right)\left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)} V_{in} \quad (2)$$

Quando $R_1/R_4 = R_2/R_3$, a ponte está balanceada (em ZERO), ou seja, $V_o = 0$, independentemente do modo de excitação (tensão ou corrente), sua magnitude, modo de leitura (tensão ou corrente) ou impedância do medidor.

¹Na realidade, desenvolvida por S. H. Christie, em 1833.

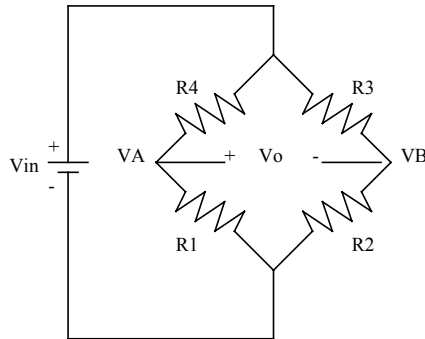


Figura 1. Ponte de Wheastone resistiva, com excitação e leitura em tensão

Em algumas aplicações, a polaridade de $V_o \neq 0$ é mais importante que seu próprio módulo. Por exemplo, se o nível de um tanque está abaixo de um valor previamente especificado, uma válvula deve ser aberta para enche-lo.

Na maioria de transdutores empregando pontes, o desvio de um ou mais resistores em relação ao valor inicial é uma indicação da magnitude (ou sua variação) da grandeza sob medição. Na Figura 2.2 tem-se uma ponte com todas resistências nominalmente iguais, à exceção de R_1 , o qual é multiplicado por um fator $(1+X)$, onde X corresponde a um desvio fracional em torno de zero, função, por exemplo, do stress (sensor *strain-gage*) aplicado a uma barra.

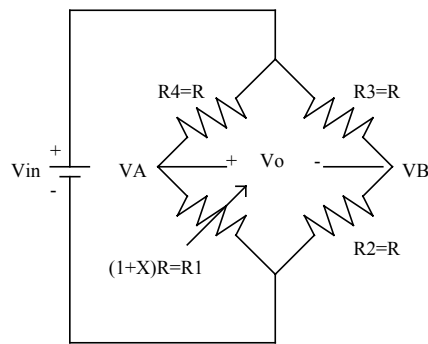


Figura 2. Ponte utilizada para a medição de desvio de um único elemento variável

Tem-se, portanto,

$$V_o = \frac{V_{in}}{4} \frac{X}{1 + \frac{X}{2}} \quad (3)$$

ou seja, a relação entre V_o e o fator X é não-linear. No entanto, para $X \ll 1$,

$$V_o \cong \frac{V_{in}}{4} X \quad (4)$$

Por exemplo, se $V_{in} = 10V$ e $X_{max} = \pm 0.002$, a saída da ponte V_o será linear a 0.1% no intervalo $-5mV \leq V_o \leq 5mV$ e a 1% para $-50mV \leq V_o \leq 50mV$.

Define-se como *sensibilidade* da ponte a razão entre a máxima variação esperada em V_o sobre o valor da tensão de excitação. No exemplo citado, as sensibilidades são $\pm 500\mu V/V$ e $\pm 5mV/V$, respectivamente.

A sensibilidade pode ser dobrada no caso de dois elementos variáveis idênticos serem utilizados, como na ponte ilustrada na Figura 3. Um exemplo seria a utilização de um par de resistores *strain-gage* identicamente orientados, sob ação de um mesmo stress.

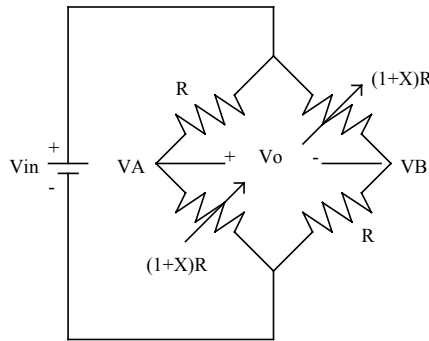


Figura 3. Ponte com dois elementos variáveis

No caso,

$$V_o = \frac{V_{in}}{2} \frac{X}{1 + \frac{X}{2}} \quad (5)$$

e para $X \ll 1$,

$$V_o \cong \frac{V_{in}}{2} X \quad (6)$$

Como pode ser observado, a saída é dobrada em relação ao caso anterior, embora o mesmo grau de não-linearidade $1/(1+X/2)$ exista.

Em casos especiais, a saída pode ainda ter sua dobrada, como indicado na Figura 4. Neste caso, dois pares de elementos variáveis idênticos são utilizados, onde cada par apresenta uma variação igual em magnitude, mas em sentido contrário, em relação ao outro par.

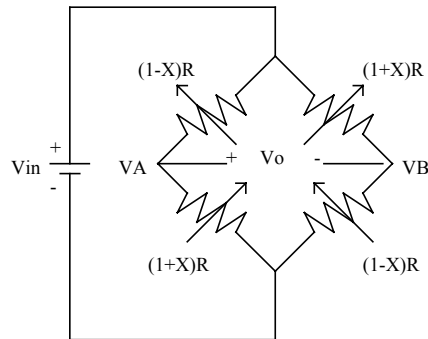


Figura 4. Ponte a pares de elementos variáveis

Assim,

$$V_o = XV_{in} \quad (7)$$

e como pode ser observado, uma saída idealmente linear é obtida, supondo-se, evidentemente, idênticas variações expressas por X . Como exemplo, a utilização de pares de resistores strain-gage, em superfícies opostas de uma barra (fina) sob stress. Desse modo, enquanto um par é submetido ao alongamento (aumento da resistência), o outro sofre compressão (diminuição da resistência).

A tensão (ou corrente) de excitação deve ser consideravelmente estável. Variações no tempo podem induzir a erros em V_o , uma vez que a rejeição do modo comum, embora elevada, não é idealmente infinita. Na prática, essa tensão, denominada referência de tensão, é obtida com a utilização de circuitos reguladores de tensão. Esses circuitos geram referências de tensão que apresentam desvios extremamente baixos (dezenas de ppm, no máximo) de seu valor nominal em função de variações na alimentação e temperatura. Na Figura 5 tem-se um circuito prático de polarização de uma fonte resistiva utilizando-se componentes comerciais.

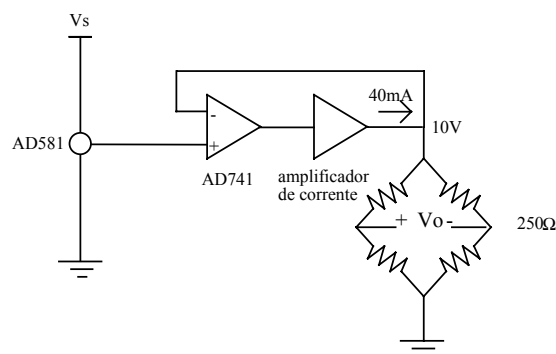


Figura 5. Polarização da ponte resistiva

3.2 Amplificador de Instrumentação (AI)

Esta classe de amplificadores é utilizada na amplificação de sinais de pequena amplitude ($50\mu\text{V}$ - 10mV), superpostos a grandes valores de tensão DC (modo comum), e

geralmente, provenientes de uma configuração sensor + transdutor. Como principais características elétricas:

- entrada diferencial
- elevada rejeição ao modo comum
- elevada impedância de entrada ($> 1\text{G}\Omega$)
- ganho programado (20dB - 60dB)
- baixa tensão de *offset* à entrada (capacidade de ajuste externo) ($< 200\mu\text{V}$)
- baixo ruído intrínseco

Na Figura 6 tem-se o esquemático da configuração clássica de um AI a partir de 3 amplificadores operacionais, dispostos em 2 estágios: i) à entrada, estágio pré-amplificador com $r_{in} \rightarrow \infty$ e ganho proporcional a (R_2/R_1) e ii) estágio diferencial. O ganho total do AI, assumindo operacionais ideais, corresponde a

$$\frac{V_{out}}{V_2 - V_1} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3} \quad (8)$$

Para que o modo comum seja eficientemente rejeitado, como indicado em (8), é fundamental que resistores nominalmente casados apresentem, na prática, valores muito próximos, com tolerância inferior a 0.1%. Desse modo, o ajuste de ganho faz-se preferencialmente pela variação de R_1 , o único resistor sem compromisso de paridade.

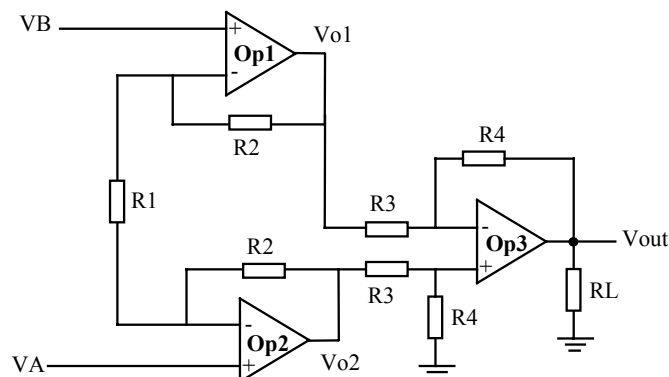


Figura 6. Amplificador de Instrumentação a 3 operacionais

4. Procedimento Experimental

PRE-LAB:

4.1 Deduza a expressão (3).

4.2 Utilizando o LM741 (ou equivalente) e fontes de alimentação simétricas $\pm 5\text{V}$, projetar um amplificador de instrumentação com as seguintes especificações:

- Ganho de tensão do AI ajustável no intervalo 26dB - 40dB.²
- $R_L = 10K\Omega$
- $R_{in2} \geq 10K\Omega$ (resistência de entrada de pequenos sinais do estágio diferencial).
- Máxima corrente fornecida pelo operacional: $I_{op_max} = 10mA$.

Para este projeto, admita uma tensão de modo comum (V_{CM}) associado às entradas (V_A e V_B) de 1.5V. Admitindo o diferencial de tensão $V_A - V_B \ll V_{CM}$, pode-se considerar $V_{CM_VA} = V_{CM_VB} = V_{CM}$.

4.3 Projete uma ponte resistiva de modo que:

- $V_{in} = 3V$ (tensão de excitação)
- Corrente máxima drenada pela ponte: 10mA
- Balanceada, $V_A = V_B = V_{CM} = 1.5V$.

4.4 A partir de resistores e um único operacional, proponha um circuito simples para a polarização da ponte resistiva. Justifique sua escolha.

Deve constar no relatório:

4.5.1 Dedução da expressão (8).

4.5.2 Em que condições R_L interferiria no ganho de tensão?

4.5.3 Caso $1V \leq V_{CM} \leq 2V$, os resistores $R_1 - R_4$ deveriam ser recalculados? Justifique.

MONTAGEM

4.6 Meça, inicialmente, os valores de todos os resistores a serem utilizados.

4.7 Monte o amplificador de instrumentação projetado, procurando casar, o melhor possível, os resistores críticos. Mantendo o modo comum V_{CM} do sinal, à saída do gerador, igual o zero,

- Determine a tensão interna de offset do amplificador de instrumentação, referente à sua entrada
- Caracterize o intervalo de ganho programável. Caso as especificações de ganho não sejam alcançadas, refazer o projeto.

4.8 Utilizando a saída com offset interno do gerador de áudio para impor V_{CM} , meça a saída V_{out} e as tensões intermediárias V_{o1} e V_{o2} (V. Figura 6) para $V_A = V_B = V_{CM} = 1.5V$. Análise e justifique os resultados obtidos.

4.9 Ainda com $V_A = V_B = V_{CM}$, varie V_{CM} entre 1.0V e 2.0V e observe o comportamento de V_o . Provocando, agora, um descasamento em torno de 5% nos resistores do amplificador de instrumentação, repita as medidas, comparando com os resultados precedentes. Análise e justifique.

²Sugestão: Impor ganho de tensão fixo no segundo estágio

4.10 Retornando à condição de melhor casamento de resistores no AI, monte o circuito de polarização da ponte. Meça e analise o valor de V_{in} . Em seguida, implemente a ponte resistiva para $V_A = V_B = V_{CM} = 1.5V$. Compare o valor experimental de V_o com o esperado, considerando os valores práticos dos resistores da ponte.

4.11 Utilizando um potenciômetro, como indicado na Figura 2 (ponte resistiva com um único elemento variável), levante a característica de linearidade da ponte através da transferência V_o em função da variação $X (= \Delta R/R)$. Compare com (3).

4.12 Acople o amplificador de instrumentação à saída diferencial da ponte, como indicado na Figura 7. Para $V_{CM} = 1.5V$, varie o potenciômetro de modo a zerar, inicialmente, a saída do amplificador. Meça o valor do potenciômetro nessa condição. Em seguida, levante a característica de linearidade do conjunto ponte + amplificador através da transferência V_{out} em função da variação X , para um ganho fixo. Compare a linearidade com aquela obtida através da curva obtida no item anterior, justificando possíveis diferenças.

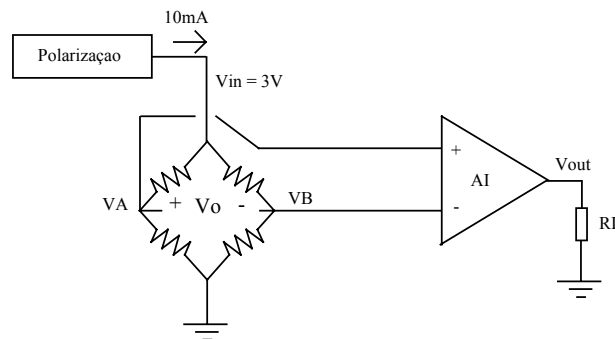


Figura 7. Circuito completo do experimento

5. Simulação

5.1 Verifique o intervalo de ganho (dB) do amplificador de instrumentação (análise AC).

5.2 Analise a rejeição do modo comum em função do descasamento dos resistores.

5.3 Inclua a ponte e o circuito de polarização. Com os valores medidos experimentalmente, analise a saída do amplificador de instrumentação para (análise DC):

- para $V_o = 0V$ (ponte balanceada)
- para $V_o = 20mV$

6. Conclusões

Em forma de tabela, compare os principais valores teóricos, simulados e experimentais. Calcule os desvios percentuais. Em função dos resultados obtidos, comente sobre a realização dos objetivos propostos. Discuta as diferenças encontradas

entre valores esperados e medidos, quantificando os erros e estabelecendo possíveis causas. Os objetivos propostos no experimento foram alcançados?