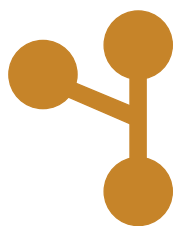


REVISTA TÉCNICO - CIENTÍFICA



# robótica®

automação  
controlo  
instrumentação



## ARTIGO CIENTÍFICO

- Integration of industrial automation fieldbuses with different technologies

## INSTRUMENTAÇÃO

- Ponte de Wheatstone

## ELETRÓNICA INDUSTRIAL

- Eletrónica (25.ª Parte)

## PORTUGAL 3D

- As profissões do setor metalomecânico necessitam de ser redesenhadas

## ROBÓTICA 360°

- Introdução à Robótica Industrial (3.ª Parte)

## DOSSIER SOBRE 5G E INTERNET OF THINGS

- Dicas para aumentar a usabilidade da sua HMI
- Tecnologia *wireless* é um fator-chave no futuro das aplicações industriais
- IoT e Internet 5G
- O 5G na mobilidade das Cidades Inteligentes

## ESPECIAL MAQUINAÇÃO

- AMADA apresenta quinadora EGBE 100% elétrica
- Bonfiglioli: soluções mecatrónicas – aplicação enrolador/desenrolador
- Sensores para determinação da condição do óleo
- Fonte de alimentação encapsulada para segurança e alarme de incêndio
- Cultura e a consciencialização na segurança: uma questão pendente da indústria
- Componentes de precisão e proteção REIMAN: como otimizar equipamentos de maquinação
- Novos rolamentos de rolos cilíndricos para redutores industriais e máquinas de construção de carga pesada
- Margo: nova iniciativa de padrão aberto para a interoperabilidade na automação industrial

**FFONSECA**  
SOLUÇÕES DE VANGUARDA

**Já conhece  
o novo TM30S?**

AI Cobot Series  
\_ Robôs colaborativos

ffonseca.com/techman-robot

**TM** TECHMAN ROBOT

# Ponte de Wheatstone

## 1. INTRODUÇÃO

As pontes de medida são circuitos com um gerador, para os quais, para uma determinada relação entre os seus parâmetros, se verifica o anulamento da corrente num dos seus ramos. Utilizam-se para a medição de grandezas de carácter eléctrico: resistências (pontes de Wheatstone<sup>1</sup> e de Kelvin<sup>2</sup>), autoinductões (pontes de Maxwell<sup>3</sup> e de Hay), capacidades (pontes de Schering<sup>4</sup> e de Wien<sup>5</sup>), induções mútuas (ponte de Campbell), frequências (ponte de Wien-Robinson), entre outros.

Numa ponte de medida, a variação do parâmetro sob medida é convertida numa variação de corrente  $\Delta i$ , ou de tensão  $\Delta u$ , facilmente mensuráveis com um amperímetro, um voltímetro ou um sistema de aquisição de dados. A ponte pode ainda ser utilizada como detector de desvio de zero, sendo este o modo que interessa na instrumentação.

Na instrumentação industrial tem grande interesse a medição de resistências (ou as suas variações), por estas estarem relacionadas com as grandezas físicas a medir. Por exemplo, numa termorresistência existe uma relação bem definida entre a temperatura e a resistência eléctrica do elemento de medida, num termistor a resistência varia com a temperatura, num extensómetro há uma relação entre a deformação e a sua resistência eléctrica, num elemento piezorresistivo a relação é entre a pressão aplicada e a resistência eléctrica do elemento. Pelo facto da medida de resistência ser muito importante em instrumentação, concentrar-se-á a atenção na ponte de Wheatstone óhmica, utilizada para medir resistências dentro do intervalo de medição entre 1  $\Omega$  e 1 M $\Omega$ .

## 2. PONTE DE WHEATSTONE

A ponte de Wheatstone óhmica, utilizada para a medição de resistências, tem a configuração indicada na Figura 1 e é um dos muitos tipos de pontes de medida utilizados na determinação de grandezas eléctricas. É alimentada por uma tensão contínua, alternada ou pulsada. Devido ao facto de na sua constituição entrarem apenas elementos resistivos, as relações entre tensões e correntes verificam-se quer em valores instantâneos quer em valores eficazes. A ponte de Wheatstone também pode ser alimentada em corrente. Em qualquer dos casos, a alimentação deverá ter uma amplitude constante.

<sup>1</sup> Sir Charles Wheatstone, cientista e inventor inglês, 1802–1875, que popularizou a invenção original de Samuel Hunter Christie, outro físico e cientista inglês, 1784–1865.

<sup>2</sup> William Thompson (Lord Kelvin), físico, matemático e engenheiro de origem escocesa-irlandesa, 1824–1907.

<sup>3</sup> James Clerk Maxwell, cientista escocês criador da teoria clássica da radiação eletromagnética, 1831–1879.

<sup>4</sup> Harald Schering, físico germânico, 1880–1959.

<sup>5</sup> Max Karl Werner Wien, físico germânico, 1866–1938.



Na instrumentação industrial tem grande interesse a medição de resistências (ou as suas variações), por estas estarem relacionadas com as grandezas físicas a medir.

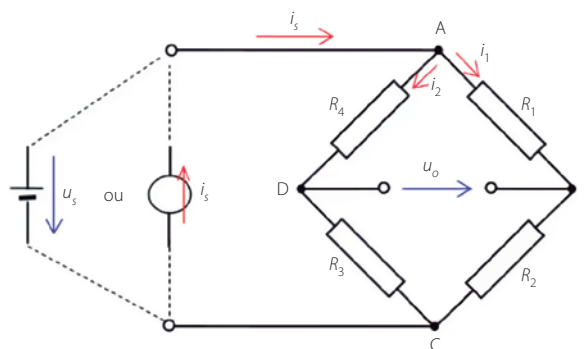


Figura 1. Ponte de Wheatstone óhmica.

## 3. PONTE DE WHEATSTONE ALIMENTADA A TENSÃO CONSTANTE

Para o caso em que a ponte de Wheatstone é alimentada a tensão constante, da observação da Figura 1, pode escrever-se

$$\begin{cases} u_{AB} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_s \\ u_{AD} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} u_s \end{cases} \quad (1)$$

Como a tensão de saída é dada por  $u_o = u_{AB} - u_{AD}$ , vem

$$u_o = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} u_s \quad (2)$$

A condição de equilíbrio da ponte de Wheatstone obtém-se a partir da equação anterior quando  $u_o = 0$  V, ou seja, quando  $R_1 R_3 = R_2 R_4$ . De notar que a equação (2) não é linear com as resistências. Na Figura 2 representa-se a tensão de desvio  $u_o(R_1)$ , para  $R_2 = R_3 = R_4 = 100 \Omega$  e  $u_s = 5$  V sendo  $R_1$  variável de 0  $\Omega$  a 500  $\Omega$ . Observe-se a forte não-linearidade. Na Figura 3 faz-se a mesma representação, mas com  $R_1$  variando apenas 10% para cada lado do valor de equilíbrio (100  $\Omega$ ). A saída é agora muito mais linear, apresentando um desvio máximo de 1,25% para a ponte alimentada em tensão e de 0,65% para a ponte alimentada em corrente.

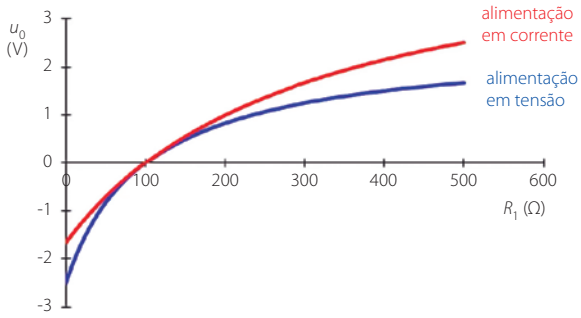


Figura 2. Tensões de desvio da ponte de Wheatstone, para grandes desvios.

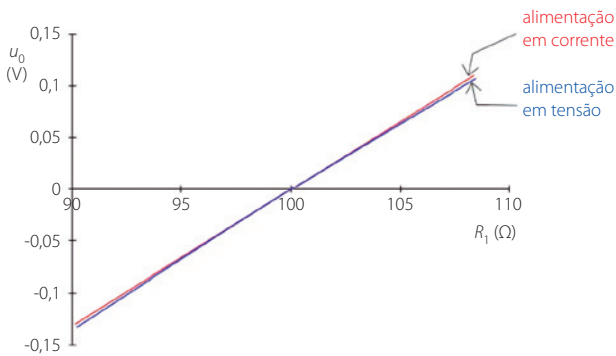


Figura 3. Tensões de desvio da ponte de Wheatstone, para pequenos desvios.

Voltando à expressão (2) e considerando o caso em que  $R_1 = R_0 + \Delta R$  e  $R_2 = R_3 = R_4 = R_0$ , i.e. em que apenas  $R_1$  é variável em torno de  $R_0$  ( $R_1$  representa a variação de resistência de um transdutor ôhmico), sendo as restantes resistências de valor constante, após simplificação e fazendo  $2R_0 + \Delta R \approx 2R_0$ , obtém-se

$$u_o = \frac{(R_0 + \Delta R) R_0 - R_0^2}{(2R_0 + \Delta R) 2R_0} u_s \approx \frac{\Delta R}{4R_0} u_s \quad (3)$$

Partindo novamente de (2) e considerando o caso em que qualquer uma das 4 resistências pode variar ligeiramente em torno do seu valor de referência, a variação incremental da tensão de saída é dada por

$$du_o = \frac{\partial u_o}{\partial R_1} dR_1 + \frac{\partial u_o}{\partial R_2} dR_2 + \frac{\partial u_o}{\partial R_3} dR_3 + \frac{\partial u_o}{\partial R_4} dR_4 \quad (4)$$

Admitindo pequenos desvios ( $\Delta R \lesssim 10\% R_0$ ), tem-se  $du_o \rightarrow \Delta u_o$  e  $dR \rightarrow \Delta R$ . Desprezando os termos de ordem superior (produtos de  $\Delta R$ ) e para desvios em torno do ponto de equilíbrio ( $R_1 R_3 = R_2 R_4 \Rightarrow u_o = \Delta u_o$ ), recorrendo à expressão (4), obtém-se

$$u_o \approx \frac{\partial u_o}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial u_o}{\partial R_2} \Delta R_2 + \frac{\partial u_o}{\partial R_3} \Delta R_3 + \frac{\partial u_o}{\partial R_4} \Delta R_4 \quad (5)$$

$$\approx \left[ \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) + \frac{R_3 R_4}{(R_3 + R_4)^2} \left( \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \right] u_s$$

#### 4. PONTE DE WHEATSTONE ALIMENTADA A CORRENTE CONSTANTE

Neste caso (ver a Figura 1), a corrente de alimentação deverá ser constante, obtendo-se para este circuito

$$\begin{cases} i_s = i_1 + i_2 \\ u_o = u_{AB} - u_{AD} \\ u_{AB} = i_1 R_1 \\ u_{AD} = i_2 R_4 \\ u_{AC} = i_1 (R_1 + R_2) = i_2 (R_3 + R_4) \end{cases} \quad (6)$$

e combinando as equações (6), obtém-se

$$u_o = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} i_s \quad (7)$$

A condição de equilíbrio continua a ser  $R_1 R_3 = R_2 R_4$  e a saída deste circuito, em função de qualquer uma das resistências, continua a ser não-linear (sendo, no entanto, *mais linear* do que o anterior). Nas Figuras 2 e 3 representa-se, também, a saída  $u_o(R_1)$  para a ponte anterior, quando alimentada por uma corrente contínua de 50 mA.

#### 5. MELHORIAS NA LINEARIDADE

Por vezes, para aumentar a linearidade, quer com alimentação a tensão constante quer a corrente constante, utilizam-se para  $R_2$  e  $R_3$  valores tais que  $R_2 = R_3 > 10R_4$ , sendo  $R_1$  o elemento transdutor. A condição de equilíbrio da ponte é mantida, surgindo uma significativa melhoria na linearidade, conforme se mostra na Figura 4, em que  $u_o$  corresponde a  $R_2 = R_3 = R_4 = 100 \Omega$  e  $u_1$  corresponde a  $R_2 = R_3 = 1000 \Omega$  e  $R_4 = 100 \Omega$ . Repare-se na diminuição da sensibilidade em torno da tensão de desvio nula e que é o preço a pagar pelo aumento da linearidade.

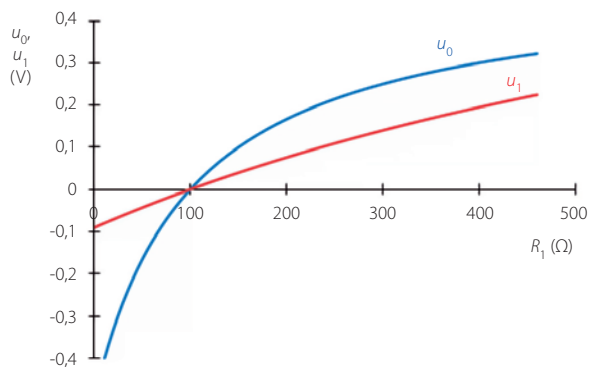


Figura 4. Tensões de saída para dois casos distintos, exemplificativos da melhoria na linearidade da ponte de Wheatstone. 📌



Devido ao facto de na sua constituição entrarem apenas elementos resistivos, as relações entre tensões e correntes verificam-se quer em valores instantâneos quer em valores eficazes.