Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

PSI3214

Laboratório de Instrumentação Elétrica

Profa. Elisabete Galeazzo
Assistente: Antonio Sandro Verri
Pós-graduando: Dennis Cabrera Garcia

Turma 3 – sextas-feiras (2020)

Organização da Disciplina

- **4** experiências entre agosto e setembro de 2020 (aulas online e atividades remotas);
- Tutoriais sobre LabVIEW entre agosto e setembro (atividade individual);
- Projeto extraclasse em grupo de 3 alunos (**após a realização dos experimentos**);
- Experimentos presenciais em fevereiro 2021

Atividades da disciplina com avaliação

- Presença nas **aulas online** é obrigatória;
- Entrega de **relatórios** das atividades remotas (contabilizados se tiver presença nas aulas);
- Entrega das **tarefas dos 3 tutoriais:** tutoriais 1C, 2 e 3;
- **Projeto em grupo:** 2 relatórios, 2 programas em LabVIEW, 2 apresentações online;
- Presença obrigatória nos **2 experimentos em laboratório,** atividade individual (Fev. 2021)

Nota de Aproveitamento em 2020

$$N = 0{,}5.R + 0{,}35.P + 0{,}15.T$$

se $\min\{R, P, T\} \geq 4{,}0$

caso contrário $N = \min\{P, MR, PRJ\}$

Onde:

- **R** é a média da nota dos relatórios das experiências (parte remota (50%) e parte presencial* (50%))
- **P** é a média da nota do projeto extraclasse (relatórios (50%) e apresentações (50%))
- **T** é a média da nota dos exercícios dos tutoriais de LabVIEW

*Obs.: a participação na atividade presencial é obrigatória.

Apoio de especialistas e de monitores para as atividades remotas

A disciplina | TUTORIAIS do LabVIEW | EXP1-Pontes | EXP2-AD | EXP3-Fourier | EXP4-Potência | PROJETO - especificações e datas

Projeto - Etapa 2 | Projeto - Etapa 3 | Tutoriais para o Projeto | Open_Labs Projeto | Turma1 | Turma2 | Turma3 | Turma4 | Turm

Turma 8 | Videos | Professores | Monitores | +

Espaço para esclarecimento de dúvidas juntos aos especialistas, consultores e monitores da equipe de apoio da disciplina, relacionadas às atividades remo

ESPECIALISTAS

Apoio à programação em LabVIEW:

- Henrique M. Peres (hperes@lme.usp.br)
- Mauricio Perez (mperez@lme.usp.br)
- Rodrigo Anjos de Souza (rodrigo.anjos.souza@usp.br)

Apoio às atividades remotas:

- Antonio Sandro Verri (asverri@lme.usp.br)
- Carlos Alberto Ramos (cramos@lme.usp.br)
- Gustavo Marcati (gmarcati@lsi.usp.br)
- Henrique M. Peres (hperes@lme.usp.br)
- Manuel Cid Sanchez (mcid@lme.usp.br)

MONITORES

- Dennis Cabrera Garcia (cabreradennis20@usp.br)
- Carlos Massao Giuzio (carlosgiuzio@usp.br)

Projeto Extraclasse

TEMA:

Instrumento Virtual de Caracterização e Análise de Sinais Sonoros

Desenvolver um instrumento virtual capaz de fazer a aquisição, processamento, visualização e análise de sinais sonoros.

Ao final do processo, **uma aplicação específica** com sinais sonoros em **LabVIEW** deverá ser apresentada pelo grupo.

Projeto Extraclasse

Diferentes formas de coleta de sinais de áudio:

Capturar sinais pelo microfone do laptop

1. Baixar arquivos .*wav* pela internet; ou...

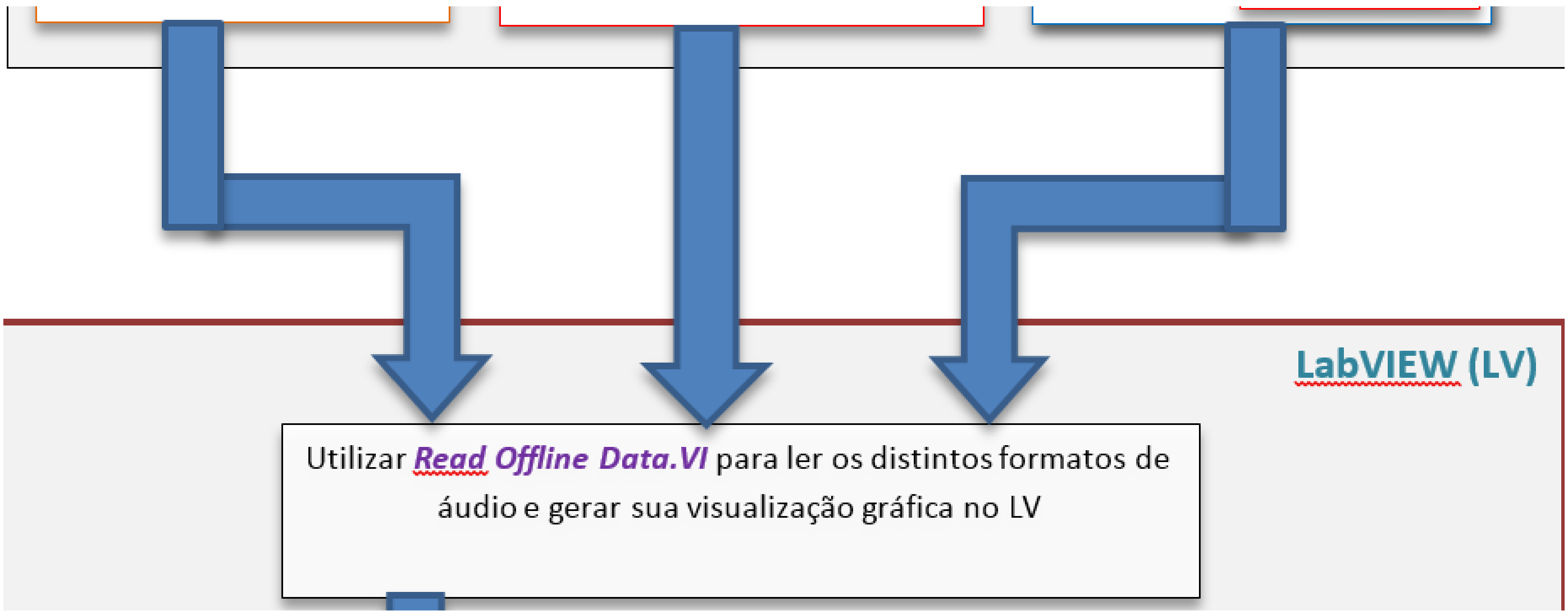
2. Gerar e exportar arquivos .*wav* (por exemplo, via Audacity)

Utilizar Simulador de Circuitos:

1. LTSPICE — Usar template

2. Multisim — Gerar arquivo .tdm

Projeto Extraclasse



1ª etapa do projeto:

Construção de um VI com as funcionalidades abaixo

1. Gráfico do sinal no domínio do tempo

. identificação da amplitude;

2. Gráficos do sinal no domínio da frequência:

. Espectros total e particionado (janelado);

. Identificação das frequências de maior amplitude;

. Identificação das amplitudes relacionadas às frequências mais significativas;

. Identificação da frequência de amostragem;

. Identificação da resolução espectral;

3. Espectrograma do sinal.

2ª etapa do projeto:

Criação de um VI com Aplicação específica

Sugestões:

. Decibelímetro;

. Datalogger;

. Equalizador digital;

. Identificador de falhas em sistemas de rotações;

. Etc...

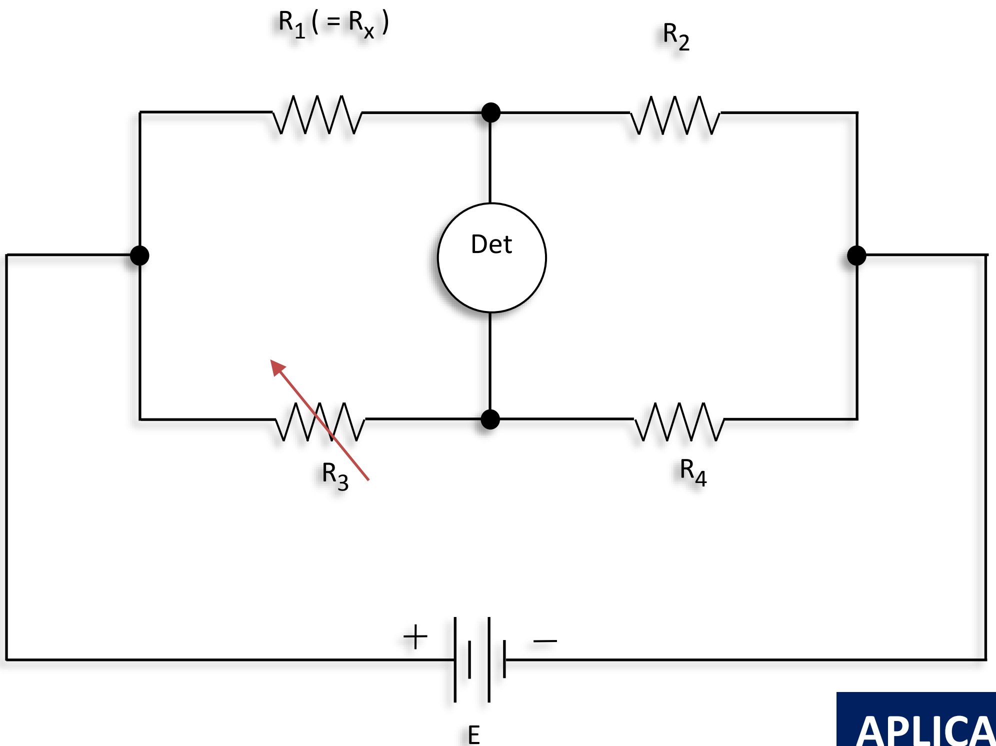
Projeto Extraclasse

Experiência 01

PONTES DE WHEATSTONE

☞ Circuito elétrico composto por: 4 elementos resistivos, uma fonte de tensão contínua e um detector

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo



O detetor pode ser:	→ galvanômetro ($R_{interna}$ ~ kΩ) → **voltímetro digital** ($R_{interna}$ ~ MΩ)

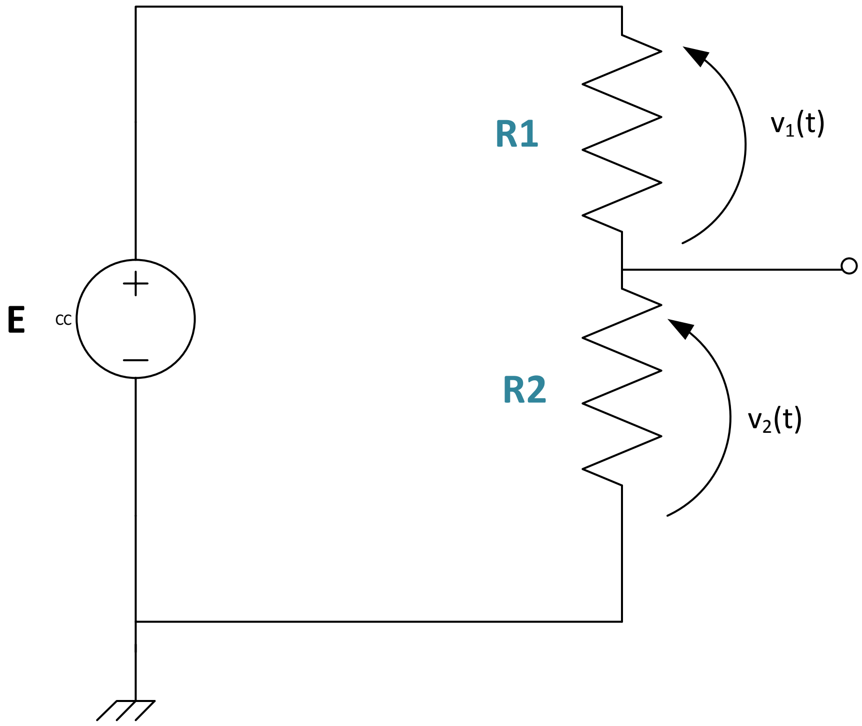
APLICAÇÕES:

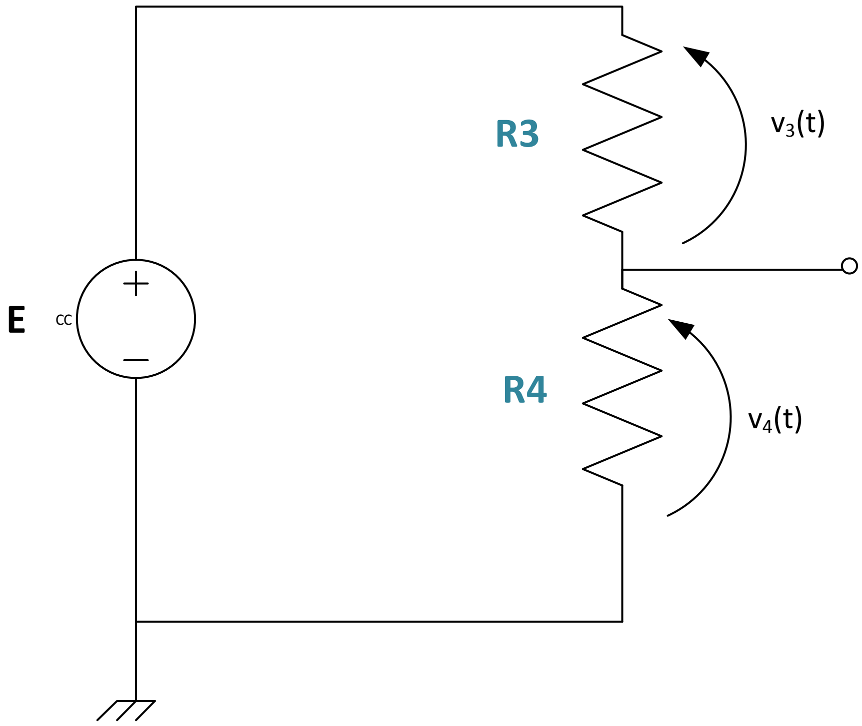
→ **Determinar o valor <u>exato</u> de um elemento resistivo (Rx);**

→ **Determinar pequenas variações de um dos seus elementos resistivos devido à ação de uma grandeza externa (sensor).**

Profa. Elisabete Galeazzo

Conceitos básicos: divisor resistivo

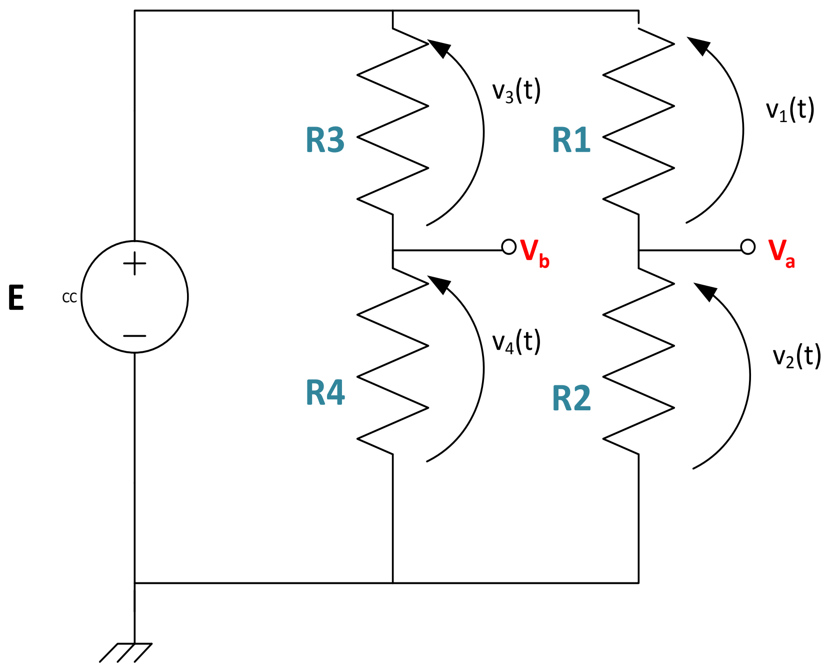


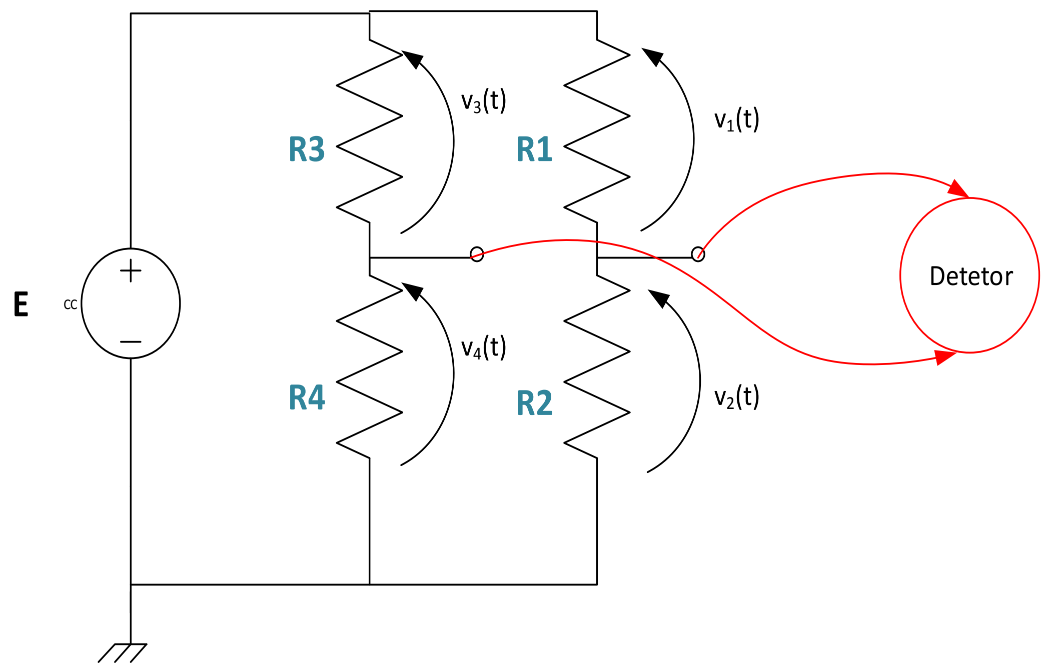


$$v_2(\mathrm{t}) = \frac{R_2}{R_2 + R_1}\,\mathrm{E}$$

$$v_4(\mathrm{t}) = \frac{R_4}{R_4 + R_3}\,\mathrm{E}$$

Conceito de divisor resistivo:

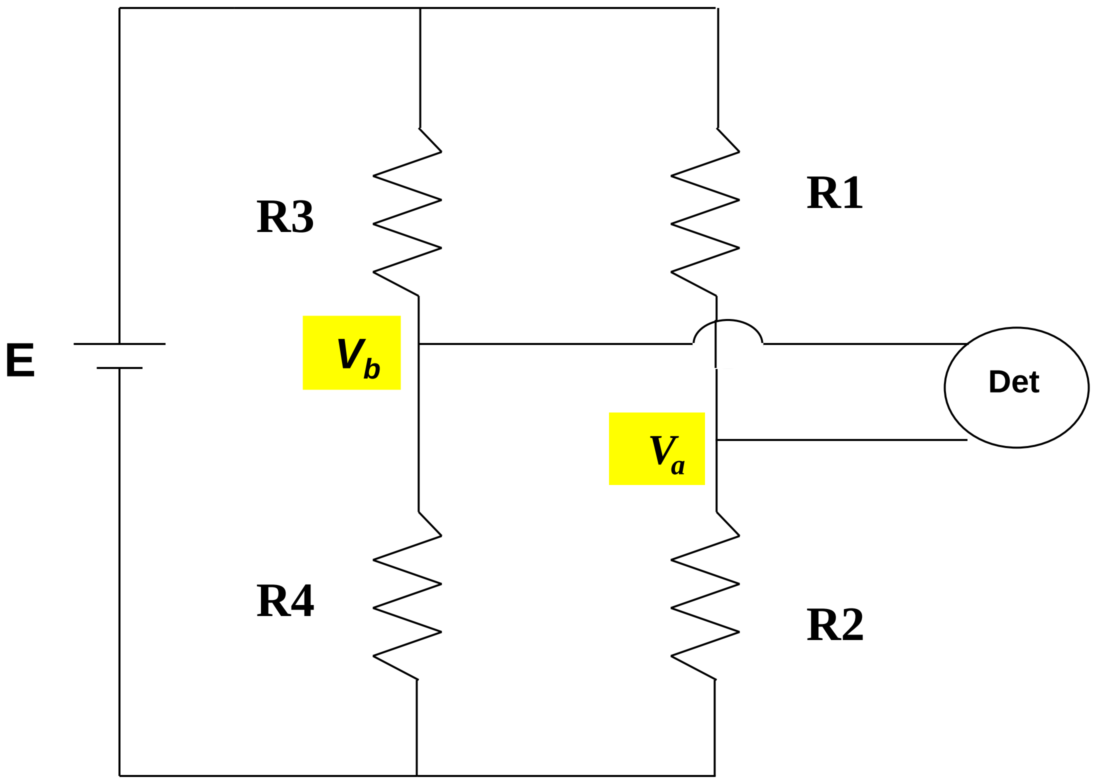




$$V_a - V_b = v_g = \left[\left(\frac{R_2}{R_2 + R_1} \right) - \left(\frac{R_4}{R_4 + R_3} \right) \right] . E$$

$$\frac{v_g}{E} = \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

PONTE DE WHEATSTONE UTILIZANDO **DETETOR COM RESISTÊNCIA** ***"INFINITA"***: ***MULTÍMETRO DIGITAL***



$$\frac{v_g}{E} = \frac{R_2R_3 - R_1R_4}{(R_1+R_2)(R_3+R_4)}$$

No equilíbrio:

$v_g = 0$

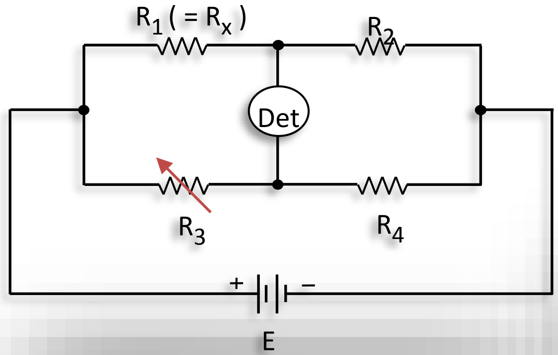
$\Rightarrow \quad R_1R_4 = R_2R_3$

Profa. Elisabete Galeazzo

Atividade Remota:

Projetar um circuito ponte
para ser utilizado com multímetro digital como detector
com o objetivo de determinar:
a) o valor da resistência do sensor R1 com exatidão
b) pequenas variações da resistência do sensor R1 (da ordem de 0,01%, por exemplo, devido à ação de forças externas).

Premissa: conhece-se o valor nominal do Sensor



Objetivo:
Determinar experimentalmente o valor "exato" de **R1** com o circuito ponte.
Como?

→ Buscando o equilíbrio da ponte (⇒ $V_g = 0$ V):

1. Através da variação de R_3 (resistor variável) (único grau de liberdade do nosso circuito)

2. Mantendo-se os resistores R_2 e R_4 fixos

→ Parece fácil. Será mesmo?

. **1º passo:**
Definir **R_2**, **R_3** e **R_4** para que o "circuito Ponte" tenha a máxima sensibilidade.

1º PROBLEMA: ***Que valores adotar para "R_2 , R_4 e R_3" para obter-se um circuito com a máxima sensibilidade?***

Vamos a seguir fazer uma análise da sensibilidade do circuito para responder esta pergunta......

Profa. Elisabete Galeazzo

Entendendo os cálculos relacionados à

SENSIBILIDADE DO CIRCUITO PONTE COM DETETOR DE RESISTÊNCIA INFINITA

PARA VARIAÇÕES DE "R_1" (incógnita do nosso circuito)

Ganho do circuito é dado por:

$$\frac{v_g}{E} = \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

Conhecendo-se a função $\frac{v_g}{E}$ (R1, R2, R3, R4), como equacionar a variação de $\frac{v_g}{E}$ em função de R_1?

$$S_{R1} = \frac{\partial\left(\frac{v_g}{E}\right)}{\partial R_1} = -\frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2}$$

S_{R1} = Sensibilidade da ponte em relação ao R1

Que valor adotar p/ R_2 para que a sensibilidade do circuito seja MÁXIMA?

Premissa: conhece-se o valor nominal do Sensor

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

$$\frac{v_g}{E} = \frac{R_2R_3 - R_1R_4}{(R_1+R_2)(R_3+R_4)} \Rightarrow S_{R1} = \frac{\partial\left(\frac{v_g}{E}\right)}{\partial R_1} = -\frac{R_2}{(R_1+R_2)^2}$$

Que valor adotar p/ R_2 para que a sensibilidade do circuito seja <u>MÁXIMA</u>?

$\Rightarrow$ Faz-se a derivada da função (S_{R1}) em relação a R_2

$\Rightarrow$ O <u>pto</u> de máximo ou mínimo é obtido ao igualar a função da derivada a zero

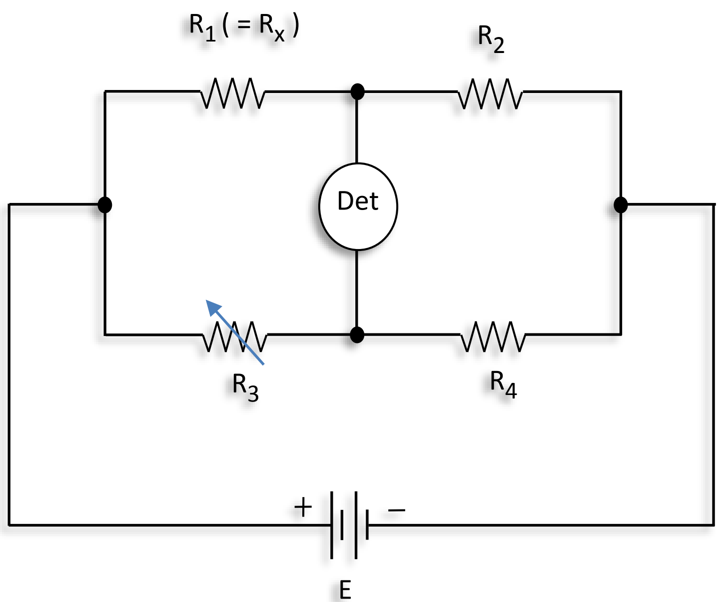
$$\frac{\partial S_{R1}}{\partial R_2} = 0$$

Chega-se à conclusão que:

$$\boldsymbol{R_2 = R_1}$$

Lembrando-se que no equilíbrio:

$$R_1R_4 = R_2R_3 \Rightarrow R_3 = R_4$$



Para > sensibilidade (S) para pequenas variações de R1 em torno do equilíbrio, temos:

R1 = R2 (onde $R_1 = R_{sensor}$)

R3 = R4

$$\frac{v_g}{E} = \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

Além disso, qto **> E $\rightarrow$ > Δv_g para ΔR_1**

Já somos capazes de responder essas perguntas?

1. Por que não podemos utilizar qualquer tensão de alimentação?

2. Os valores de todos os resistores deste **circuito experimental** podem assumir qualquer valor? Por exemplo: R1 = R2 = R3 = R4 (na condição de equilíbrio)?

3. Por que R1 = R2 = R3 = R4 não é uma solução prática para o circuito **do experimento**?

3. Teríamos alguma vantagem de escolher R3 = R4 >> R1 e R2 ?

Sabendo-se que $R_1 = R_2$, e $R_3 = R_4$ para a condição de máxima sensibilidade, temos que solucionar outro problema:

2º PROBLEMA:

➲ **Na prática, qual será a MENOR VARIAÇÃO DE R_1 que poderá ser detectada pelo circuito experimental?**

No circuito, a menor tensão de saída (v_g) mensurável depende da resolução do equipamento:

$$S_{R1} = \frac{\partial\left(\frac{v_g}{E}\right)}{\partial R_1}$$

$$S_{R_1} \sim \frac{\Delta v_g}{\Delta R_1} \cdot \frac{1}{E}$$

$$S_{R1} = \frac{\partial\left(\frac{v_g}{E}\right)}{\partial R_1} = -\frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2}$$

$$\Delta R_{1\min} = \frac{1}{S_{R_1}} \frac{\Delta v_{g\min}}{E}$$

$\Delta V_{g\ min} \rightarrow$ menor variação de V_g detectável e

$\Delta R_{1min} \rightarrow$ menor variação de R_1 mensurável

$\Delta V_{g\ min} \rightarrow$ menor variação de V_g detectável e $\Delta R_{1min} \rightarrow$ menor variação de R_1 mensurável

$$S_{R1} = \frac{\partial\left(\frac{v_g}{E}\right)}{\partial R_1} = -\frac{R_2}{(R_1+R_2)^2}$$

$$\Delta R_{1\min} = \frac{1}{S_{R_1}} \frac{\Delta v_{g\min}}{E}$$

$S_{R1} = S_{R1max}$

qdo $R_1 = R_2$

$$S_{R_1\max} = -\frac{1}{4R_1}$$

$$\left|\frac{\Delta_{R_1\min}}{R_1}\right| = 4.\left|\frac{\Delta v_{g\min}}{E}\right| = p_m$$

$$\left|\frac{\Delta_{R_{1\min}}}{R_1}\right| = 4.\left|\frac{\Delta v_{g\min}}{E}\right| = p_m$$

Para alcançar o equilíbrio em qualquer situação, é necessário:

$$\frac{\Delta R_{3\min}}{R_3} \leq p_m$$

p_m → menor variação relativa de R_1

p_m permite avaliar a sensibilidade da ponte

p_m dependerá dos instrumentos:

- **. resolução do medidor (ΔV_{gmin})**
- **. tensão de alimentação constante**

Conclusão: a menor medição relativa do sensor R_1 (p_m) dependerá da qualidade do medidor e do valor da tensão de alimentação.

TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO

→ atender as especificações dos resistores (potência máxima dissipada)

Análise prévia dos instrumentos de medida e componentes que serão utilizados no experimento:

$$\left|\frac{\Delta_{R_{1\,min}}}{R_1}\right| = 4.\left|\frac{\Delta v_{g\,min}}{E}\right| = p_m$$

Multímetro de bancada tem 6 ½ dígitos de resolução.
E vamos considerar que o < valor mensurável com precisão é 10 μV

Vamos assumir que: $\Delta v_{gmin} = 10\ \mu V$

E = 10V

$$p_m = \frac{10.10^{-6}}{10} = 10^{-6} = 1\ ppm$$

Para conseguir o equilíbrio tem-se que:

$$\frac{\Delta R_{3\,min}}{R_3} \leq p_m \qquad \frac{\Delta R_{3min}}{R_3} \leq 10^{-6}$$

$R_3 = 1\ M\Omega \rightarrow R3_{final} - R3_{inicial} = \Delta R_{3min} = 1\ \Omega$

Será que existe algum dispositivo (potenciômetro, resistor variável), que tenha estas características?

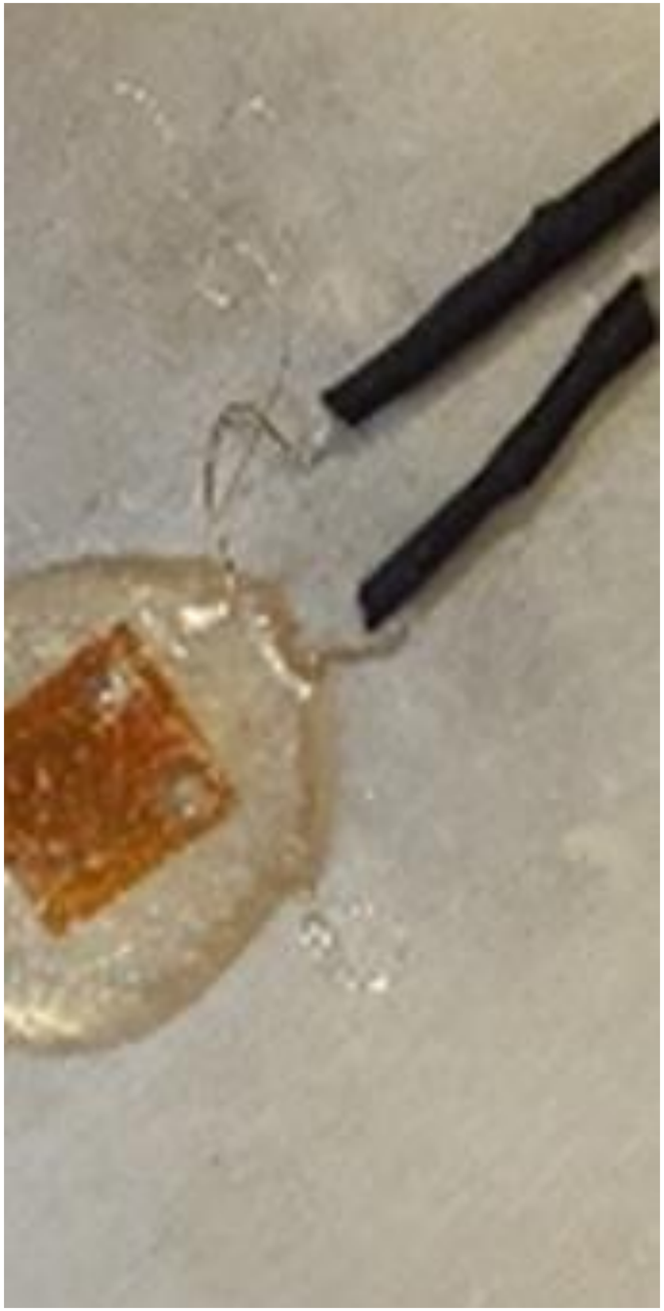
Caixa de Resistências ou Décadas Resistivas

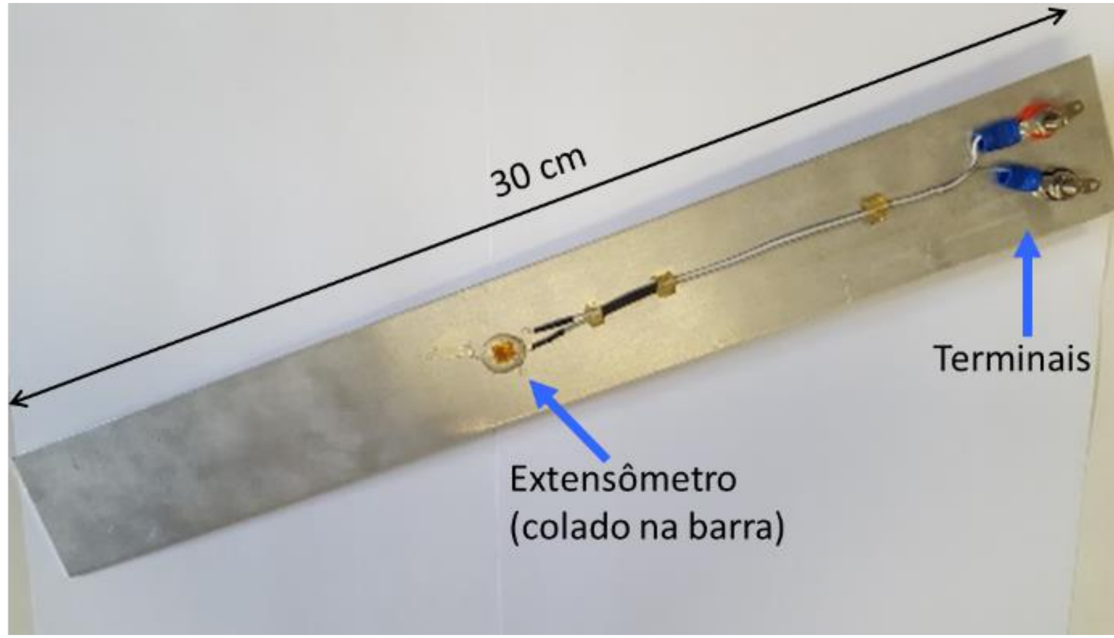
$$\frac{\Delta R_{3min}}{R_3} =$$

Assistam ao vídeo “Aprenda a utilizar uma caixa de resistências” para entender como você ajusta os valores de resistência que deseja para atuar como R3.

Accuracy and Temperature Coefficient (2786):

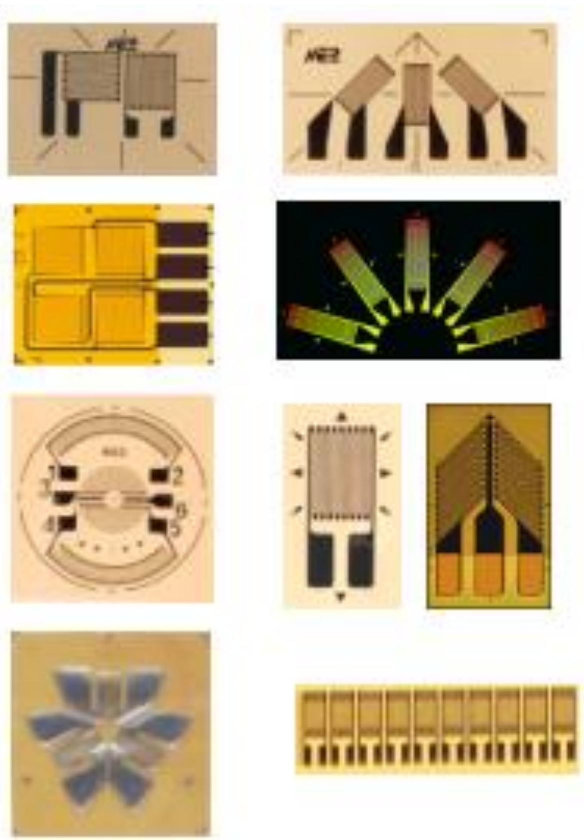
Step	Accuracy *1	Temperature Coefficient *2		Reference Data	
		α_{23} (x 10^{-6}/°C)	β (x 10^{-6} /°C^2)	Current Rating	Max. Allowable Input Current *3
0.1Ω	±2	±250	-0.4 to -0.8	1.7A	2.2A
1Ω	±0.5	±100	-0.4 to -0.8	550mA	710mA
10Ω	±0.1	±20	-0.4 to -0.8	170mA	220mA
100Ω	±0.05	±10	-0.4 to -0.8	55mA	71mA
1kΩ	±0.05	±10	-0.4 to -0.8	17mA	22mA
10kΩ	±0.1	±50	±0.1	5.5mA	7.1mA (10kΩ to 30kΩ) 250V (40kΩ to 100kΩ)
100kΩ	±0.1	±50	±0.1	250V (200kΩ to 1MΩ) 1.7mA (100kΩ)	250V

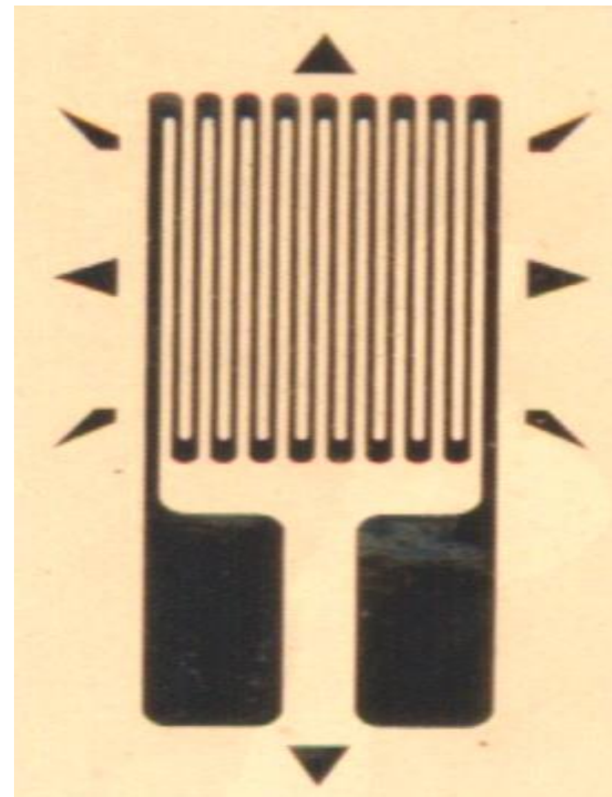




Sensor R1 =
Extensômetro ou
Strain Gauge

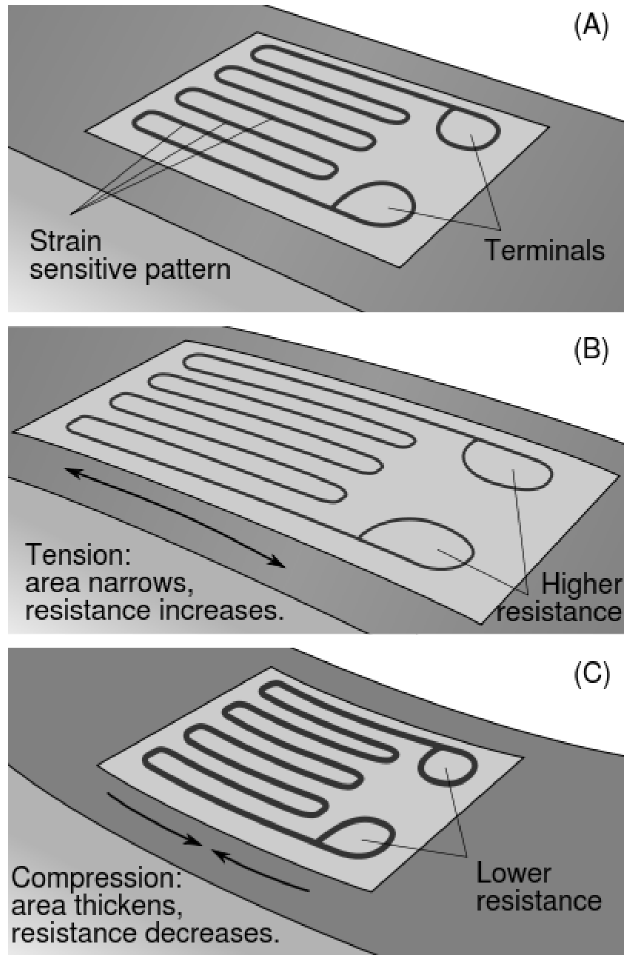
Neste experimento
R1 = Sensor: Extensômetro ou Strain-Gauge





Deformação do Strain-gauge submetido à deformação

$R = \rho L/A$



https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge#/media/File:StrainGaugeVisualization.svg

Exemplos de aplicação:

- Medidas de deformação elástica (distensão: tração ou compressão)
- Monitoração de Pontes e Edificações
- Balanças Eletrônicas – células de carga

Fator Gauge – fator de sensibilidade do extensômetro

Fator Gauge: $GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}}$

onde **GF** ≈ "2" (metais como liga de cobre e níquel)

Supondo: $\frac{\Delta L}{L} = \frac{200\ \mu m}{1\ m} = 2x10^{-4}$ $\longrightarrow$ $\frac{\Delta R}{R} = 4x10^{-4}$

R = 120 Ω, logo ΔR = 0,048 Ω

O sensor variou sua resistência em 0,04% devido à ação de uma força externa, que provou variação de 200 μm do seu comprimento!

Para assegurar exatidão nesta medição de resistência: Circuitos Ponte!

Projetar um circuito ponte que tenha excelente sensibilidade (máxima)

Considerações finais para
o projeto do circuito PONTE de WHEATSTONE:

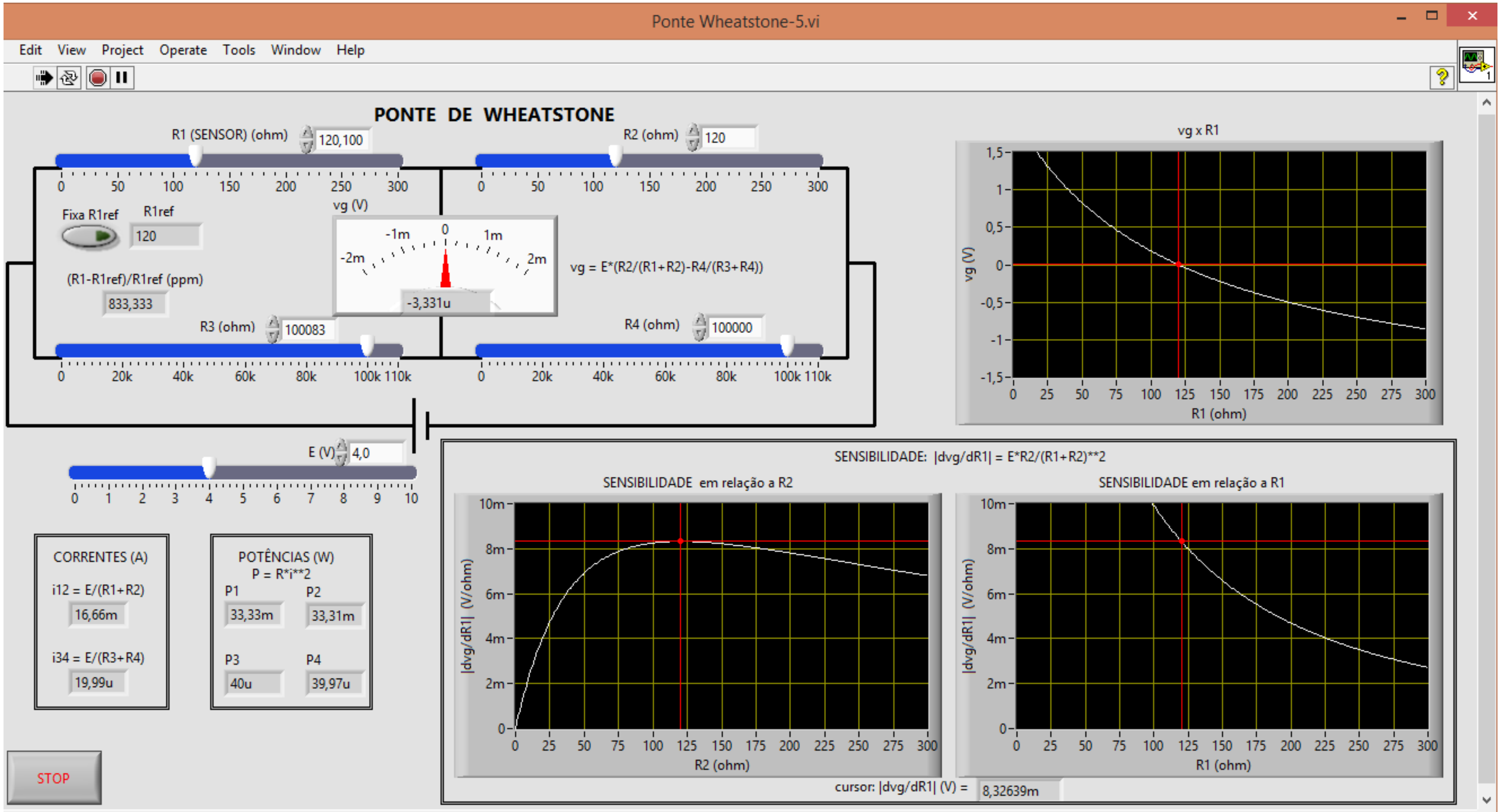
Já somos capazes de responder essas perguntas?

1. Por que não podemos utilizar qualquer tensão de alimentação neste circuito?

2. Por que R1 = R2 = R3 = R4 não é uma solução prática para este circuito **do experimento**?

3. Quais seriam as vantagem de escolher R3 = R4 >> R1 e R2 ?

4. Parar termos um circuito ponte com elevadíssima sensibilidade, o que precisamos ter?



. Quando o sensor variar devido à ação de uma força externa, tirará a ponte do equilíbrio;

. Na prática, não sabemos quanto o sensor R_1 variou

. Nosso único grau de liberdade é a caixa de resistências, R_3.

. Busca-se novamente o equilíbrio, alterando-se o valor de R_3 até encontrarmos a nova condição em que v_g = 0 V.

. A variação relativa de R_3 que conhecemos, ou seja, $\frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{\Delta R_1}{R_1}$

Você consegue provar esta igualdade?

Condição de equilíbrio da ponte:

$$R_1 R_4 = R_3 R_2$$

Condição de equilíbrio antes de aplicar uma força sobre R1

$$R_{1i} = R_{3i} . \frac{R_2}{R_4}$$

$$R_{1f} = R_{3f} . \frac{R_2}{R_4}$$

Nova Condição de equilíbrio após aplicar uma força sobre R1

$$R_{1f} - R_{1i} = \left(R_{3f} - R_{3i}\right) \frac{R_2}{R_4} \qquad (1)$$

Dividindo a equação (1) por R_{1i} temos:

$$\frac{\left(R_{1f} - R_{1i}\right)}{R_{1i}} = \frac{\left(R_{3f} - R_{3i}\right)}{R_{1i}} \frac{R_2}{R_4}$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3}$$

Provamos que a variação relativa no sensor é igual à variação relativa na caixa de resistências!

Vamos ver o aplicativo?

Ele é uma síntese de tudo que abordamos nesta apresentação!