

PTC3421 – Instrumentação Industrial

# Aspectos Gerais de Instrumentos

## Parte II

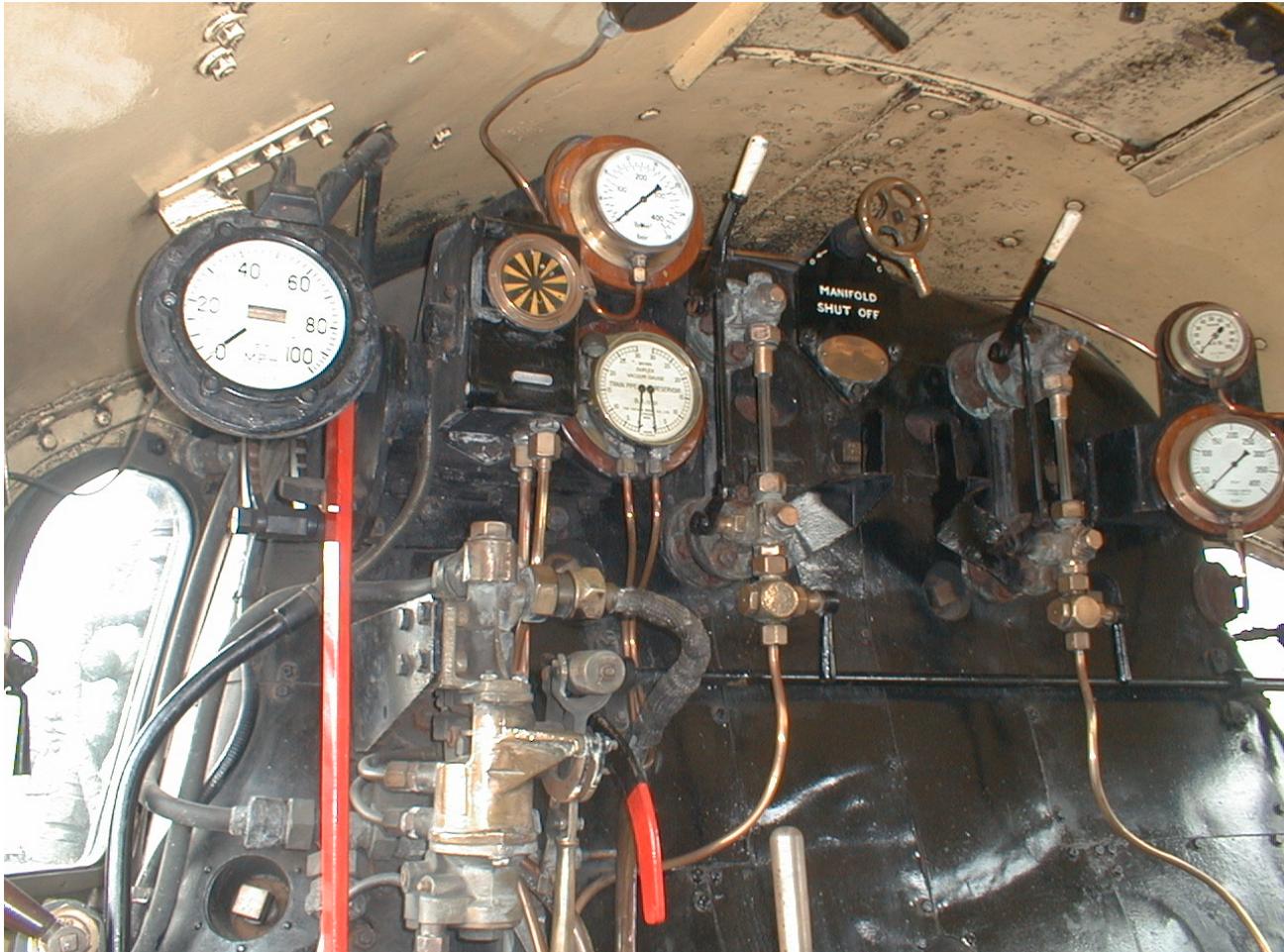
---

V2019A

PROF. R. P. MARQUES

# Transmissão

Considere os instrumentos desta imagem (é de uma locomotiva antiga)



# Transmissão

---

Há apenas indicadores e atuadores manuais.

Nenhum dos instrumentos se presta para automação e controle.

O que está faltando?

É necessário algum tipo de controlador.

É necessário enviar informações dos sensores ao controlador.

Essas informações devem estar em alguma forma que o controlador seja capaz de receber e manipular.

Faz todo sentido que essa forma seja padronizada.

O controlador deve receber e manipular as informações.

Isso é mais fácil se a manipulação for compatível com a forma em que a informação é recebida.

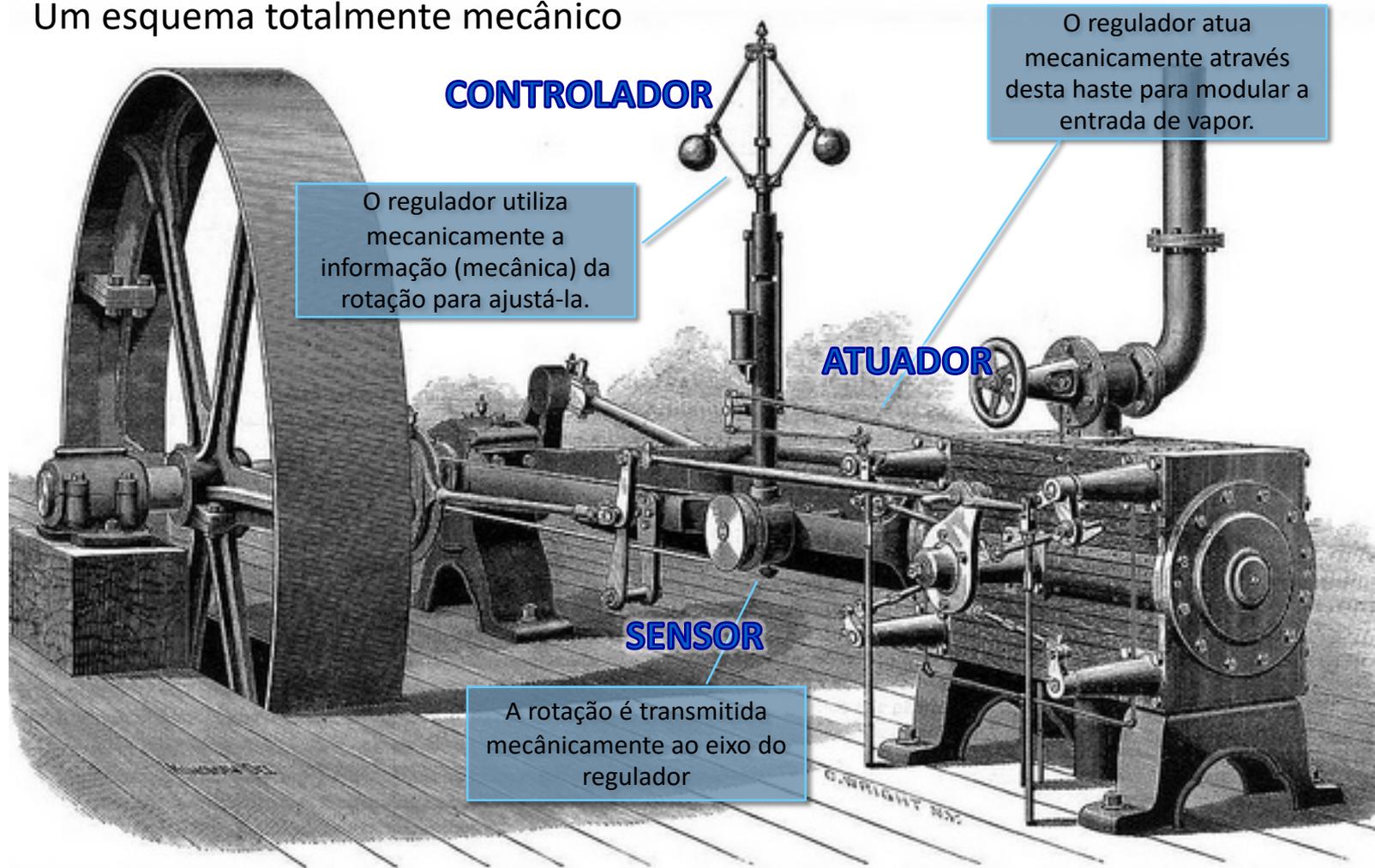
O controlador deve então comandar os atuadores.

Esses comandos devem estar em alguma forma que o atuador seja capaz de receber e utilizar.

Faz todo sentido que essa forma seja padronizada e que seja a mesma utilizada pelos sensores.

# Transmissão

Um esquema totalmente mecânico



# Transmissão

---

O esquema é efetivo.

Algumas observações:

A tecnologia utilizada (transmissão e manipulação mecânicas) é o que poderia ser produzido na época.

Na verdade, como fazer a transmissão é puramente uma questão tecnológica (os antigos engenheiros não pensavam assim – eles queriam apenas resolver o problema).

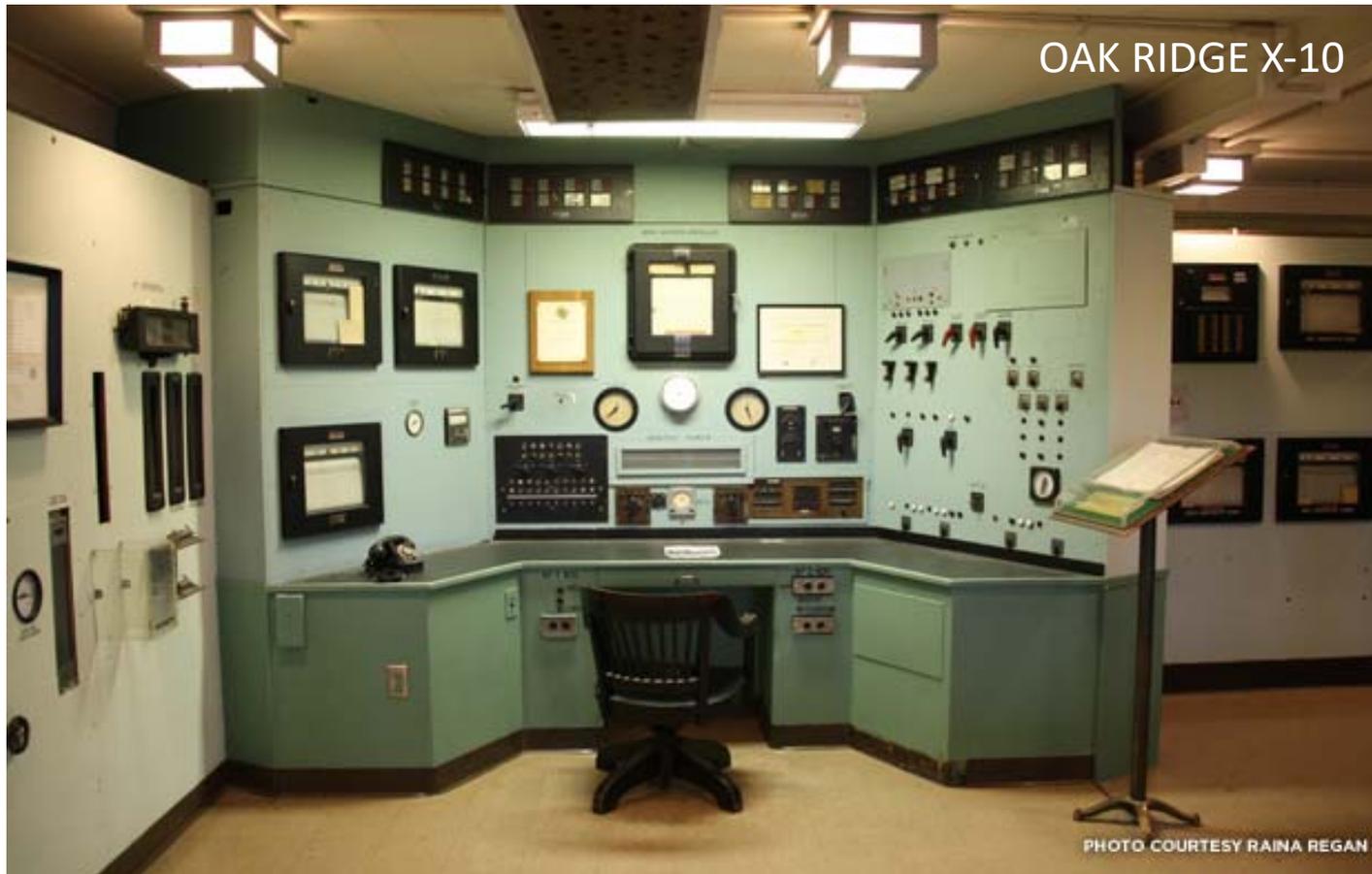
A solução não é flexível nem geral. O sistema deve ser projetado e construído junto com a máquina a vapor e não pode ser reaproveitado numa máquina diferente.

De fato, seria desejável um esquema flexível, geral e padronizado (isso poderia virar um negócio).

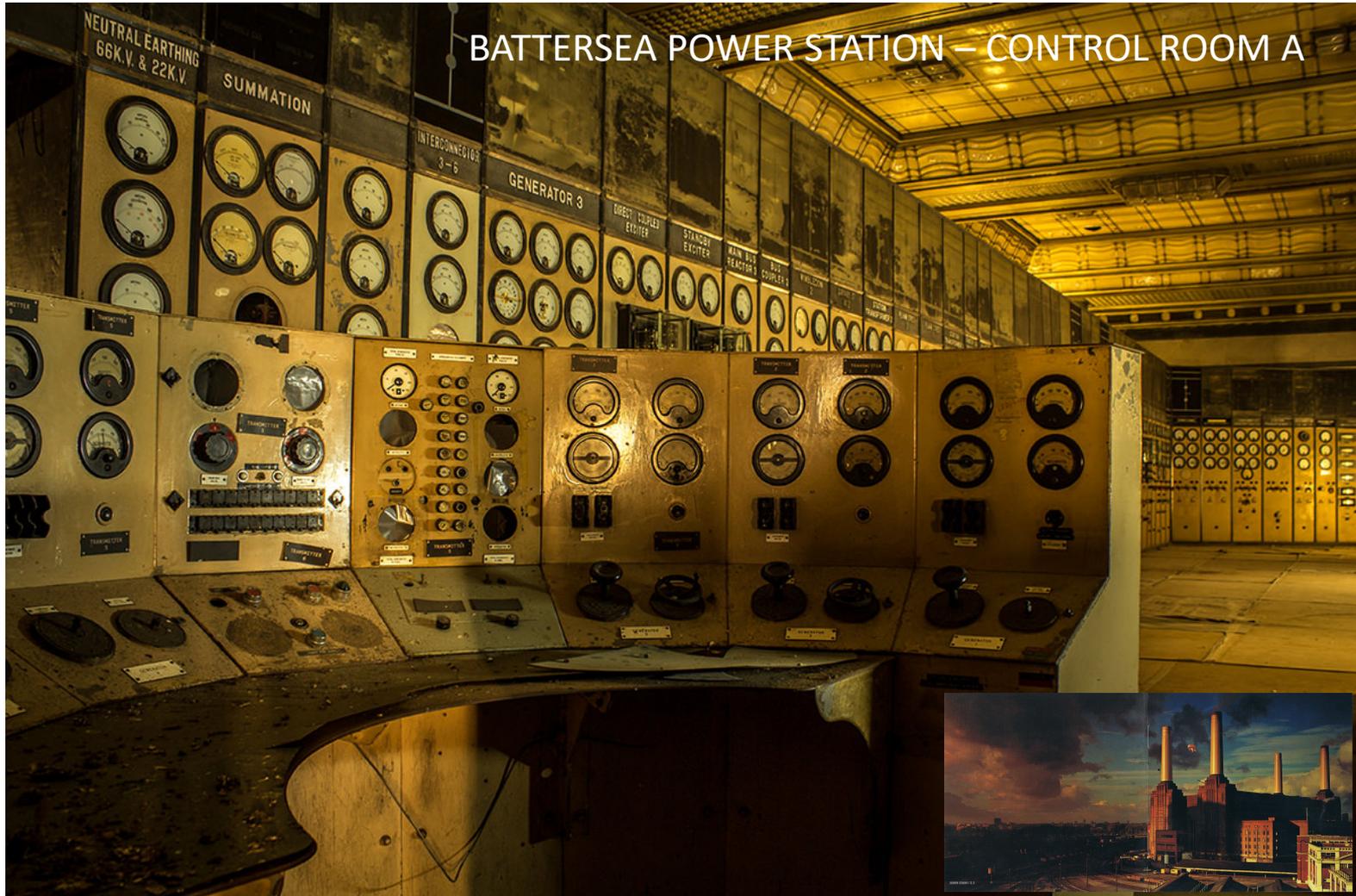
# Transmissão

---

Um benefício extra: foi possível afastar os instrumentos do processo e concentrá-los num único local – A Sala de Controle.



# Transmissão



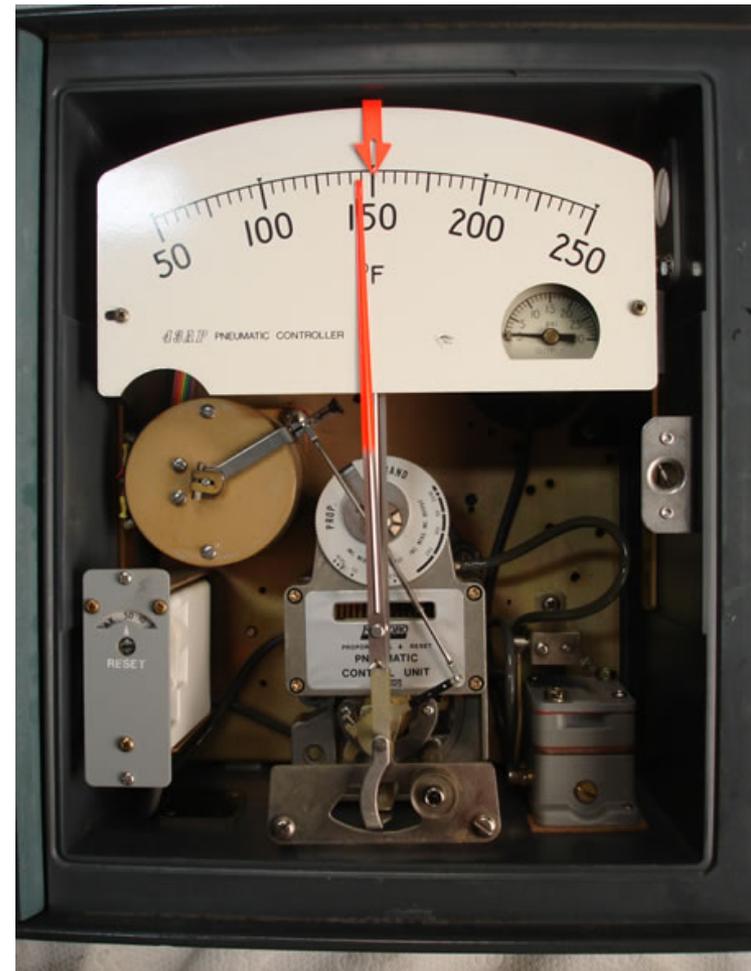
# Transmissão Pneumática

No início do Séc. XX, surgiu a transmissão por ar comprimido, com a informação modulada através da pressão.  
(lembrem-se que é uma época pré-eletrônica)

Ar comprimido permite transmitir informação a longas distâncias através de mangueiras e tubos capilares de calibre relativamente reduzido.

Ar comprimido permite implementar indicadores, atuadores e até mesmo controladores com bastante eficácia.

Alguns instrumentos podem ser movidos a ar comprimido.



# Transmissão Pneumática

---

Nos anos 1920/1930 a indústria acabou convergindo para o seguinte padrão (especialmente nos EUA e Reino Unido):

3psi a 15psi  
(0%) (100%)

Países que usam o sistema métrico adotaram o range de 0,2bar a 1,0bar (que é aproximadamente o mesmo, mas não exatamente igual).

Esse padrão é adotado até hoje.

# Transmissão Pneumática

---

Ainda existem instrumentos pneumáticos por aí?

Até os anos 1970, transmissão pneumática era a principal tecnologia utilizada em instrumentação e controle de processos industriais (tendo sido substituída por eletrônica analógica e depois eletrônica digital).

Algumas fábricas antigas ainda usam instrumentação dessa época em certas malhas (*if it ain't broken, don't fix it!*).

Por outro lado ainda há bons motivos para se utilizar sistemas pneumáticos em certas situações:

- Ambiente explosivo;
- Atmosfera agressiva;
- Temperatura elevada;
- Ambiente sujeito a campos magnéticos ou ruído eletromagnético extremo;
- Aplicações simples que requeiram maior robustez; etc.

# Transmissão Pneumática

---

Por que 15psi?

Pressões elevadas requerem equipamentos mais robustos, mais confiáveis e de maior porte.

Além disso, devido à compressibilidade do ar, a conversão de pressão em deslocamentos mecânicos (em flaps, foles, tubos de Bourdon, etc.) perde marcadamente o caráter linear em altas pressões.

Por outro lado, pressões baixas contêm pouca energia para produzir deslocamentos mecânicos, força ou torque.

Além disso, comportamentos indesejados relacionados a atrito, histerese, etc. são mais pronunciados nessa situação.

15psi é um bom compromisso para esses fatores.

# Transmissão Pneumática

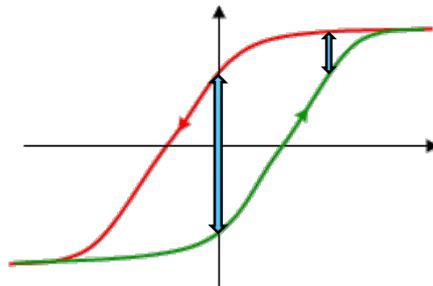
---

Por que 3psi? Por que não 0psi?

Se o limite inferior do range for 0psi, não é possível diferenciar a ocorrência de perda de pressão por falha de um valor válido da variável de processo.

(alguns instrumentos inclusive produzem alarmes nesse caso)

Além disso, os sistemas mecânicos usualmente não se comportam bem em baixas pressões (como visto anteriormente). Histerese é particularmente um problema nessa situação e operações que requerem diferença de pressão (como alívios e descarregamentos) ficam prejudicadas em pressões muito baixas.



# Transmissão Pneumática

---

Exemplo:

O range de um sensor de temperatura é 0°C – 500°C transmitida pneumáticamente no range de 3psi – 15psi.

0°C → 3psi

500°C → 15psi

100°C → 5,4psi

250°C → 9psi

10psi → 291,7°C

12psi → 375°C

# Transmissão Pneumática

---

Exemplo:

O range de um sensor de nível é 1m – 5m transmitido pneumaticamente no range de 3psi – 15psi.

1m → 3psi

5m → 15psi

3m → 9psi

4m → 12psi

5psi → 1,67m

10psi → 3,33m

# Transmissão Pneumática

---

Exemplo:

O sinal de comando para uma válvula de controle de range 0% – 100% (0% significa válvula fechada e 100% significa válvula aberta) é transmitido pneumaticamente no range de 3psi – 15psi.

0% → 3psi

100% → 15psi

50% → 9psi

75% → 12psi

2psi → (erro)

4psi → 16,7%

# Transmissão Pneumática

---

Exemplo:

Um sensor de temperatura de range  $0^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$  e acurácia 1% do range é ligado a um transmissor pneumático de range 3psi – 15psi de acurácia 0,2psi e a um indicador de range  $0^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$  com acurácia de  $10^{\circ}\text{C}$ .

Qual é a precisão efetiva da indicação?

No pior caso:       $5^{\circ}\text{C}$  de erro no sensor  
                          $0,2\text{psi} = 8,3^{\circ}\text{C}$  de erro no transmissor  
                          $10^{\circ}\text{C}$  de erro no indicador  
  
                         resultando em  $23,3^{\circ}\text{C}$  (4,7% do range)

OBS. Esta é uma medida muito conservadora da precisão, pois a probabilidade de erros aleatórios se somarem no pior caso é bastante reduzida (melhor seria usar alguma técnica estatística).

# Transmissão Elétrica

---

A evolução seguinte foi utilizar transmissão elétrica (analógica) para alimentar e conectar instrumentos baseados em tecnologia eletro-eletrônica

O padrão para o qual a indústria convergiu foi o uso de laços de corrente na faixa de

4mA a 20mA  
(0%) (100%)

Este padrão foi se tornando preponderante a partir do final dos anos 1970 e início dos anos 1980. Ainda é o padrão mais utilizado em instrumentação e deverá continuar relevante por vários anos ainda.

Eventualmente será substituído por comunicação digital e redes de processo.

# Transmissão Elétrica

---

## TENSÃO x CORRENTE

Pode-se utilizar tensão ao invés de corrente para transmissão elétrica, porém há bons motivos para se utilizar corrente.

Diversos equipamentos utilizam transmissão via tensão em diversos ranges típicos, por exemplo:

0V a 5V

-5V a +5V

0V a 10V

-10V a 10V

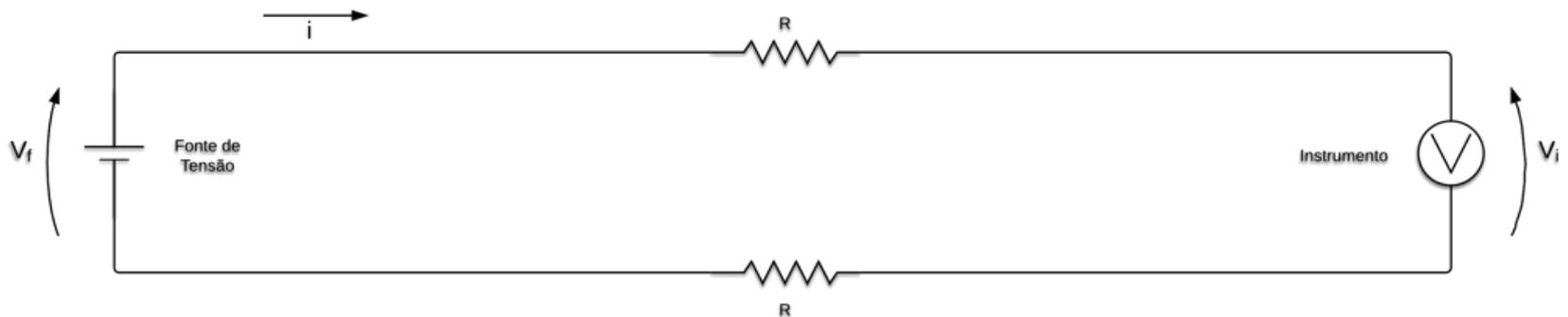
1V a 5V

OBS. Uma corrente na faixa de 4mA – 20mA passando por uma carga de 250Ω gera uma tensão na carga na faixa de 1V – 5V.

# Transmissão Elétrica

Desvantagens do uso de tensão

1. Perda de tensão em longas distâncias



Note que  $V_i = V_f - 2Ri$

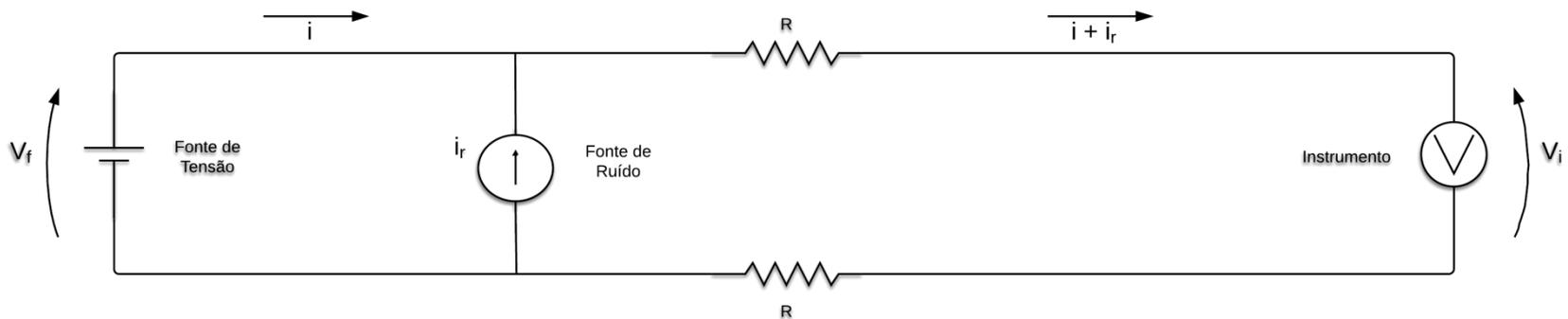
Caso tivéssemos uma fonte de corrente, a corrente  $i$  se preservaria ao longo do laço (a tensão na fonte se adaptaria para produzir a corrente desejada independentemente da impedância da carga).

Para minimizar esse problema, teríamos que utilizar correntes muito baixas (para isso a impedância do instrumento deveria ser muito alta).

# Transmissão Elétrica

## Desvantagens do uso de tensão

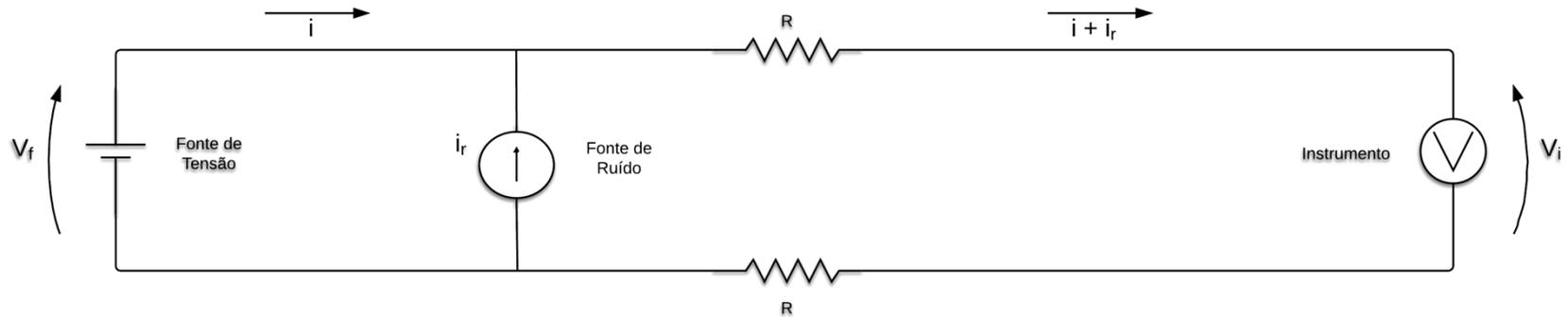
### 2. Sensibilidade a ruídos



Sejam as seguintes premissas:

- O ruído se comporta como se fosse uma fonte de corrente. Essa é uma premissa típica para ruídos de caráter indutivo (comuns em ambiente industrial e causados por chaveamentos, operação de motores, etc.).
- A corrente  $i$  é pequena, isto é, a impedância do instrumento é elevada. Essa também é uma premissa típica: reduz a perda de tensão e é uma característica comum a conversores A/D.

# Transmissão Elétrica



Se essas premissas forem válidas, é bem possível que numa aplicação real, a corrente de ruído induzida no circuito ( $i_r$ ) não seja desprezível face a corrente associada ao sinal de tensão ( $i$ ), de modo que o sinal recebido pelo instrumento seria corrompido pelo ruído.

Caso tivéssemos uma fonte de corrente, muito possivelmente teríamos

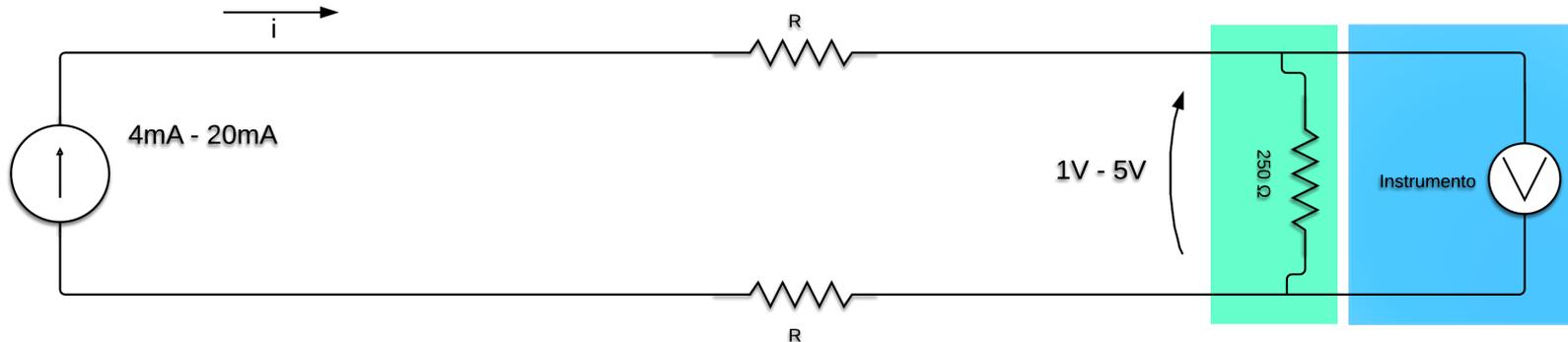
$$i \gg i_r$$

o que minimizaria o problema.

# Transmissão Elétrica

## OBSERVAÇÃO

Um circuito típico, em que o instrumento faz uso de um conversor D/A para receber o sinal transmitido é assim:



O Instrumento tem uma impedância muito alta (tipicamente de  $100\text{k}\Omega$  a  $10\text{M}\Omega$ ), conectado via um shunt de impedância muito mais baixa (um shunt de  $250\Omega$  gera uma tensão de  $1\text{V} - 5\text{V}$  para uma corrente de  $4\text{mA} - 20\text{mA}$ ).

A corrente é muito baixa apenas no painel do instrumento, após o shunt.

# Transmissão Elétrica



Por que 20mA?

Já havia na indústria, desde o início do Século XX, um padrão para máquinas de teletipo (TTY) que utilizava correntes de 20mA, que era um bom valor para o contexto tecnológico dos dispositivos da época.

O mesmo argumento dos dispositivos pneumáticos vale aqui:

correntes muito altas acrescentariam dificuldades de implementação, ao passo que correntes muito baixas deixariam o padrão sujeito a comportamentos espúrios e sensível a ruído.



# Transmissão Elétrica

---

Por que 4mA? Por que não 0mA?

Um valor mínimo de 0mA não permitiria diferenciar um circuito aberto de uma variável de processo no limite inferior do range.

Correntes baixas deixariam os dispositivos sujeitos a comportamentos espúrios e a comunicação sensível a ruído para valores da variável de processo próximos ao limite inferior do range.

Instrumentos podem ser alimentados com a corrente mínima de 4mA, dispensando alimentação adicional (esses instrumentos são referidos como a “dois fios”).

O range de 4mA – 20mA é consistente com o range de 3psi – 15psi.

0mA	4mA	20mA
0psi	3psi	15psi
(-25%)	(0%)	(100%)
(0%)	(20%)	(100%)

# Transmissão Elétrica

---

Exemplo:

O range de um sensor de temperatura é  $0^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$  transmitida eletricamente no range de  $4\text{mA} - 20\text{mA}$ .

$0^{\circ}\text{C} \rightarrow 4\text{mA}$

$500^{\circ}\text{C} \rightarrow 20\text{mA}$

$100^{\circ}\text{C} \rightarrow 7,2\text{mA}$

$250^{\circ}\text{C} \rightarrow 12\text{mA}$

$10\text{mA} \rightarrow 187,5^{\circ}\text{C}$

$15\text{mA} \rightarrow 343,8^{\circ}\text{C}$

# Transmissão Elétrica

---

Exemplo:

O range de um sensor de nível é 1m – 5m transmitido eletricamente no range de 4mA – 20mA.

1m → 4mA

5m → 20mA

3m → 12mA

4m → 16mA

5mA → 1,25m

10mA → 2,5m

# Transmissão Elétrica

---

Exemplo:

O sinal de comando para uma válvula de controle de range 0% – 100% (0% significa válvula fechada e 100% significa válvula aberta) é transmitido eletricamente no range de 4mA – 20mA.

0% → 4mA

100% → 20mA

50% → 12mA

75% → 16mA

3mA → (erro)

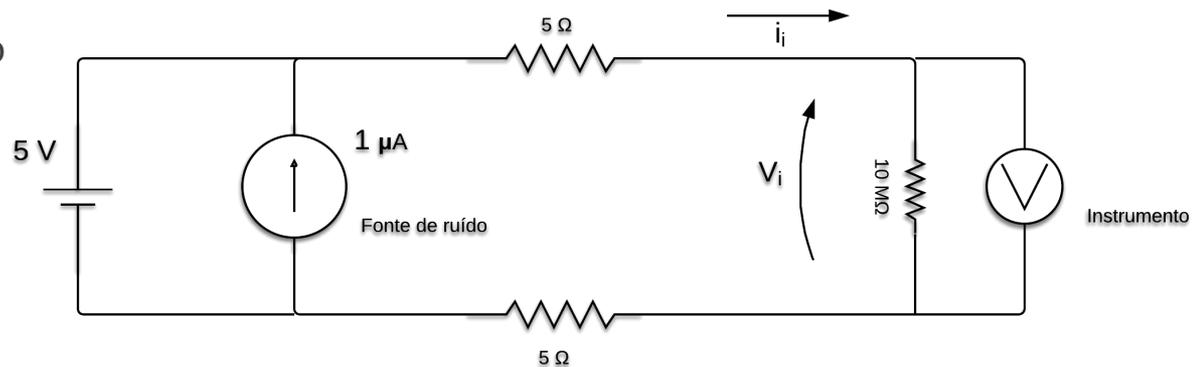
5mA → 6,25%

# Transmissão Elétrica

Exemplo:

Considere um transmissor a tensão (range 1V – 5V) sujeito a ruído (corrente induzida de  $1\mu\text{A}$  rms) transmitindo um sinal de 5V.

Considere que o instrumento é um sensor com impedância de entrada  $10\text{M}\Omega$ .



- Qual deve ser a corrente  $i_i$  no instrumento na ausência de ruído?
- Qual deve ser a tensão percebida pelo instrumento na ausência do sinal?
- Qual deve ser a imprecisão na medida causada pelo ruído?

# Transmissão Elétrica

---

- a. Qual deve ser a corrente  $i_i$  no instrumento na ausência de ruído?

Vamos supor que a impedância do instrumento é infinita.

Com isso a corrente no circuito é dada por:

$$5 = 5 \cdot i_i + 5 \cdot i_i + 10 \cdot 10^6 \cdot i_i = 10000010 \cdot i_i \Rightarrow i_i \cong 0,5 \mu\text{A}$$

Note que para correntes muito pequenas (relacionadas à impedância elevada do instrumento), a perda de tensão nos fios é desprezível.

# Transmissão Elétrica

---

- b. Qual deve ser a tensão percebida pelo instrumento na ausência do sinal?

Vamos supor que a fonte de tensão está desligada.

Com isso a corrente no circuito é de  $1\mu\text{A}$  rms e a tensão no instrumento é dada por

$$V_i = 10 \cdot 10^6 \cdot i_i = 10 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \Rightarrow V_i = 10\text{V rms}$$

Note que a resistência dos condutores não afeta a corrente no instrumento (como era de se esperar quando a corrente é imposta ao circuito)

# Transmissão Elétrica

---

a. Qual deve ser a imprecisão na medida causada pelo ruído?

Por superposição temos:

- A fonte de tensão 5V gera uma tensão de aproximadamente 5V no instrumento (a queda de tensão nos condutores é desprezível).
- A fonte de ruído gera uma tensão induzida de 10V rms no instrumento.

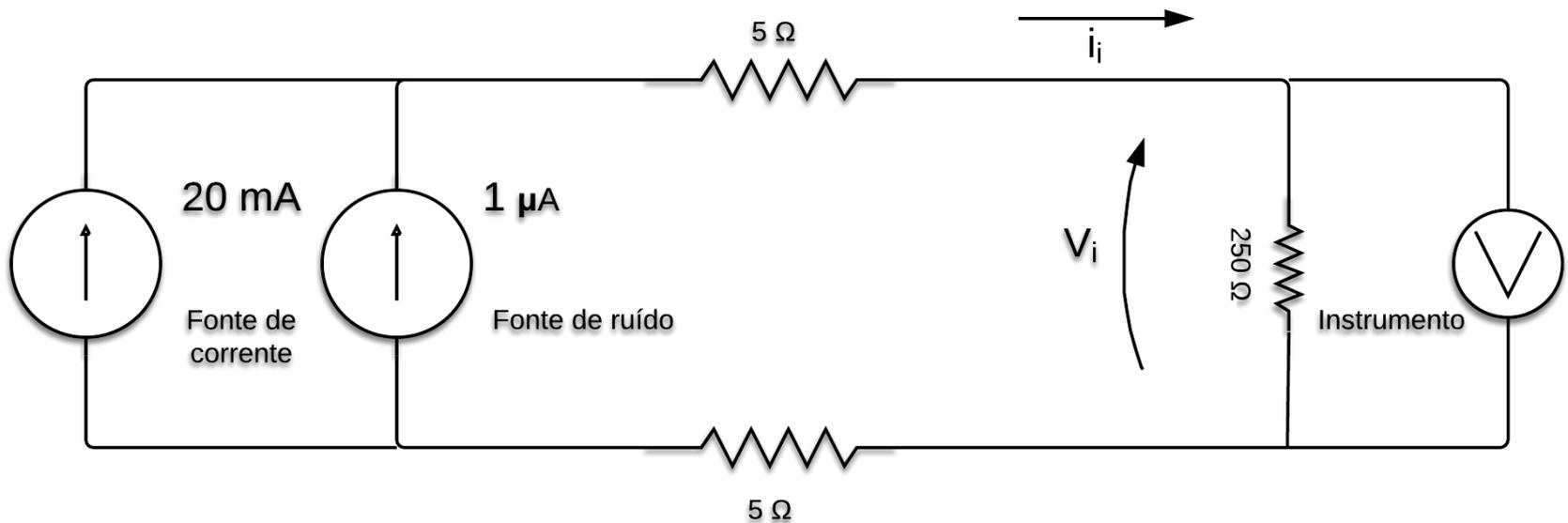
Com isso temos uma imprecisão de 200% (!?) do range.

OBS: Os parâmetros (fonte de ruído, impedância do instrumento) foram um tanto exagerados para destacar a influência do ruído. Além disso instrumentos tipicamente usam um shunt de resistência mais baixa para minimizar esse efeito.

# Transmissão Elétrica

Exemplo:

Supondo agora um sinal de corrente, qual deve ser a imprecisão na medida causada pelo ruído?



# Transmissão Elétrica

---

Por superposição:

- O sinal de corrente de 20mA gera uma tensão no instrumento de 5V (note o shunt de  $250\Omega$ ).
- O sinal de ruído de  $1\mu\text{A rms}$  gera uma tensão de 0,25mV rms no instrumento.

Com isso a imprecisão na medida (medida no conversor D/A do instrumento) causada pelo ruído é da ordem de 0,5% da medida.

Mesmo no caso em que o sinal assume o valor mínimo de 4mA, a imprecisão ainda é da ordem de 2,5% da medida.

OBS. A tensão na fonte de corrente é de 5,2V (devido à queda de tensão nos condutores).

# Transmissão Elétrica

---

## OS PRÓXIMOS PASSOS

Uma limitação evidente das malhas analógicas (seja tensão, corrente ou pressão) é que cada malha é capaz apenas de transmitir unilateralmente um único sinal.

Além disso estão sujeitas a ruídos e interferências e não possuem recursos de diagnóstico ou permitem configurar equipamentos

Protocolos digitais de comunicação e redes de processo são uma resposta a essas questões.