

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – UFV
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS – CCE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - DEL

Medidas Elétricas e Magnéticas

ELT210

AULA 10 – Equipamentos de Medição Digital

Prof. Tarcísio Pizziolo

Considerações Iniciais

- A leitura digital é **direta** e **precisa**;
- Não necessita de **interpolação**;
- Instrumentos digitais podem ser facilmente **acoplados entre si e também a computadores**;
- Instrumentos digitais são "**resistentes a ruídos**" (pois não são "dependentes da amplitude" como os sinais analógicos); operam em baixas tensões (de 5 a 10 volts).
- A unidade básica do **modo digital** é o **bit (Binary digit)**.
- O **bit** pode assumir valores **0** (desligado) ou **1** (ligado);
8 bits = 1 byte; 1 Kbyte = 1024 bits
- A palavra digital é feita de bits;
por exemplo, uma palavra de 8 bits.

1. Sistemas de Numeração Decimal e Binário

Um sistema de numeração, (ou sistema numeral) é um sistema em que um conjunto de números são representados por numerais de uma forma consistente.

Sistema Decimal

O sistema decimal é um sistema de numeração que utiliza a **base dez**.

Símbolos da base Decimal: **0 1 2 3 4 5 6 7 8 9**

Sistema Binário

O sistema binário ou **base 2**, é um sistema de numeração que todas as quantidades se representam com base em dois números.

Símbolos da base Binária: **0 1**

1.1 DECOMPOSIÇÃO DE SISTEMAS

Decomposição de **número decimal inteiro**:

$$594_{(10)} = 5 \times 10^2 + 9 \times 10^1 + 4 \times 10^0$$

Decomposição de **número decimal fracionário**:

$$10,5_{(10)} = 1 \times 10^1 + 0 \times 10^0 + 5 \times 10^{-1}$$

Decomposição de **número binário inteiro**:

$$1010_{(2)} = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 = 10_{(10)}$$

Decomposição de **número binário fracionário**:

$$101,101_{(2)} = 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} = 5,625_{(10)}$$

1.2 OPERAÇÕES ARITMÉTICAS NO SISTEMA BINÁRIO

Adição

$0 + 0 = 0$; $0 + 1 = 1$; $1 + 0 = 1$; $1 + 1 = 0$ e “**vai 1**”

Exemplo:
$$\begin{array}{r} 110 \\ + 111 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} + 111 \\ \hline 1101 \end{array}$$

Subtração

$0 - 0 = 0$; $1 - 1 = 0$; $1 - 0 = 1$; $0 - 1 = 1$ e “**empresta 1**”

Exemplo:
$$\begin{array}{r} 1110 \\ - 1001 \\ \hline \end{array}$$

$$\begin{array}{r} - 1001 \\ \hline 101 \end{array}$$

Multiplicação

$0 \times 0 = 0$; $0 \times 1 = 0$; $1 \times 0 = 0$; $1 \times 1 = 1$

Exemplo:

$$\begin{array}{r} 11010 \\ \times 11 \\ \hline 11010 \\ + 11010 \\ \hline 1001110 \end{array}$$

Divisão

$0 / 1 = 0$; $1 / 1 = 1$; Exercício: $110110 \angle 110$

Conversão Decimal para Binário

1 - Divide-se o número N_{10} (base 10) por 2;

Se N_{10} for par o resto será **0**;

Se N_{10} for ímpar o resto será **1**;

2 - Divide-se o quociente da primeira divisão por 2 novamente;

Se N_{10} for par o resto será **0**;

Se N_{10} for ímpar o resto será **1**;

3 - Repete-se sucessivamente a divisão de N_{10} por 2 até encontrar o quociente 0 (**zero**).

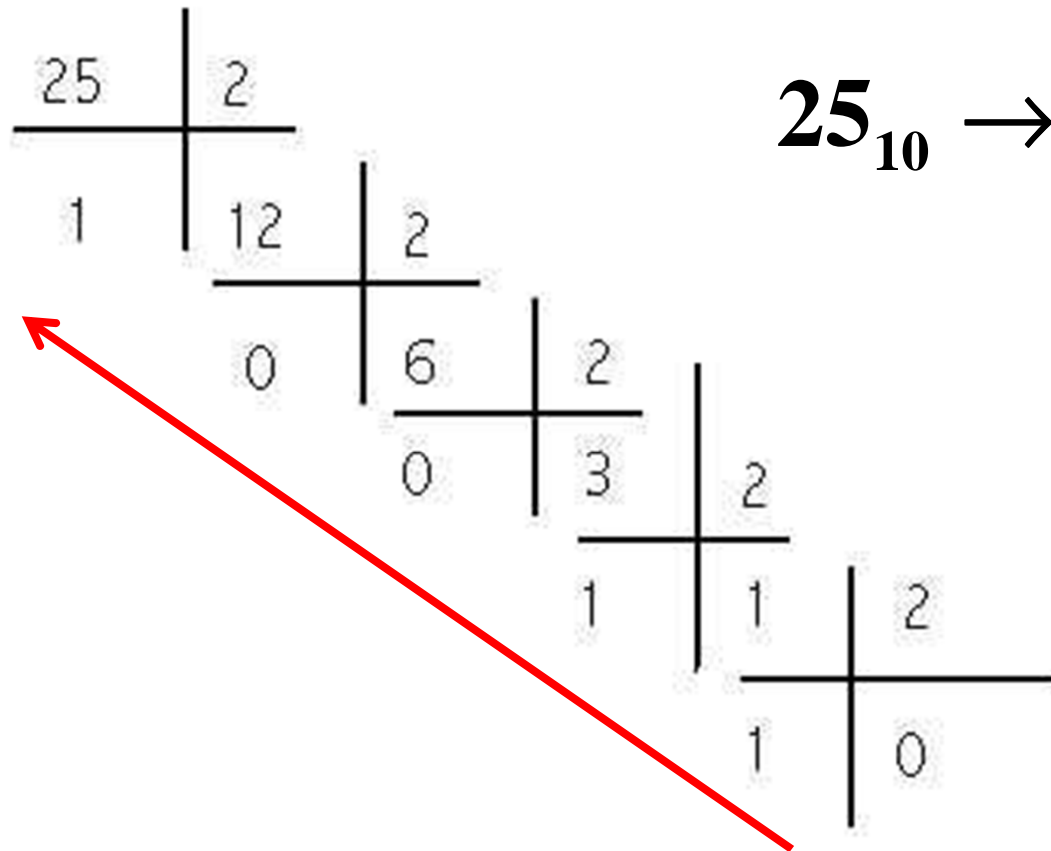
5 - O número N_2 (base 2) equivalente a N_{10} (base 10) será o conjunto de números 1 e 0 (**bits**) dos restos das divisões sucessivas entre N_{10} (base 10) e N_2 (base 2) **no sentido da última divisão para a primeira**.

Conversão Decimal para Binário

Exemplo: Converter $N_{10} = 25$ (base decimal) para N_2 (base binária).

$$25_{10} \rightarrow 25_2 = ?$$

$$25_{10} \rightarrow 25_2 = 11001$$



Conversão Binário para Decimal

- 1 – Multiplica-se cada **bit** (**0** ou **1**) de N_2 (base 2) na sequência da direita (**último bit**) para a esquerda (**primeiro bit**) pela potência de **base 2** elevada ao número correspondente à localização do bit em N_2 .
- 2 – A localização do **bit** em N_2 é dada pela posição do mesmo contando da **direita para a esquerda** a partir da posição 0 (**zero**).
- 3 - O número N_{10} (base 10) equivalente a N_2 (base 2) será a soma das parcelas das multiplicações efetuadas no item 1.

Conversor Binário / Decimal

Exemplo: Converter $N_2 = 1101$ (base binária) para N_{10} (base decimal)

$1 \ 1 \ 0 \ 1_2 \rightarrow B_{10}$

1	$\times 2^0 = 1 \times 1 = 1$
0	$\times 2^1 = 0 \times 2 = 0$
1	$\times 2^2 = 1 \times 4 = 4$
1	$\times 2^3 = 1 \times 8 = 8$
<hr/>	
	13_{10}

Conversor A/D

Conversor **A/D** é a base de toda a **interface** eletrônica entre o sistema analógico e o sistema digital.

Está presente nos instrumentos de **medição digital** e é responsável pelo aumento significativo nos níveis de precisão e exatidão assim como na diminuição do custo e popularização de instrumentos de medida digitais.

Características importantes do conversor A/D:

1) **Faixa dinâmica:** é a faixa de amplitude de operação do sinal analógico (**em geral uma tensão**) dentro da região de trabalho (**linear**) do conversor. O sinal de entrada deve ser condicionado de forma a possibilitar sua máxima utilização dentro dessa faixa dinâmica.

Os conversores A/D apresentam na prática uma faixa dinâmica de **0,1 a 10V**.

Características importantes do conversor A/D:

2) **Resolução:** é a menor quantidade que pode ser convertida (**resolvida**) dentro da faixa dinâmica do sinal de entrada. É especificada pelo número de bits do conversor. São encontrados na prática conversores com resoluções de 8 a 20 bits.

$$R_{\text{resolução}} = \frac{1}{(2^N - 1)} \times (\text{Variável medida})$$

Onde **N** = número de bits.

Características importantes do conversor A/D:

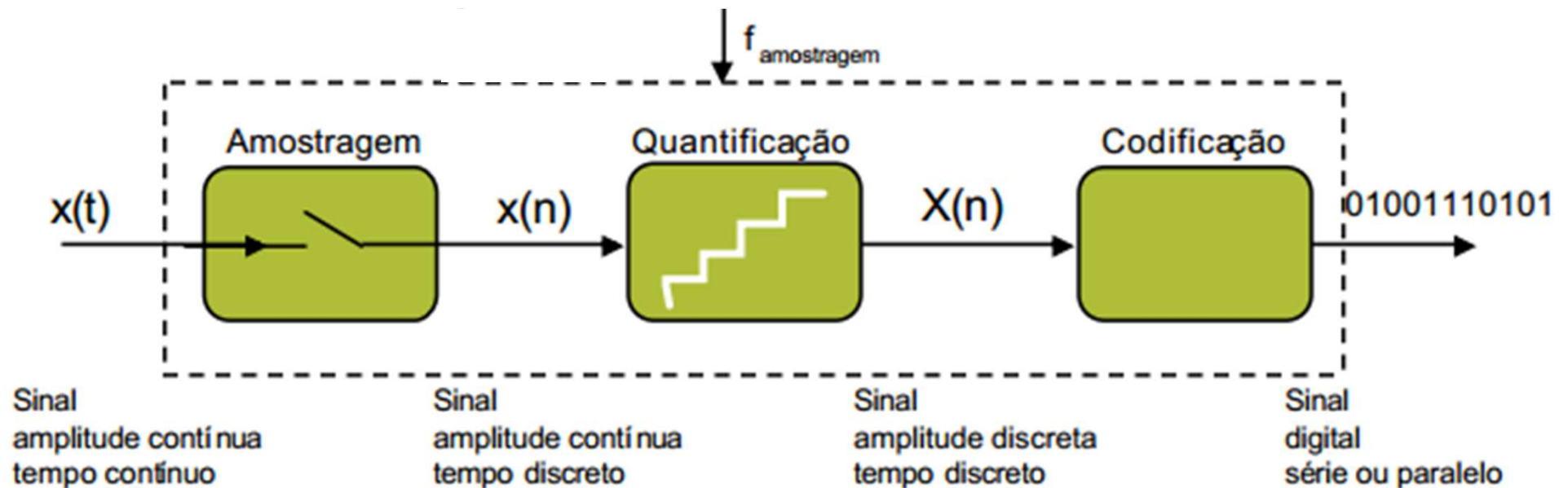
3) **Tempo de conversão:** é o tempo necessário para se obter o valor na saída a partir do momento em que o sinal de entrada foi aplicado e iniciado o processo de conversão. Depende da estrutura do circuito utilizado e da sua resolução. De modo geral, quanto maior a resolução, maior o tempo de conversão. Encontram-se, na prática, tempos de conversão variando desde alguns segundos até nanossegundos. Este tempo é importante para definir a máxima frequência possível a ser convertida a partir de um sinal de entrada variante no tempo.

4) **Erro de linearidade:** expressa o desvio do resultado de conversão de uma reta ideal. É expresso em $\pm E\%$ (uma porcentagem) do valor total ou em número de bits.

Ex.: Um erro de linearidade de $\pm 0,4\%$ equivale a uma linearidade de ± 1 bit num conversor de 8 bits.

Conversor A/D

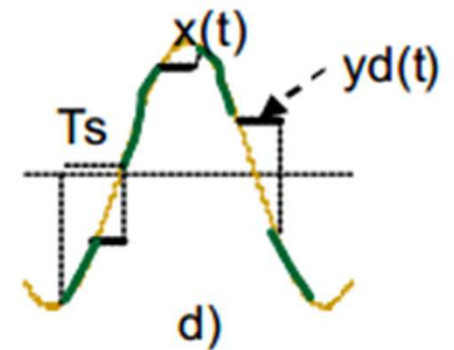
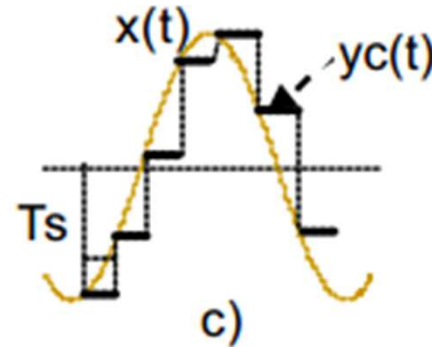
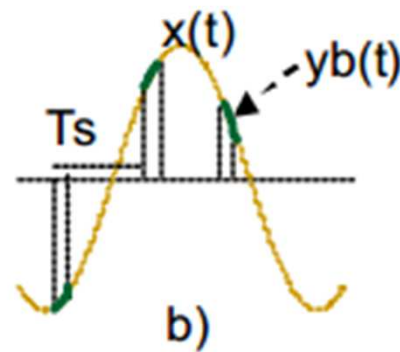
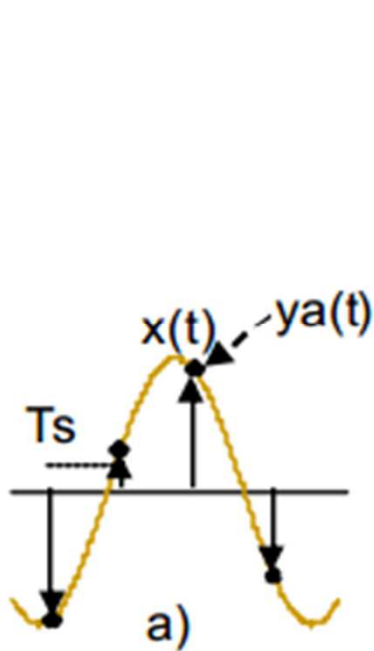
- 1 – **Amostrador**: amostragem do sinal em tempo discreto;
- 2 – **Quantizador**: aproximação do valor amostrado a um dos 2^N níveis possíveis;
- 3 – **Codificação**: conversão do valor amostrado num código específico.



Conversor A/D

Tipos de amostragem:

- a) Amostragem por **trem de impulsos** (na prática **impossível** ou muito difícil);
- b) Amostragem com **trem de pulsos**;
- c) Amostragem com **retenção de ordem zero** (**mais utilizado**);
- d) Track/hold (**amostragem e retenção real**).



O Modo de Operação Digital

No processo de conversão analógico/digital (AD) a **Resolução** de um conversor é dada por:

$$R_{\text{resolução}} = \frac{1}{(2^N - 1)} \times (\text{Variável medida})$$

onde **N** é o número de bits.

Exemplo:

Para um amperímetro quer possui um conversor de **2 bits** efetuando a leitura de **3 mA**, tem-se:

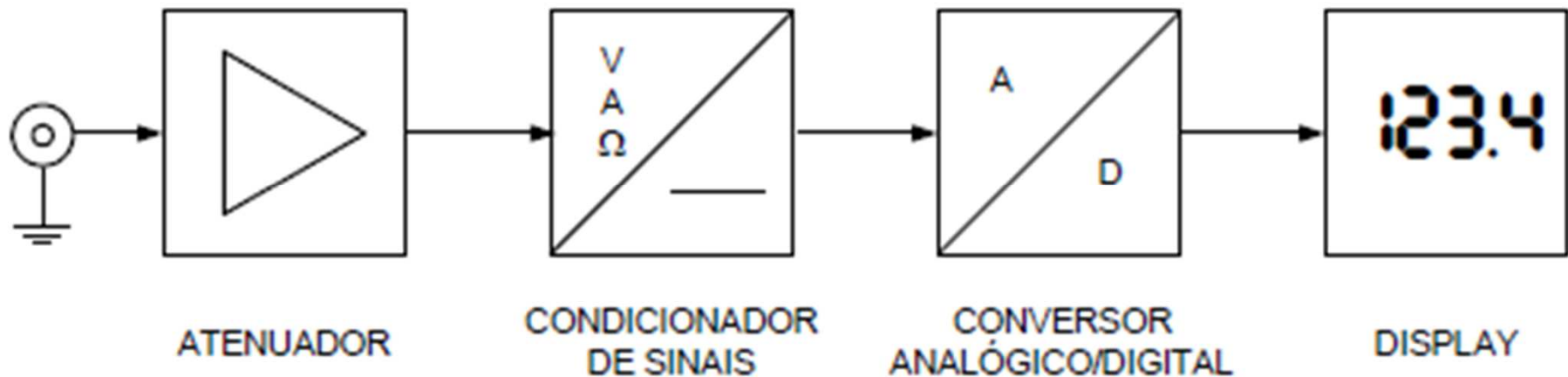
$$R_{\text{resolução}} = \frac{1}{(2^2 - 1)} \times (3 \times 10^{-3}) \Rightarrow R_{\text{resolução}} = 1 \text{ mA}$$

BITS
00
01
10
11

1. Introdução

- Os instrumentos analógicos baseados nos galvanômetros possuem uma certa limitação nas medidas elétricas. Uma pequena intensidade de corrente já produz uma deflexão máxima de seu instrumento, mesmo utilizando artifícios, como inserção de resistores na construção, não são suficientes para que a faixa de operação destes instrumentos sejam adequadas a muitos casos.
- Os instrumentos digitais de medidas elétricas, utilizando amplificadores eletrônicos, aumentaram a impedância de entrada ao sistema de medida, que possibilitaram uma maior sensibilidade as medidas. Além de tensão, corrente ou resistência, uma maior variedade de medidas puderam ser então feitas em um único aparelho, tais como capacitância, indutância, temperatura....

1. Introdução

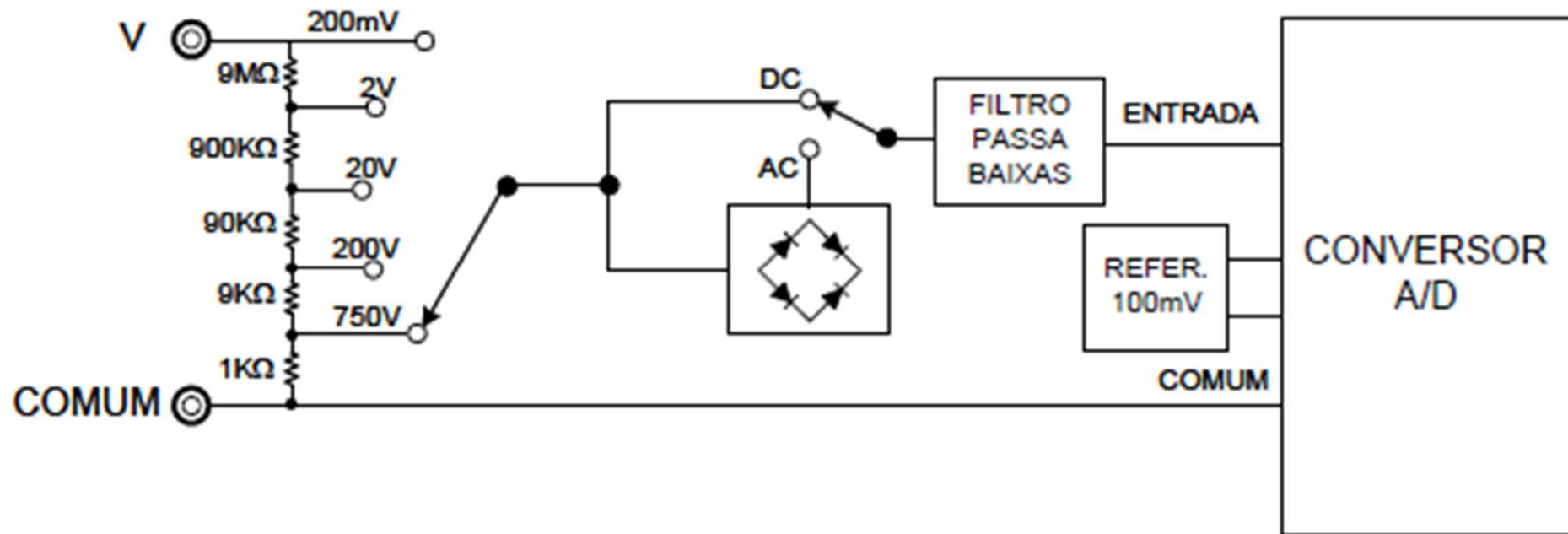


- **Atenuador:** adequa o nível do sinal elétrico a ser medido, geralmente tensão, corrente ou resistência, ao estágio condicionador de sinais;
- **Condicionador de Sinais:** converte as variáveis tensão e corrente alternadas e resistência (e outras) em tensão contínua;
- **Conversor Analógico/Digital (AD):** converte o sinal a ser medido em um número binário, que é formatado para, em seguida, ser mostrado no display;
- **Display:** apresenta a leitura da variável medida.

1. Introdução

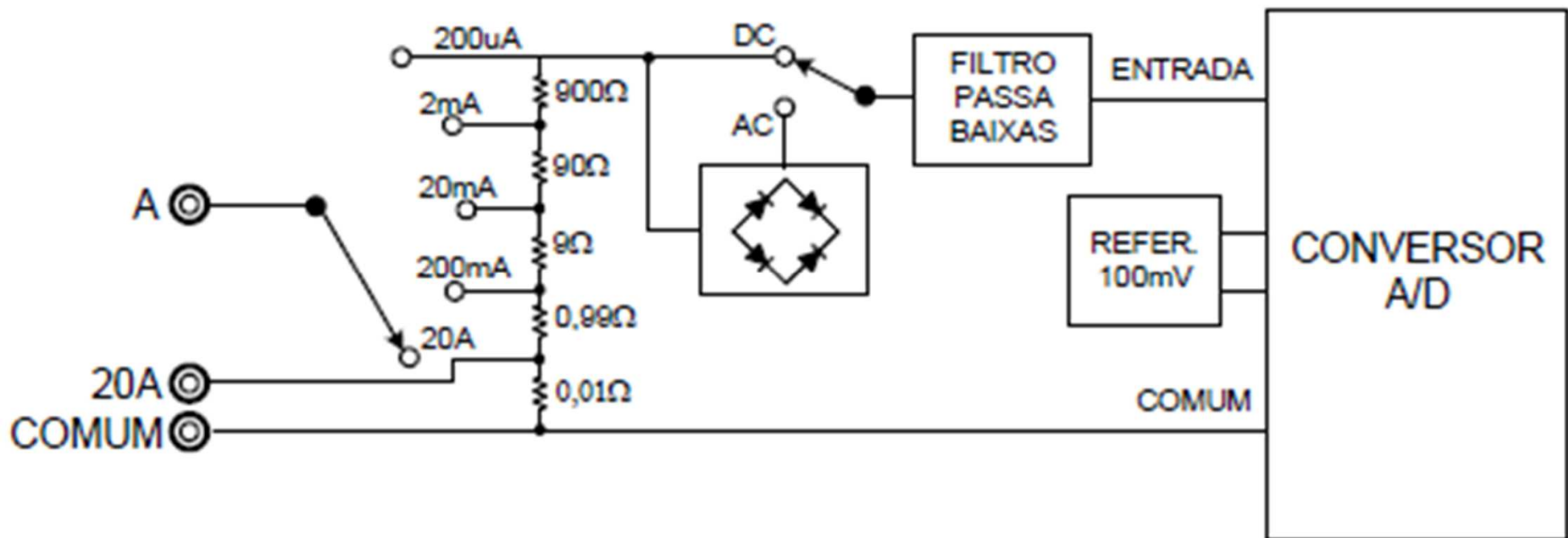


2. Voltímetro



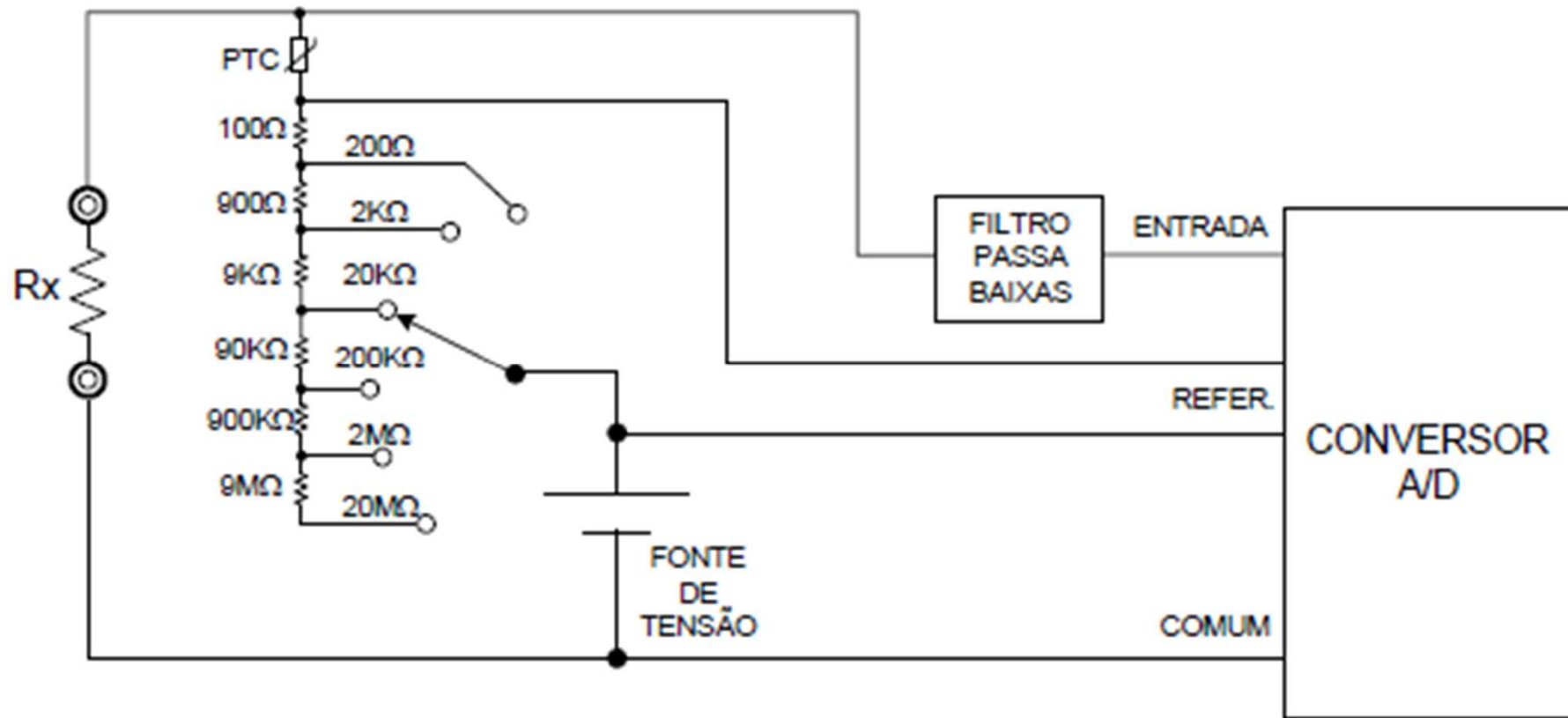
- O sinal a ser medido passa por **divisor de tensão**, de forma a ajustar a uma tensão compatível com conversor A/D. No exemplo, o sinal é ajustado para uma faixa de **0 a 200 mV**.
- A resistência de entrada é fixa, diferente do voltímetro analógico em que para cada calibre a resistência é diferente. Desse modo, não temos mais a relação **Ω/V**. Neste exemplo, a resistência é de **10 MΩ**.
- Se a tensão for alternada, ela passará por uma retificação antes de passar pelo conversor A/D.

3. Amperímetro



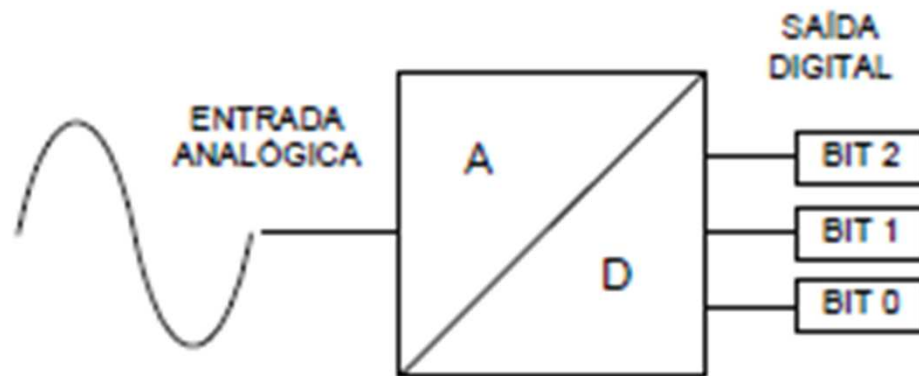
- A resistência de entrada varia para cada calibre selecionado. A resistência para cada calibre é tal que a tensão fique na faixa de **0 a 200 mV**, para o exemplo mostrado.
- Para o calibre de **20 A** é necessário mudar a ponta de prova para um borne específico, visto que a chave seletora não suporta essa intensidade de corrente.

4. Ohmímetro



- Uma fonte interna alimenta o circuito formado pela resistência a ser medida (**R_x**) e a resistência do calibre selecionado. A resistência é determinada pela divisão de tensão, **uma vez que a tensão e a resistência do calibre são conhecidos.**
- Um resistor dependente de tensão (PTC) serve de proteção caso seja aplicada uma tensão alta na entrada.

Exemplo: Seja um conversor de **3 bits**. Qual será a resolução neste conversor para um sinal de entrada de **7 V**.



ANALÓGICO	DIGITAL
0 a 0,499	000
0,5 a 1,499	001
1,5 a 2,499	010
2,5 a 3,499	011
3,5 a 4,499	100
4,5 a 5,499	101
5,5 a 6,499	110
6,5 a 7,0	111

Para **N = 3 bits** tem-se: $2^N = 2^3 = 8$ níveis de combinações.

$$Res = \frac{V_{in}}{2^N - 1} = \frac{7}{2^3 - 1} = 1 \text{ V}$$

Exemplo (Continuação):

Gráfico para o conversor de **3 bits**.

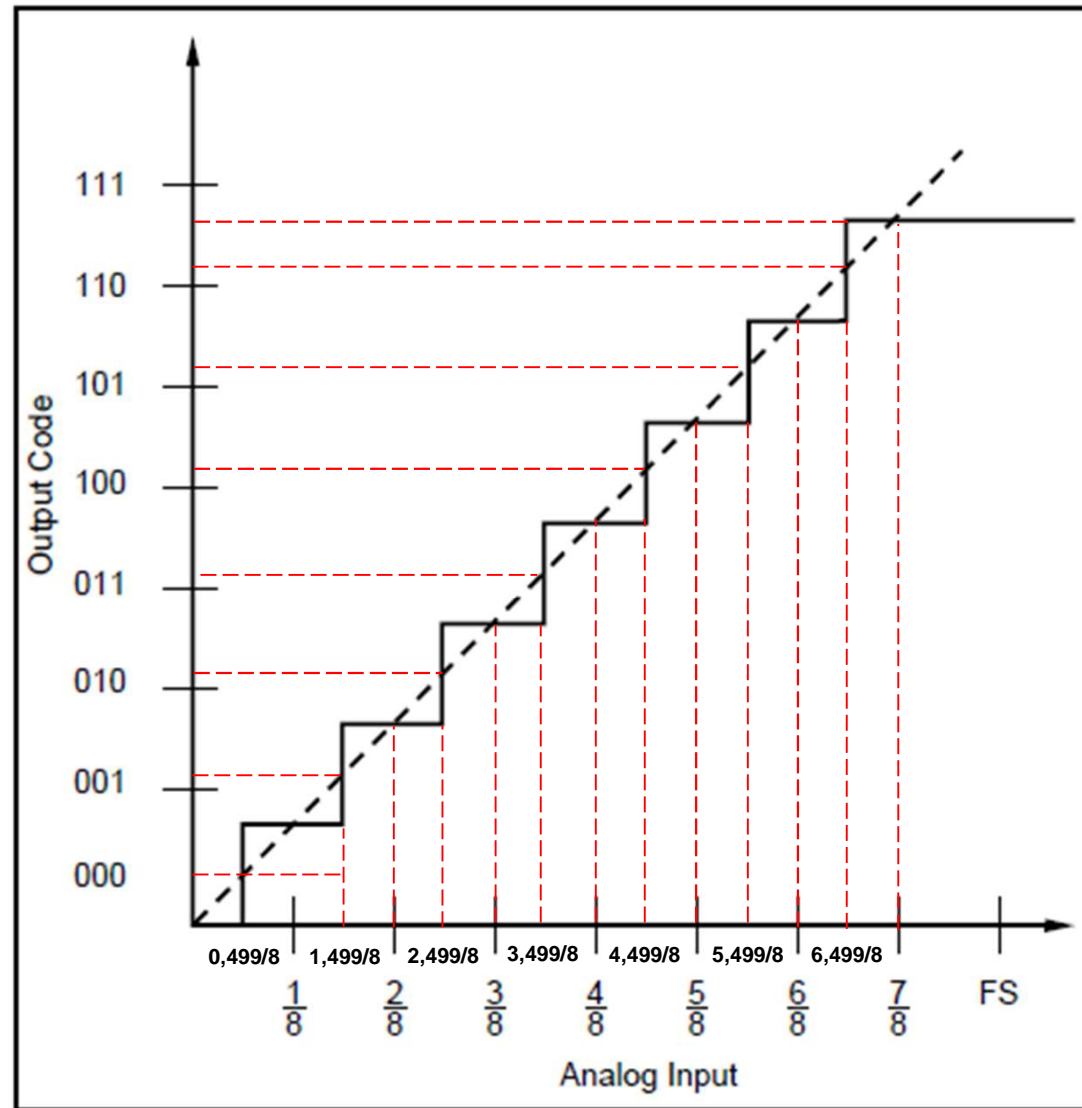


FIGURE 1. Ideal 3-Bit A/D Converter Transfer Function.

5. Erros no Conversor AD

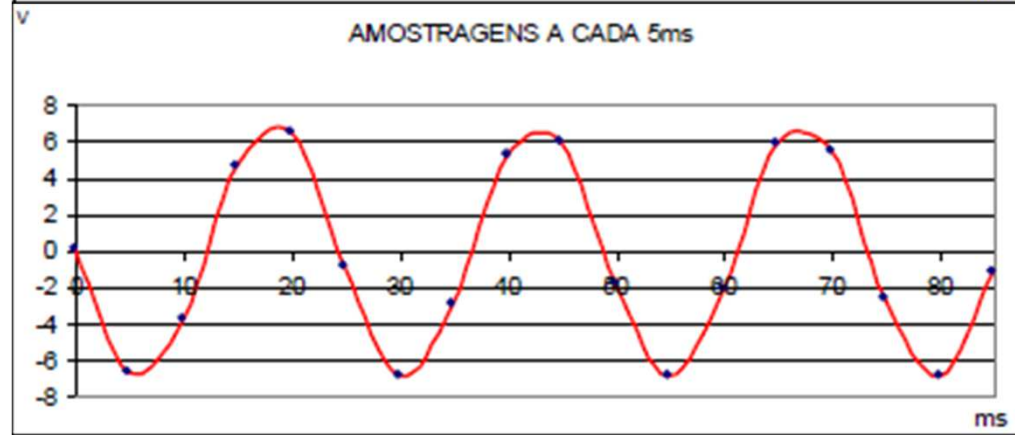
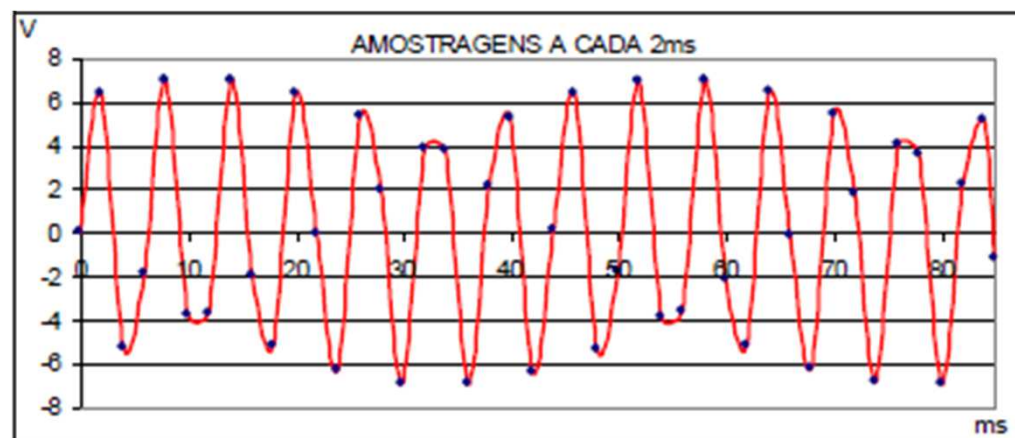
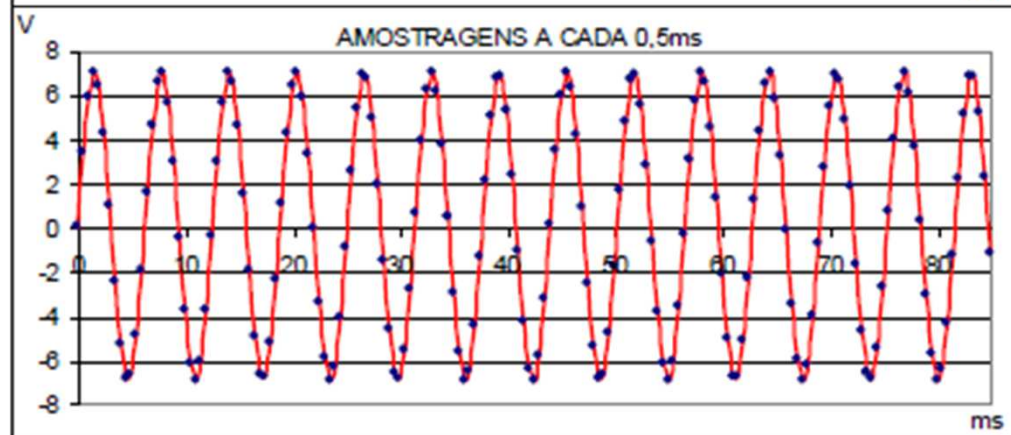
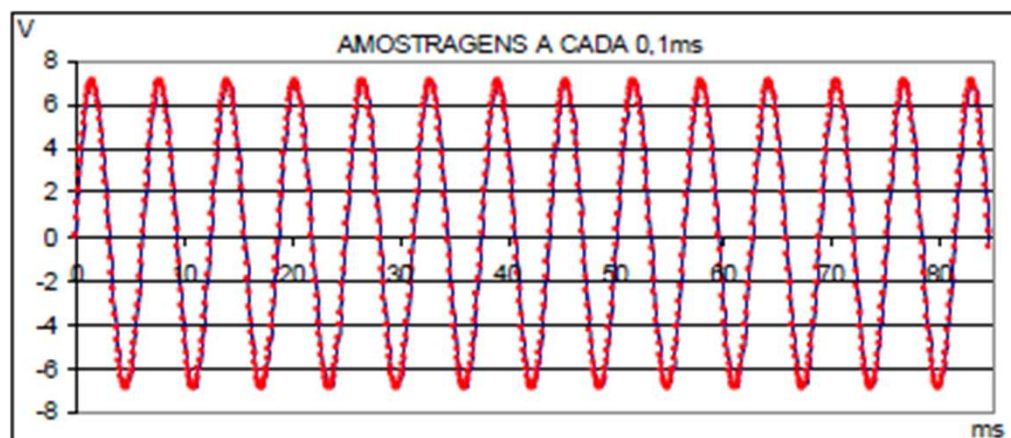
O processo de conversão A/D está sujeito a erros por subamostragem, i. e., amostrar o sinal a uma taxa muito baixa leva a perdas de informação que não podem ser recuperadas.

Teorema de Shannon-Nyquist (ou da Amostragem):

A frequência de amostragem de um sinal analógico dever ser maior que duas vezes a maior frequência do espectro do sinal.

$$f_{\text{amostragem}} > 2 \times f_{\text{espectro}}$$

5.1. Erros na Amostragem



6. Display

É a parte mais evidente do instrumento digital, e onde se efetua a leitura da grandeza medida. O display do instrumento digital pode ser de dois tipos:

LED: semicondutores capazes de emitir luz quando percorridos por corrente elétrica. Esses displays têm fundo escuro, para proporcionar maior destaque ao brilho dos LEDs.

LCD: constituídos por duas lâminas transparentes de material polarizador de luz, com eixos polarizadores alinhados perpendicularmente entre si; entre as lâminas existe uma solução de cristal líquido, cujas moléculas podem se alinhar sob a ação da corrente elétrica, impedindo a passagem da luz.

6.1. LED x LCD

Tipo	Vantagens	Desvantagens
LED	<ul style="list-style-type: none">• pode ser visualizado virtualmente de qualquer ângulo;• proporciona leituras mais fáceis à distância;• via de regra é mais durável que os LCDs;• pode ser usado em ambientes com pouca luz;• seu tempo de resposta varia muito pouco com a temperatura ambiente;• pode ser usados em condições ambientais mais adversas.	<ul style="list-style-type: none">• consumo de energia mais elevado que os LCDs;• difícil leitura sob a luz solar.
LCD	<ul style="list-style-type: none">• permite leituras em ambientes externos, mesmo sob incidência direta de luz solar;• consumo de energia muito baixo.	<ul style="list-style-type: none">• uso em ambientes com pouca luz exige iluminação de fundo (backlit);• tempo de resposta decresce em baixas temperaturas.

7. RESOLUÇÃO

Normalmente são utilizados displays de $(3+1/2)$ dígitos, i. e., são capazes de mostrar três dígitos de 0 a 9 e um que só pode assumir dois valores, zero (ou vazio) ou 1.

O ponto decimal é deslocado conforme calibre selecionado.

Exemplo: O calibre **2 V** terá três casas após o ponto e o maior valor indicado será **1,999 V**. O calibre **20 V** terá duas casas após o ponto e o maior valor indicado será **19,99 V**, e assim por diante.

8. EXATIDÃO

A exatidão dos medidores digitais informa o maior erro possível em determinada condição de medição.

É expressa através de percentual da leitura do instrumento.

Exemplo: Um instrumento digital com **1%** de exatidão está apresentando uma medida de **100 unidades** em seu display, o valor verdadeiro estará na faixa de **99 a 101 unidades**. A especificação da exatidão de alguns instrumentos **inclui o número de contagens que o dígito mais à direita pode variar**. Assim, se um voltímetro tem exatidão de **(1% + 2)** e seu display mede **220 V**, o valor real pode estar entre **217,78 e 222,22 V**.

9. **TRUE RMS**

- Instrumentos digitais convencionais, assim como instrumentos analógicos, são apenas capazes de medir sinais alternados com forma de onda senoidal.
- Entretanto, existe uma classe de instrumentos digitais denominados *True RMS* que são capazes de medir qualquer tipo de onda. O sinal é adequadamente processado de forma que saia sempre o verdadeiro valor eficaz.
- Instrumentos sem *True RMS* podem apresentar erros de medição de até **40%**, principalmente em medições de corrente em que são aplicadas a eles ondas com altas distorções. (Esse tipo de distorção da onda de corrente é muito comum em máquinas elétricas e também em fontes chaveadas e inversores de tensão).

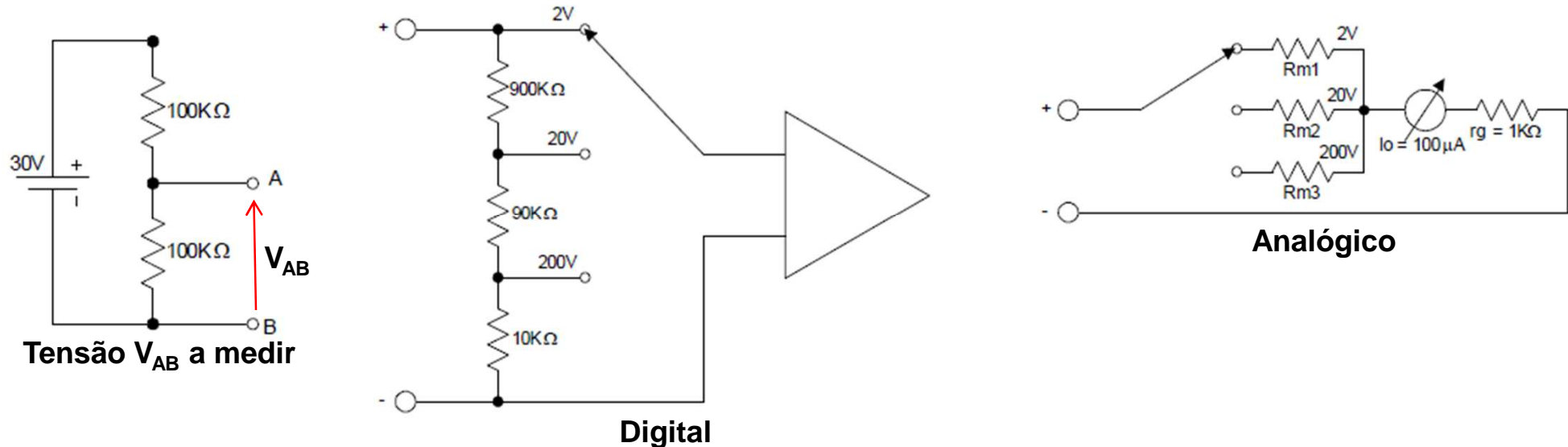
10. Digital x Analógico

Vantagens dos instrumentos digitais em relação aos analógicos:

- Facilidade de leitura, com menor possibilidade de erros do operador;
- Maior resolução;
- maior exatidão;
- Indicação da polaridade do sinal;
- Capacidade de agregar novas funções;
- Capacidade de comunicação com dispositivos externos...

11. Aplicações

Seja a tensão V_{AB} a ser medida e os instrumentos abaixo:



Determinar:

- 1) os valores dos resistores multiplicadores (R_{m1} , R_{m2} e R_{m3}) do instrumento analógico;
- 2) a indicação do instrumento analógico para V_{AB} ;
- 3) a indicação do instrumento digital para V_{AB} ;
- 4) o erro percentual nas indicações dos instrumentos analógico e digital.