



*Universidade de São Paulo - USP
Escola de Engenharia de São Carlos – EESC
Departamento de Engenharia Elétrica
Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica - LSEE*

▪ **Docente**

✓ Prof. Titular Denis Vinicius Coury (016 3373-8133, coury@sc.usp.br)

▪ **Colaboradores**

✓ Thiago Souza Menezes (thiagosm@usp.br)

São Carlos, agosto de 2019.

SUMÁRIO

1 Introdução aos Sistemas de Proteção Digitais

- 1.1 Os Relés Digitais
- 1.2 Desenvolvimento Histórico
 - A Evolução dos Relés Digitais
- 1.3 Benefícios Esperados com o Uso de Relés Digitais
- 1.4 Arquitetura do Relé Digital
- 1.5 A Conversão Analógico – Digital
 - Filtros *Anti-Aliasing*
- 1.6 Tendências Modernas na Proteção de Sistemas

2 Filosofia de Proteção dos Diferentes Elementos do Sistema

- 2.1 Introdução a Proteção de Sistemas
- 2.2 Funções de um Sistema de Proteção
 - Subsistemas de um Sistema de Proteção
 - Características Funcionais dos Relés
 - Classificação dos Relés
- 2.3 Filosofias Gerais de Proteção
 - Proteção de Linhas de Transmissão
 - Transformadores
 - Reatores
 - Geradores
 - e Barramentos
- 2.4 Desempenho dos TPs e TCs

3 A Proteção Digital de Linhas de Transmissão

- 3.1 Introdução
- 3.2 Abordagem Matemática para a Estimativa de Parâmetros na Proteção de Sistema:
 - 3.2.1 Medidas dos Parâmetros Tensão e Corrente
 - 3.2.2 Métodos de Estimativa dos Componentes Fundamentais dos Sinais
 - Ajuste por Mínimos Quadrados
 - A Transformada de *Fourier*
 - A Função *Walsh*
 - O Filtro de *Kalman*
 - 3.2.3 Cálculo de Parâmetros através do Modelo R-L da Linha
 - 3.2.4 Método Baseado no Fenômeno de Ondas Viajantes
- 3.3 Sistema Completo de Proteção de Distância de uma LT
- 3.4 Proteção Digital Diferencial para Linhas com Três Terminais

SUMÁRIO

4 A Proteção Digital de Transformadores, Máquinas e Barramentos

- 4.1 A Proteção Digital de Transformadores
- 4.2 A Proteção Digital de Geradores e Motores
- 4.3 A Proteção Digital de Barramentos

5 Localização Digital de Faltas em Linhas de Transmissão

- 5.1 Introdução
- 5.2 Breve Levantamento Bibliográfico
- 5.3 Localizadores Digitais Estudados
- 5.4 Estudo Prático Comparativo para os Localizadores de Falta Apresentados

6 Simulação Digital de Sistemas Elétricos sob Falta

- 6.1 O uso do ATP/EMTP
- 6.2 Exemplos Práticos de Aplicação

7 Novas Tecnologias Aplicadas a Proteção de Sistemas Elétricos

- 7.1 Os Sistemas de Comunicação para Proteção
- 7.2 Relés Adaptativos
- 7.3 *Wavelets* aplicadas a Proteção e Localização de Faltas

8 Ferramentas Inteligentes Aplicadas a Proteção de Sistemas Elétricos

- 8.1 Redes Neurais Artificiais
- 8.3 Redes *Intranets* e o uso de Agentes Inteligentes
- 8.4 Algoritmos Genéticos

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

1 – Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes**

D.V Coury, M. Oleskovicz, R. Giovanini

ISBN: 978-85-85205-78-2

Editor: Universidade de São Paulo, 378p., 2007

2- Computer Relaying for Power Systems**

A. G. Phadke and J. S. Thorp

John Wiley & Sons Inc, ISBN 0 471 92063 0

3 – Power System Protection**

Volume 4: Digital Protection and Signalling

Edited by Electricity Training Association - IEE, ISBN 85296 838 8

4 – Digital Protection for Power Systems**

A. T. Johns and S. K. Salman

Peter Peregrinus Ltd - IEE, ISBN 0 86341 195 9

5 – Protective Relays - Application Guide, GEC Measurements

6 – Power System Relaying

A. G. Phadke and S. H. Horowitz

Research Studies Press Ltd, ISBN 0 863 801 854

7 – Protection Techniques in Electrical Energy Systems

H. Ungrad, W. Winkler and A. Wiszniewski

Marcel Dekker, Inc. ISBN 0 8247 9660 8

Datas Importantes

Primeira Prova: 26-setembro-2019

Segunda Prova: 28-novembro-2019

Exercícios em sala.

Aulas Práticas

1. Introdução **Desenvolvimento dos relés computadorizados**

1.1 – Desenvolvimento dos relés computadorizados

- ▶ Início das investigações em 1960.
- ▶ Programas CC, fluxo de carga, estabilidade já estavam implementados – proteção seria o próximo campo promissor.
- ▶ Velocidade + Preço = Problema

1.2 – “Background histórico”

- ▶ Idéia inicial: proteção manipulada por um único computador. Iniciou-se, portanto estudos de algorítmicos encarando as complexidades da área.
- ▶ Área de maior interesse: *proteção de linhas de transmissão*.
- ▶ Era esperado um desempenho, no mínimo, igual ao dos relés convencionais.
- ▶ Na década de 1970 houve um avanço significativo no *hardware* computacional.

Houve uma diminuição do tamanho, do consumo e do custo dos relés bem como um aumento na sua velocidade de processamento. Comprovando a possibilidade de implementação dos relés computadorizados.

Desenvolvimento dos relés computadorizados

1.3 – Benefícios esperados com o uso da proteção computadorizada

- ▶ **Custo:** Inicialmente o relé computadorizado era de 10 a 20 vezes mais caro que o relé convencional. Atualmente o preço de um relé digital sofisticado (incluindo o *software*) é praticamente igual ao preço de um relé convencional.
- ▶ **Auto-checagem e confiabilidade:** O relé pode ser programado para monitorar seu próprio *software* e hardware, aumentando a sua confiabilidade.
- ▶ **Integração do sistema e ambiente digital:** Tendência geral, sistemas de medição, comunicação e controle serem computadorizados.
- ▶ **Flexibilidade:** dispositivo programável, podendo mudar suas características.

* Alguns Problemas: adaptação da tecnologia, mudanças no *hardware*, linguagem, ambiente hostil para o equipamento, etc.

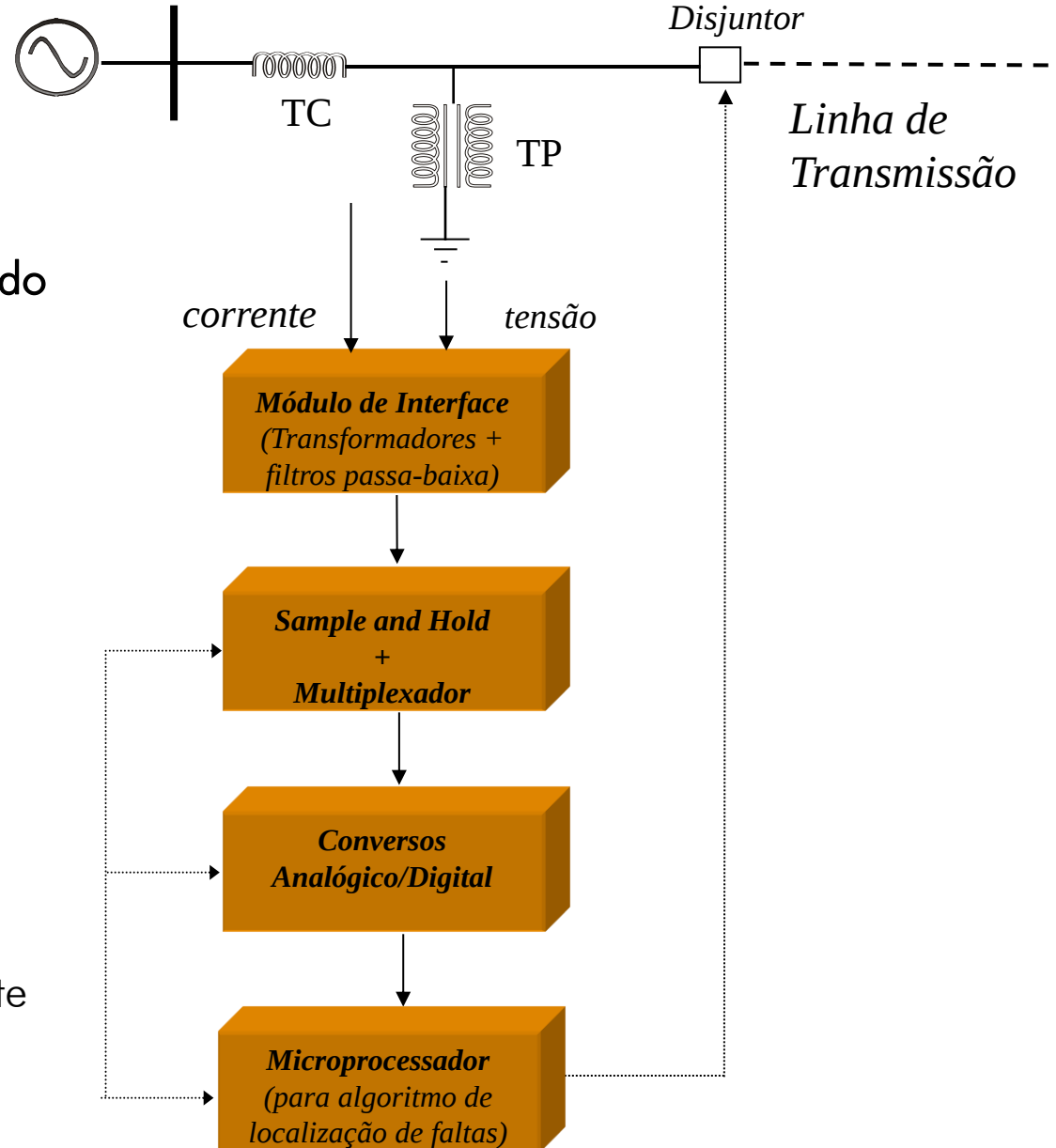
1. Introdução

Desenvolvimento dos relés computadorizados

1.4 – Arquitetura do relé computadorizado

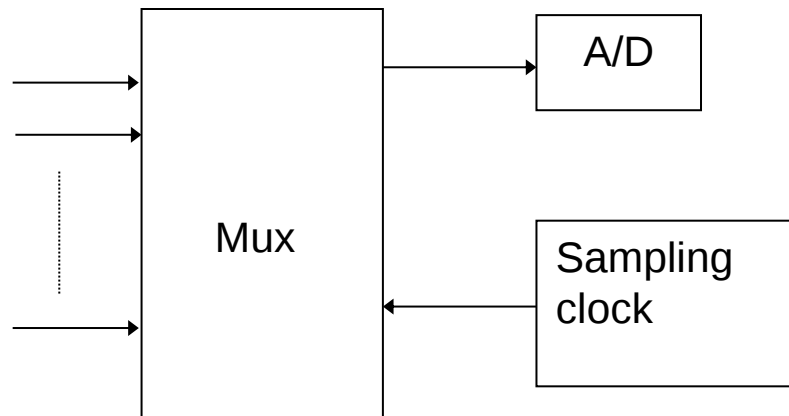
- ▶ Redutores de medida
- ▶ Módulos de interface
- ▶ *Sample and Hold*
- ▶ Multiplexador
- ▶ Conversores analógico/digital
- ▶ Processador.

* O suprimento de energia é geralmente fornecido por baterias

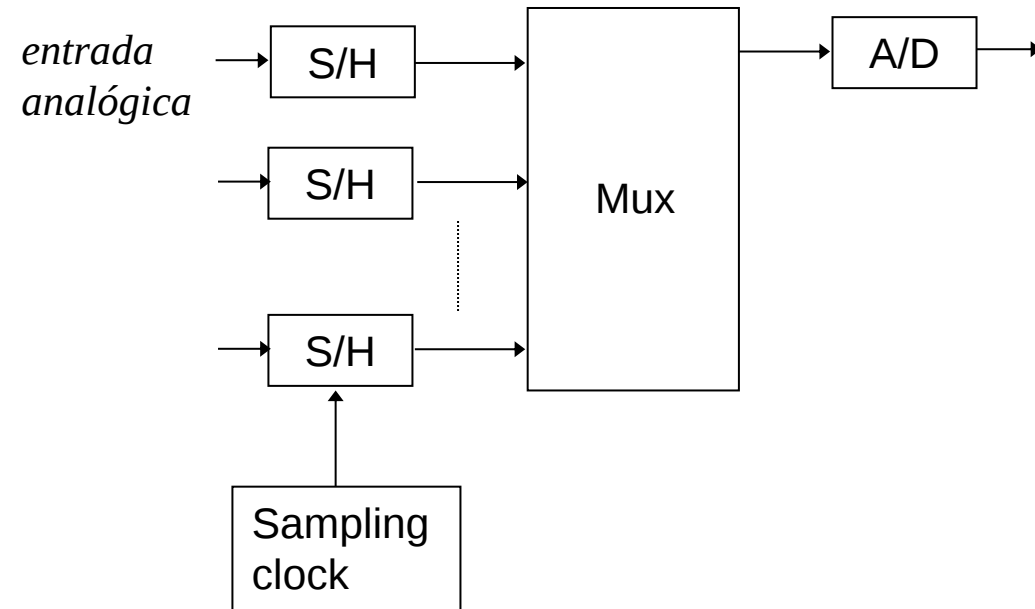


Organização do processo de amostragem:

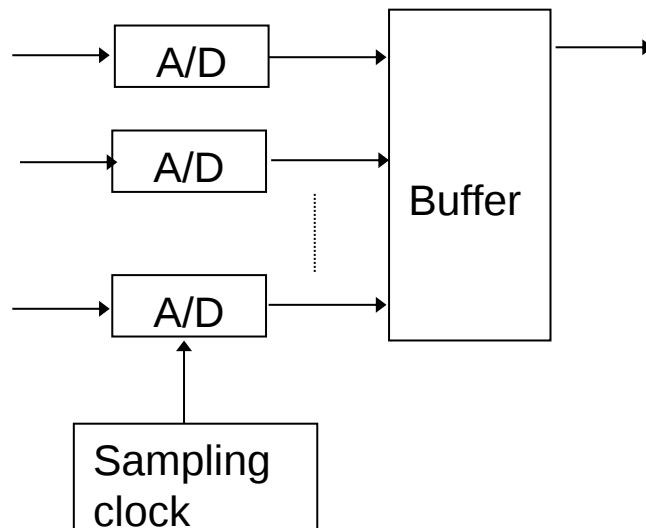
a. Multiplexador de alta velocidade



b. Uso do S/H

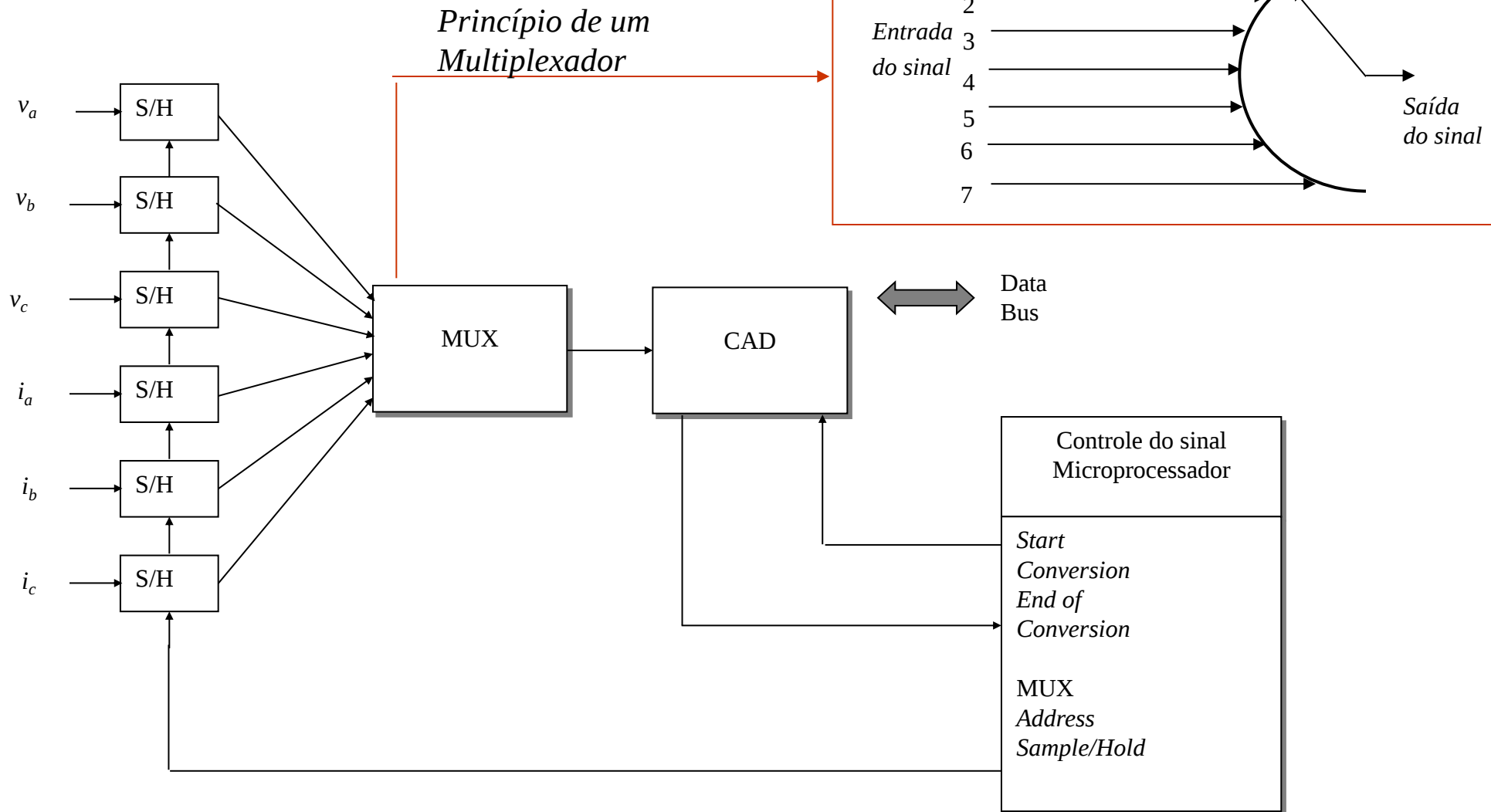


c. A/D individual (mais caro)



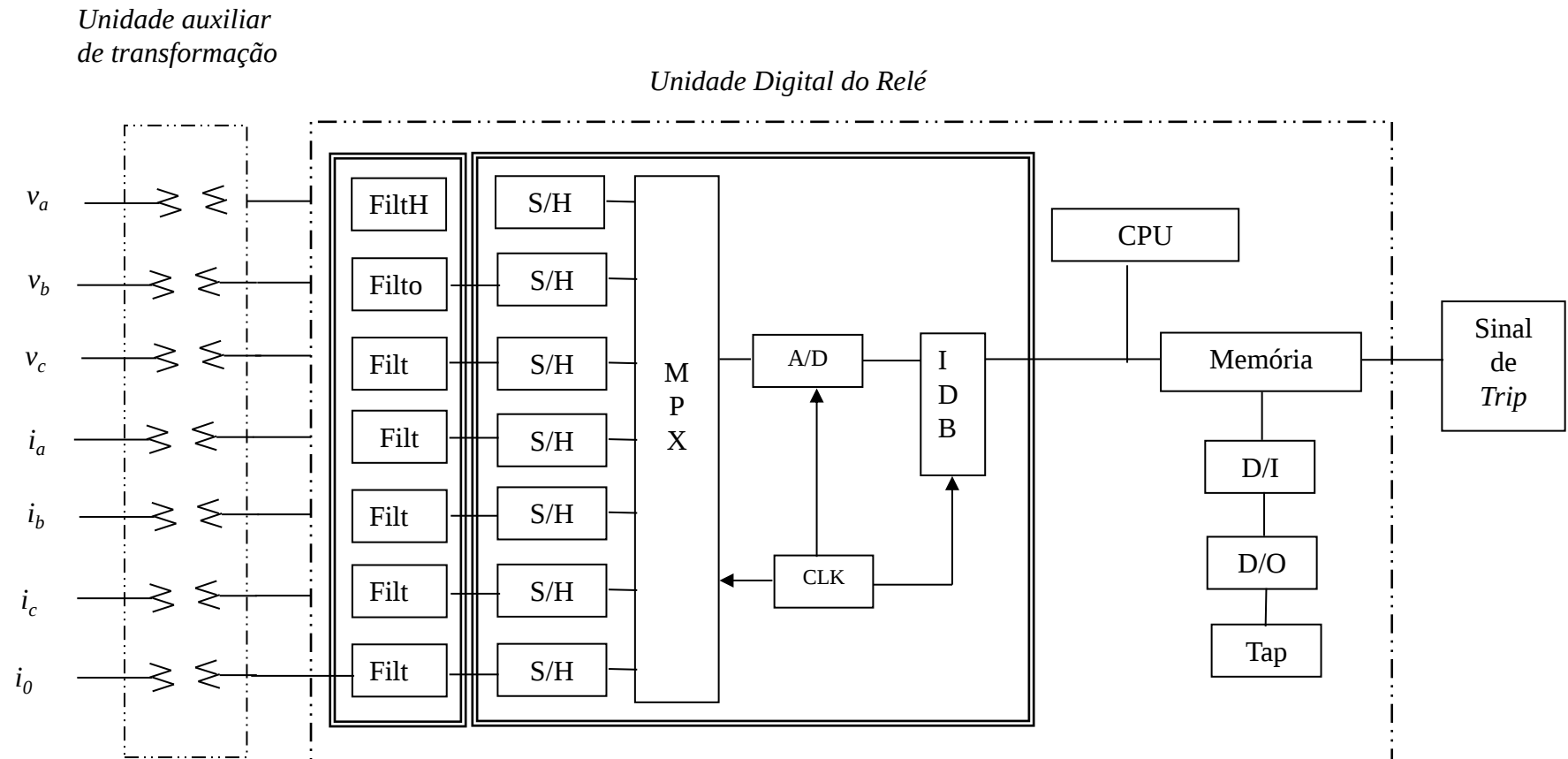
Elementos básicos da proteção digital

► Arranjo da conversão analógica/digital do relé



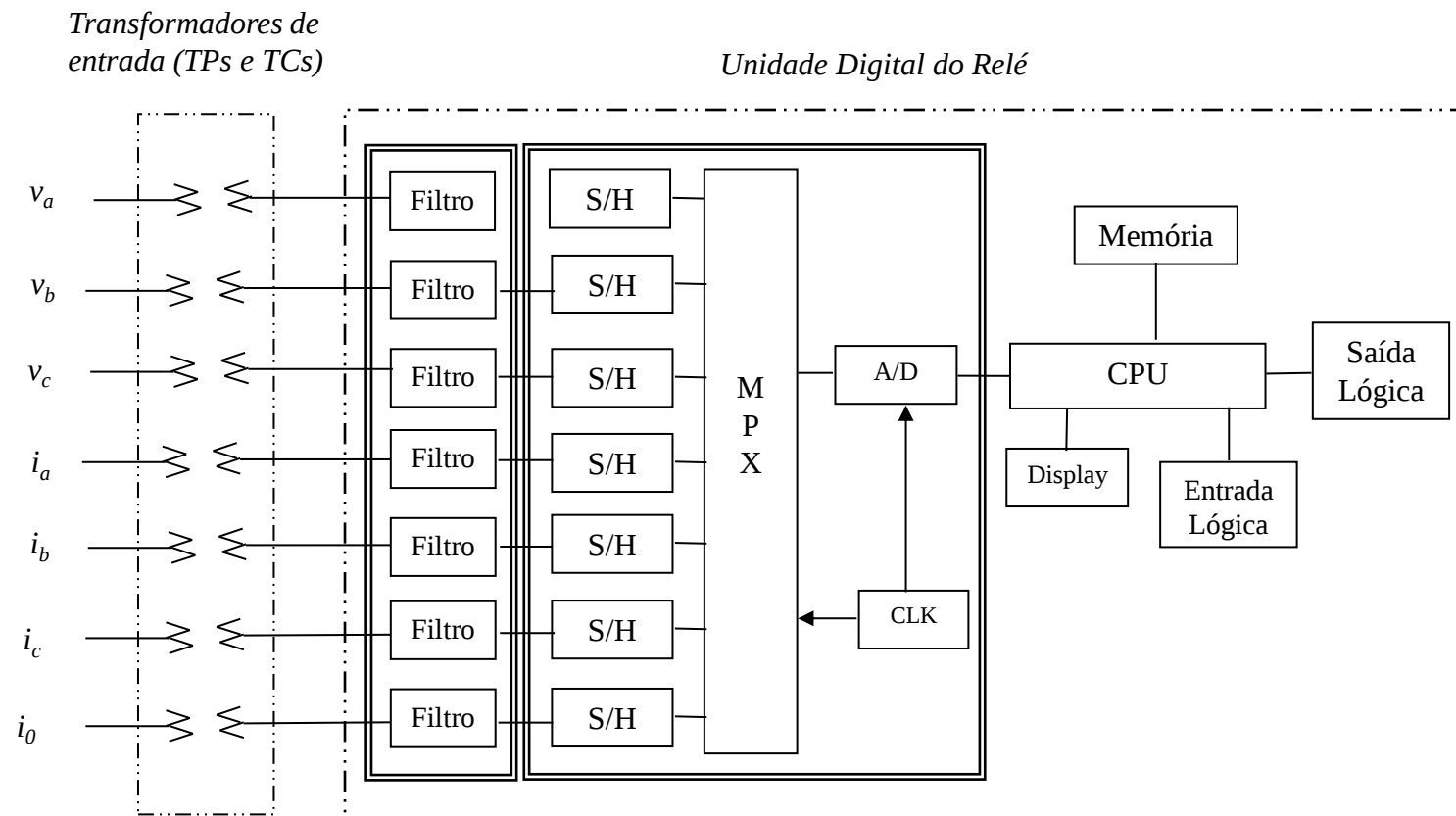
Elementos básicos da proteção digital

► Elementos básicos da proteção digital



Elementos básicos da proteção digital

► Elementos básicos da proteção digital



Compensação devido a não simultaneidade dos sinais:

► Para fasores:

$$x(t) \xrightarrow{\text{amostra no tempo}} t_x$$

$$y(t) \xrightarrow{\text{amostra no tempo}} t_y$$

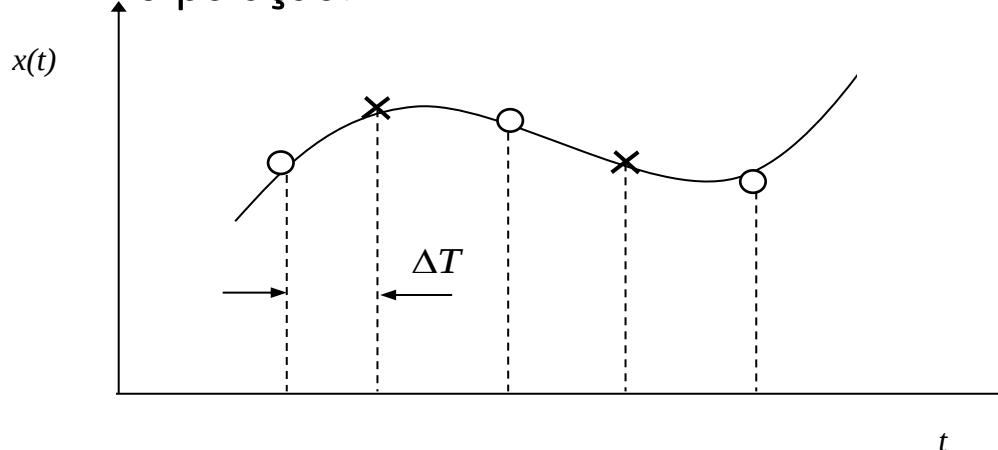
Os dois fasores vão diferir de um ângulo:

$$\Theta = (t_x - t_y) \cdot \frac{2\pi}{T} (\text{rad})$$

Onde T é o período da frequência fundamental do sinal.

Assim, os sinais podem ser colocados na mesma referência compensando-se o Θ .

► Interpolação:



$$x_k = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

$$t_k = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$$

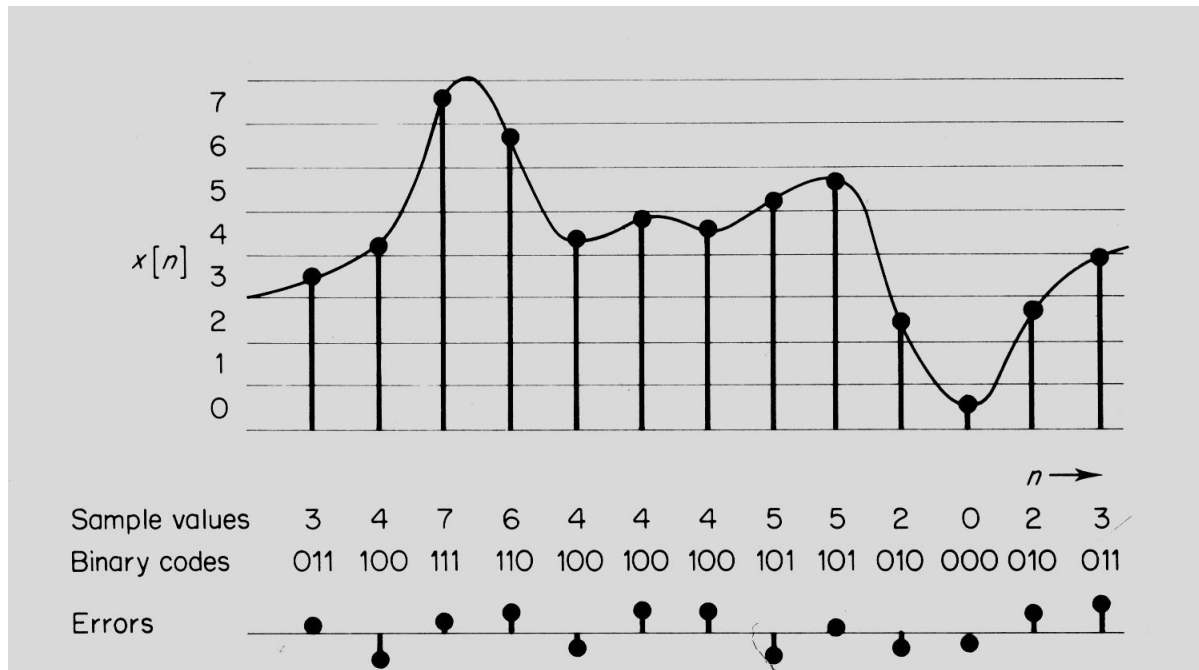
$$t'_k ?$$

x'_k será?

$$x'_k = x_k + (x_{k+1} - x_k) \cdot \frac{\Delta T}{(t_{k+1} - t_k)}$$

Desenvolvimento dos relés computadorizados

1.5 – A conversão analógica digital



Máximo erro introduzido:

$\pm \frac{1}{2} \times \text{nível de quantização}$ (erro de quantização).

Quanto maior o número de bits do conversor, menor é o erro de quantização.

Taxa amostral: outro parâmetro importante.

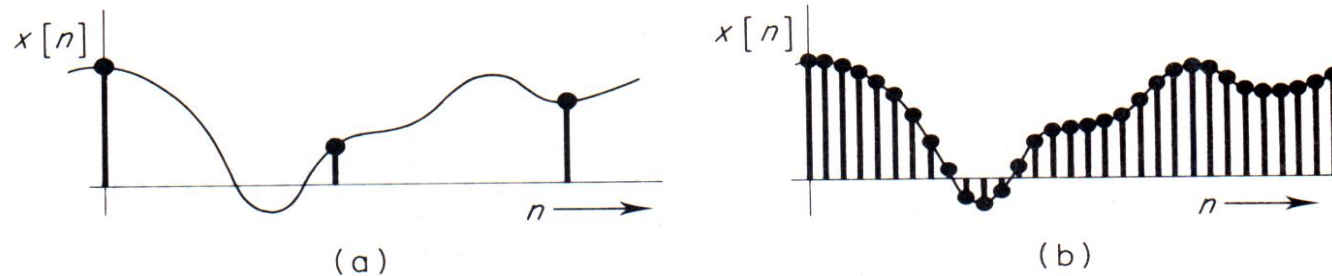
Convertendo um sinal analógico em um código binário

Conversor N bits $\rightarrow 2^N$ valores a serem representados

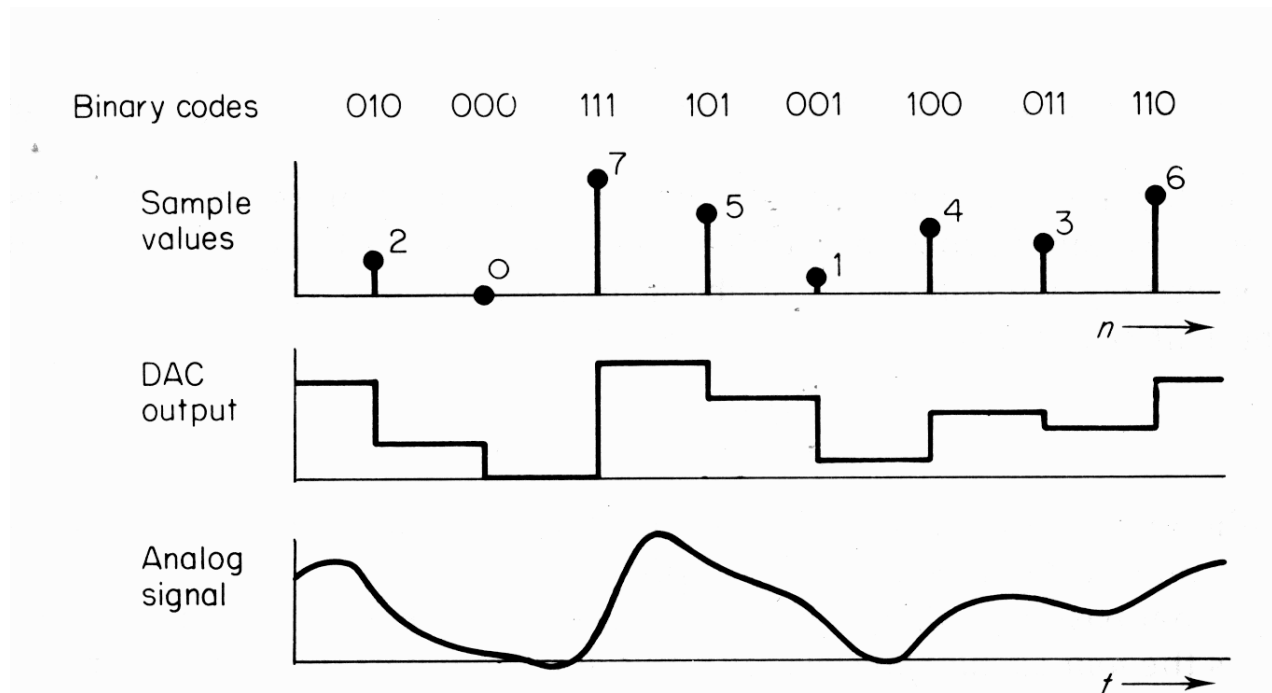
Exemplo: $N = 3 \therefore 2^3 = 8$ (8 níveis de quantização)

Conversão analógica/digital

► Amostragem de um sinal analógico

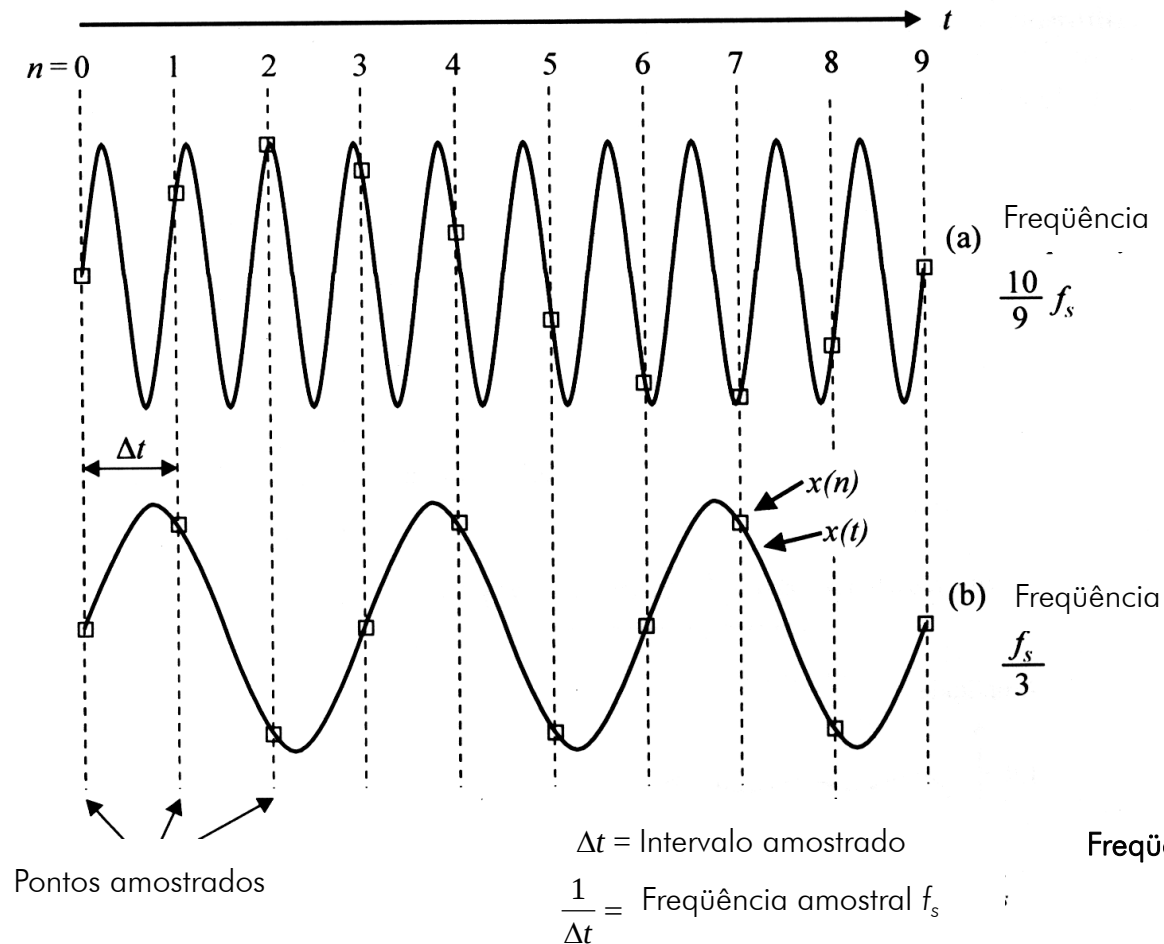


► Conversão digital/analógica



Conversão analógica/digital

- Efeito *aliasing* em um sinal amostrado.



Freqüência $< 0,5 f_s$

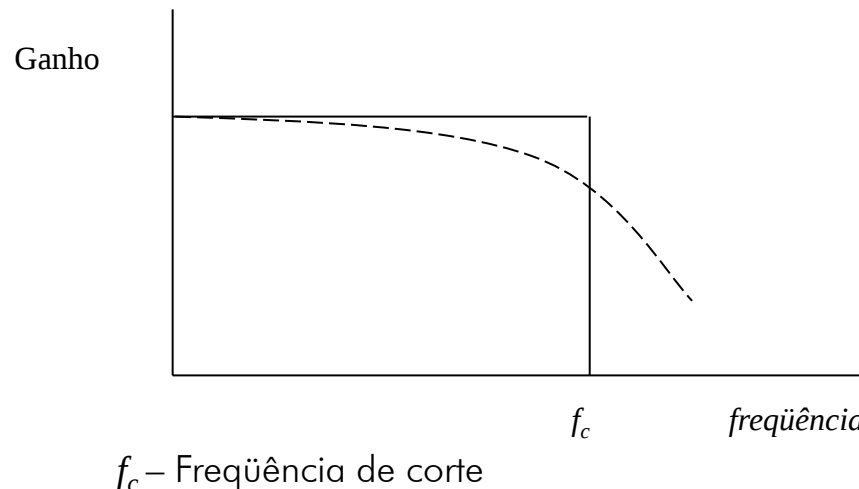
Teorema da amostragem:

1.6 – Filtros “anti-aliasing”

► Para que uma determinada frequência f_1 do sinal analógico seja ou possa ser completamente reconstituída, a taxa amostral, no processo de digitalização, deve ser no mínimo igual a $2xf_1$.

f_1 = Frequência de Nyquist

- Para que não ocorra o fenômeno conhecido como **sobreposição de espectros** (*aliasing*), filtros *anti-aliasing* devem ser usados.

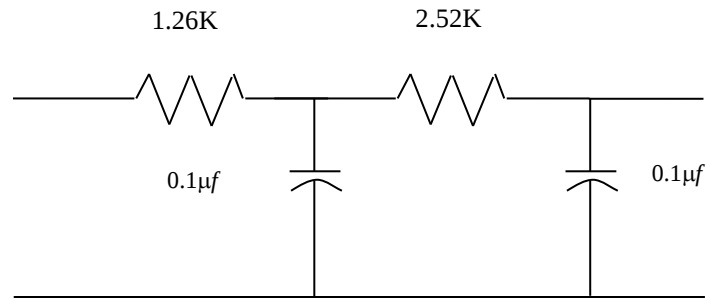


* A linha contínua mostra a característica ideal do filtro para uma frequência de corte f_c . O gráfico pontilhado mostra a característica real do filtro.

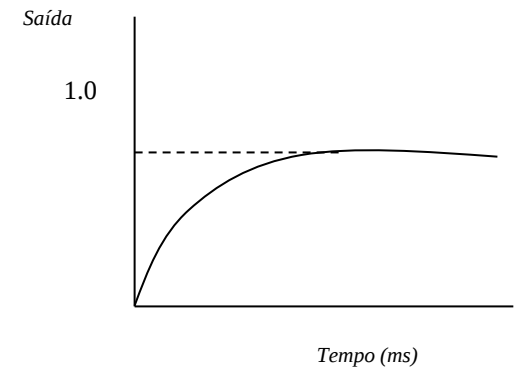
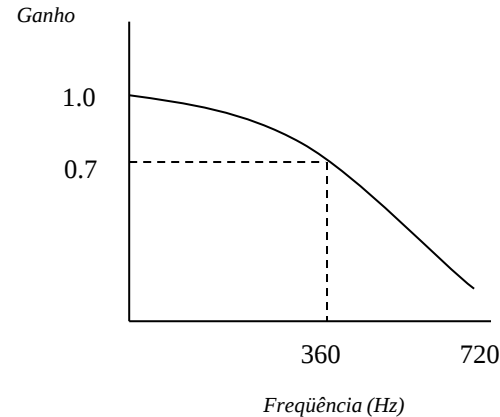
Comparação entre diferentes filtros para uma frequência de corte igual a 360 Hz:

1.6 – Filtros “anti-aliasing”

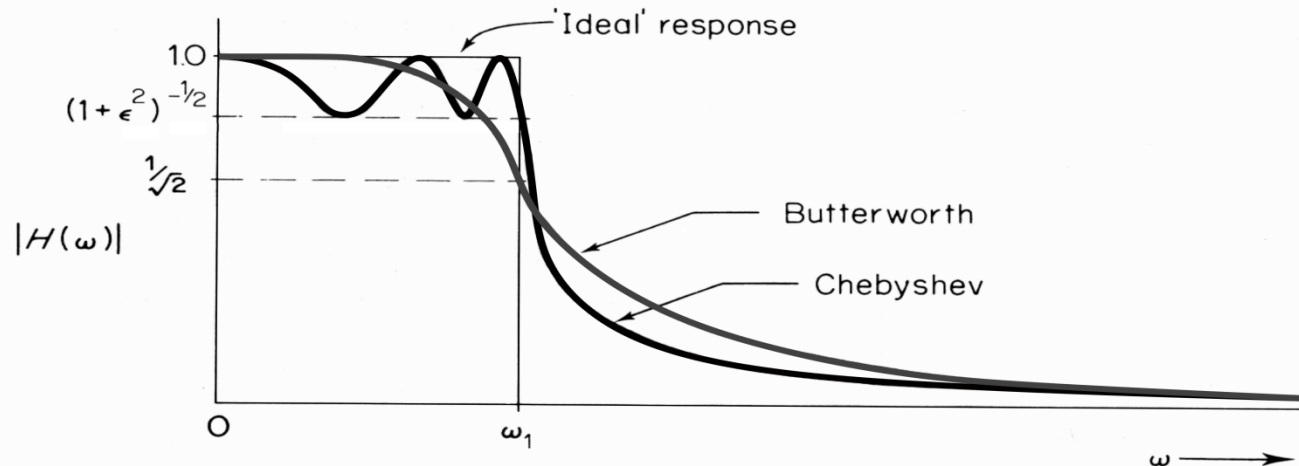
► Filtro RC – resposta em frequência e tempo



* Filtro RC com frequência de corte de 360 Hz



► Comparação entre o filtro *Butterworth* e *Chebyshev*.



Relé Digital Diferencial L90



Relé diferencial com disponibilidade de comunicação (via UCA 2.0) de alta velocidade via rede *Intranet*.

Software resgata **oscilografia** e eventos para rápido **diagnóstico de falta**.

Bastante **flexível** quanto ao uso.

Característica modular – pode ser atualizado em campo com módulos substituíveis.

Possibilidade de sincronização de dados via **GPS** (*Global Positioning System*).

Exercício

Se uma forma de onda de tensão $v(t) = 60 \sin(\omega t + 30^\circ)$ V for digitalizada por um conversor analógico digital A/D de 4 bits a uma taxa amostral de 960 Hz, qual o erro médio de quantização esperado. Representar a situação graficamente. Este erro seria significativo em um processo referente a proteção? Qual o nível de precisão requerido?