



SEL354 Proteção de Sistemas de Energia Elétrica

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

▪ **Docente**

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

▪ **Monitor**

✓ Caio Vinícius Colozzo Grilo (caio.vinicius@usp.br)

São Carlos, agosto de 2023.

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

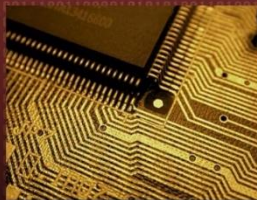
7 – Protection Techniques in Electrical Energy Systems

H. Ungrad, W. Winkler and A. Wiszniewski

Marcel Dekker, Inc. ISBN 0 8247 9660 8

PROTEÇÃO DIGITAL DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes

DENIS VINICIUS COURY
MÁRIO OLESKOVICZ
RENAN GIOVANNINI



Este livro apresenta o desenvolvimento histórico dos relés de proteção, iniciando com os relés eletromecânicos e culminando em pesquisa realizada na implementação de relés digitais inteligentes. Também fazem parte do seu conteúdo uma revisão geral das principais filosofias de proteção, bem como a teoria matemática dos algoritmos dedicados a proteção digital de linhas de transmissão, transformadores, máquinas rotativas e barramentos. Assuntos correlatos tais como localização de faltas em linhas e simulação digital de sistemas faltosos também são abordados. Os capítulos finais se dedicam a novas tecnologias aplicadas à proteção, incluindo o uso de ferramentas inteligentes. O mesmo pode ser adotado como livro texto para cursos de graduação em Engenharia Elétrica, considerando seus capítulos iniciais, bem como para cursos avançados de pós-graduação e extensão, considerando os capítulos posteriores. Esta publicação pode ainda ser uma referência para pesquisadores e especialistas da área.



Datas Importantes

Primeira Prova (P1): 05-outubro-2023

Segunda Prova (P2): 30-novembro-2023

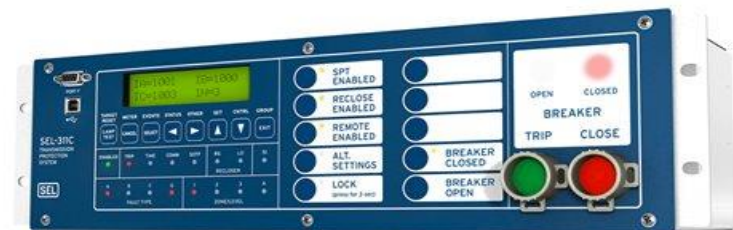
Exercícios em sala.

Aulas Práticas (visita ao LSEE) + seminários.

Conteúdo Programático

1. INTRODUÇÃO

- 1.1 Relés Digitais
- 1.2 Desenvolvimento e evolução histórica
- 1.3 Benefícios esperados usando a Proteção Digital
- 1.4 Arquitetura de Relé Digital
- 1.5 A Conversão Analógico-Digital
- 1.6 Proteção Adaptativa e Relés Inteligentes



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. Comprova-se assim 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 bastante razoável, não havendo produção dos anteriormente chamados “relés convencionais”.
- ▶ **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.

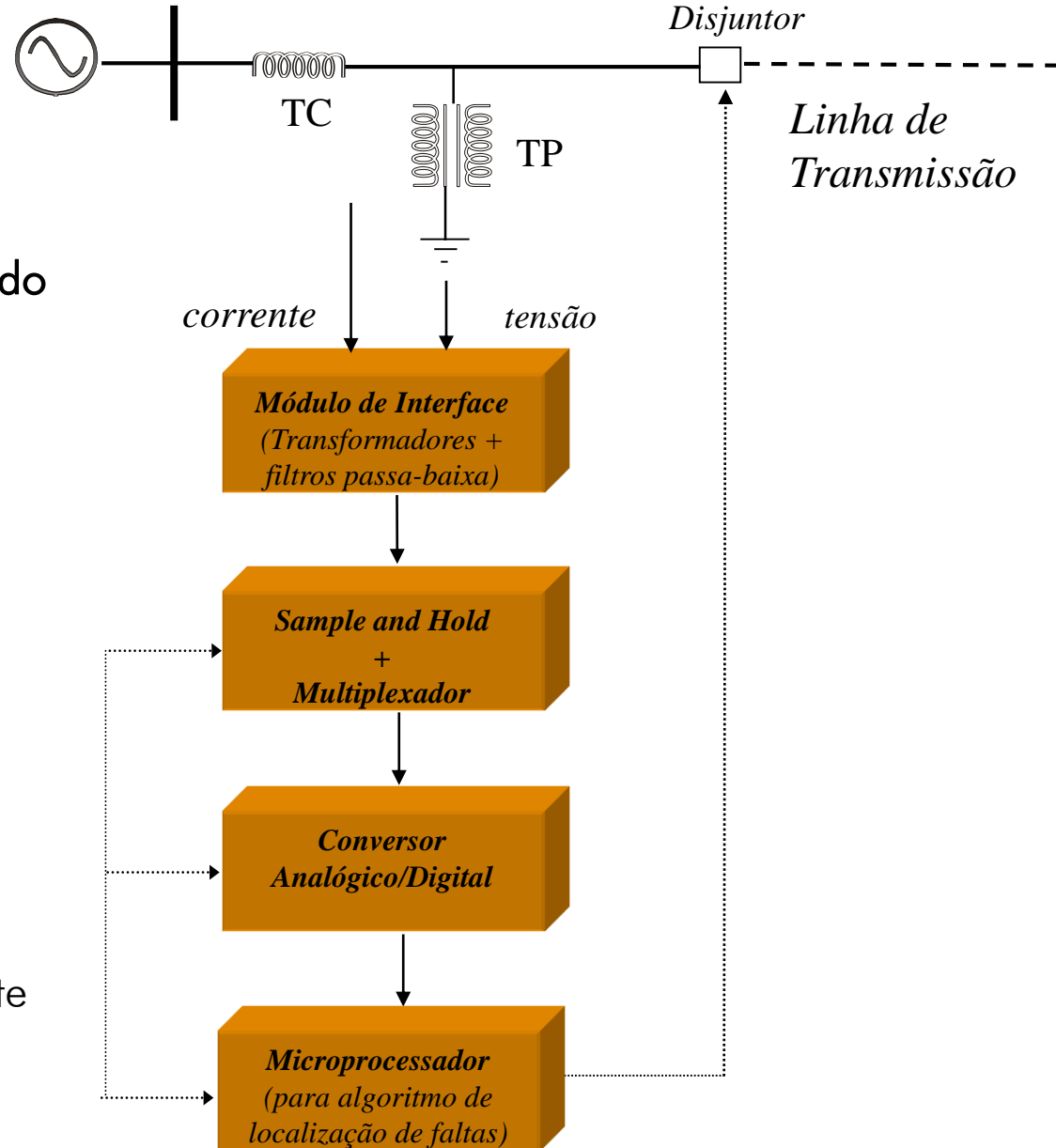
1. Introdução

Desenvolvimento dos relés computadorizados

1.4 – Arquitetura do relé computadorizado

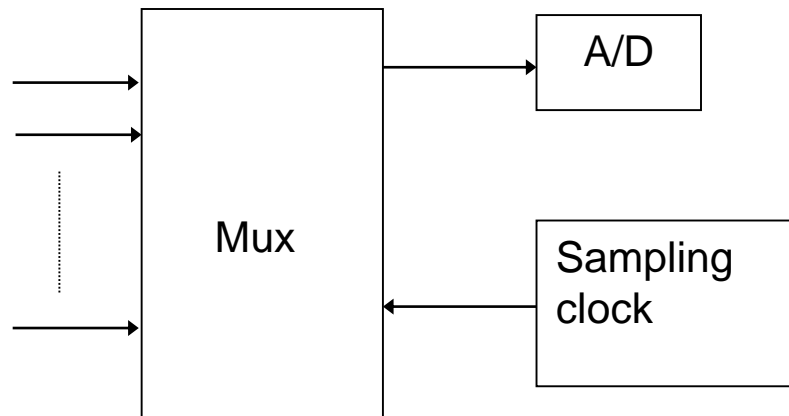
- ▶ Redutores de medida
- ▶ Módulos de interface
- ▶ *Sample and Hold*
- ▶ Multiplexador
- ▶ Conversores analógico/digital
- ▶ Processador.

* O suprimento de energia é geralmente fornecido por baterias

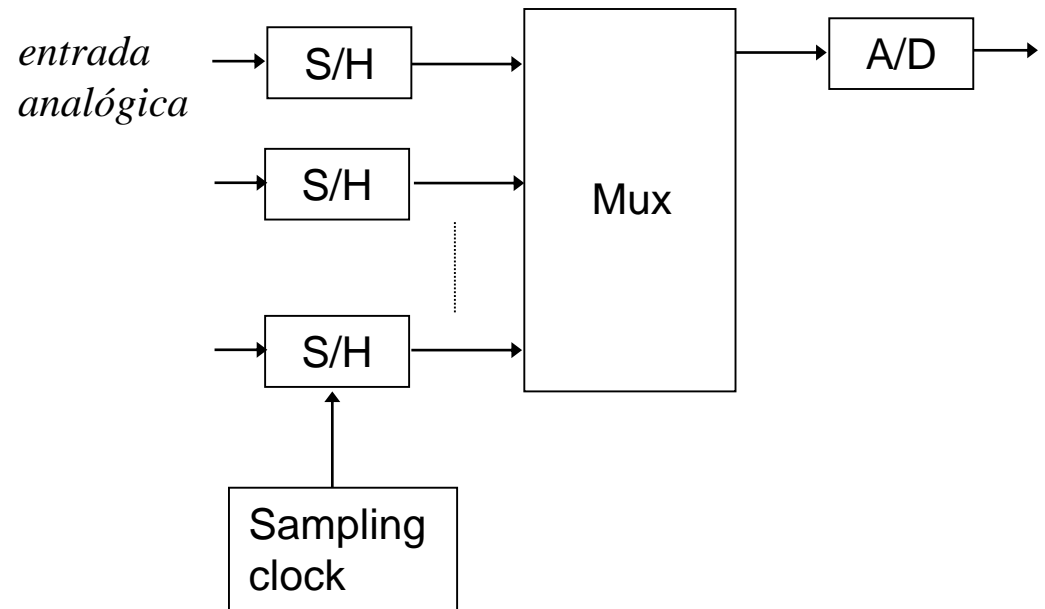


Organização do processo de amostragem:

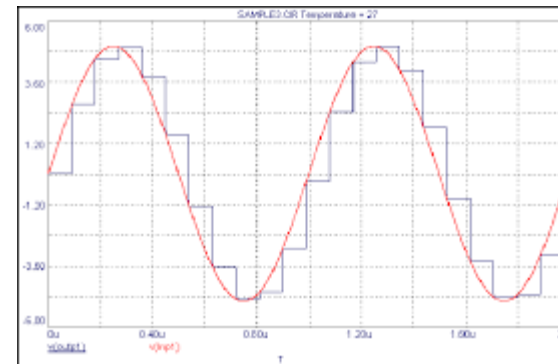
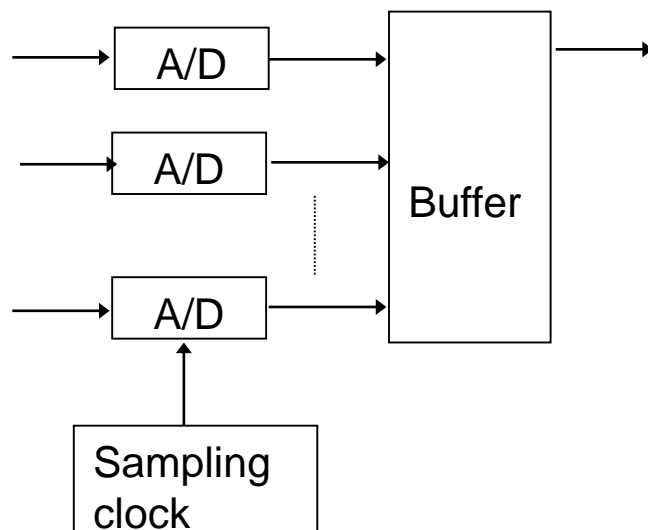
a. Multiplexador de alta velocidade



b. Uso do S/H

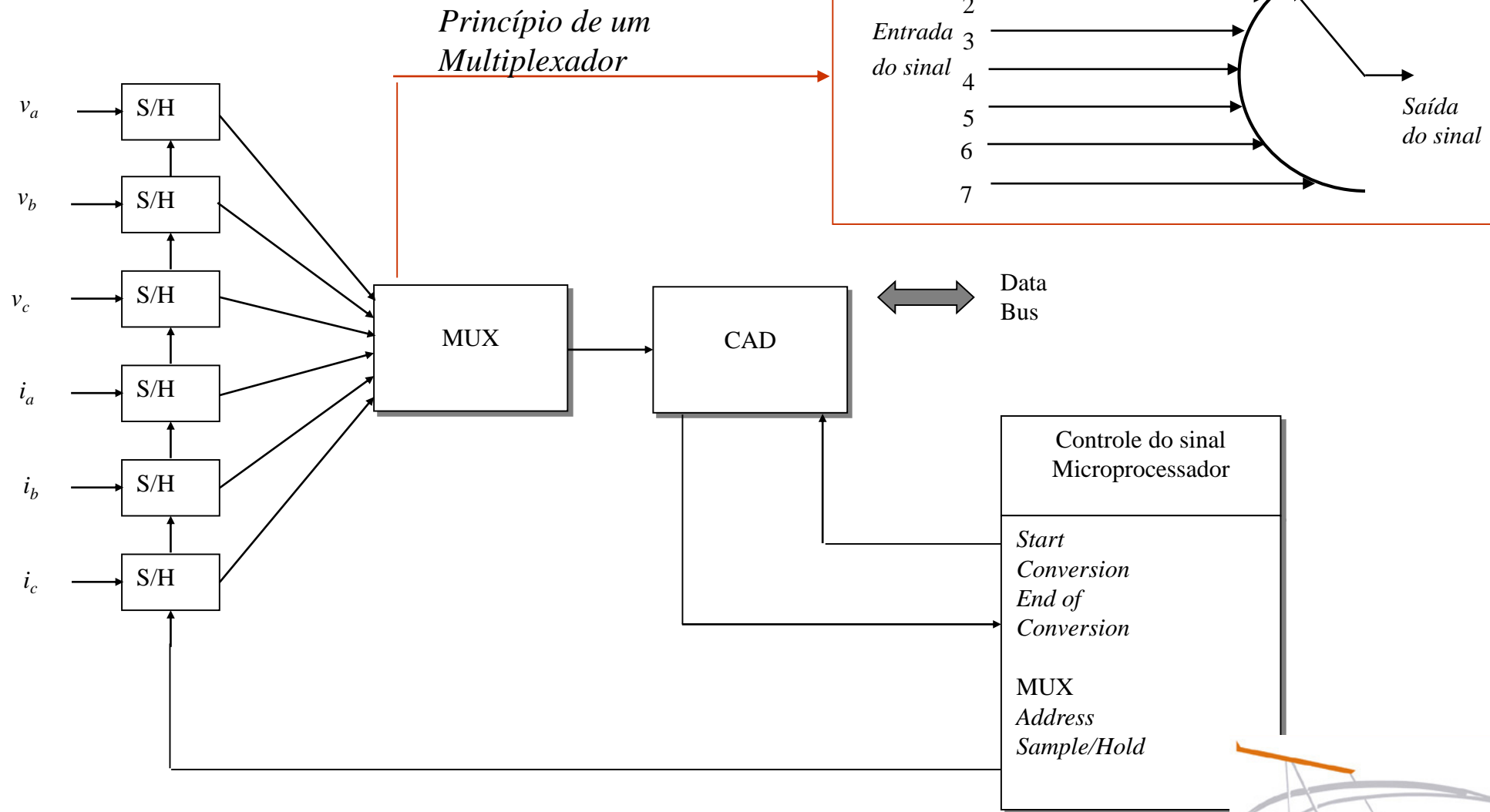


c. A/D individual (mais caro)



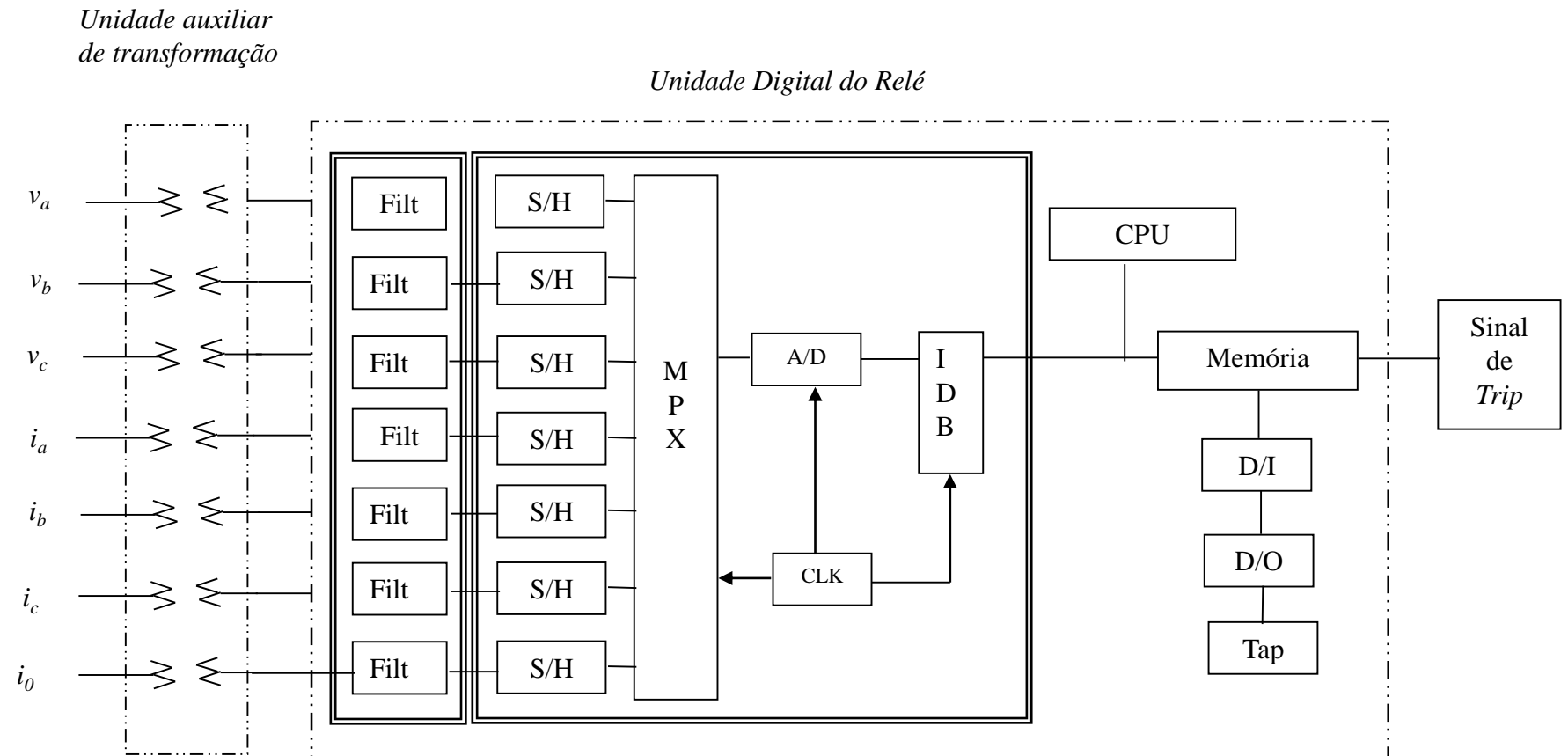
Elementos básicos da proteção digital

▶ Arranjo da conversão analógica/digital do relé



Elementos básicos da proteção digital

► Elementos básicos da proteção digital



Compensação devido a não simultaneidade dos sinais:

► Para fasores:

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

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

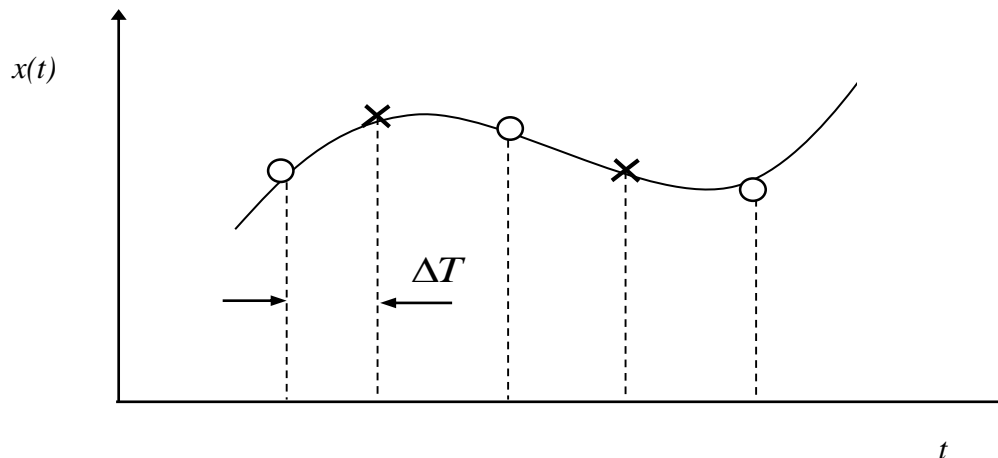
Os dois fasores vão diferir de um ângulo:

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

Onde T é a frequência fundamental do sinal.

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

► Interpolação:



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

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

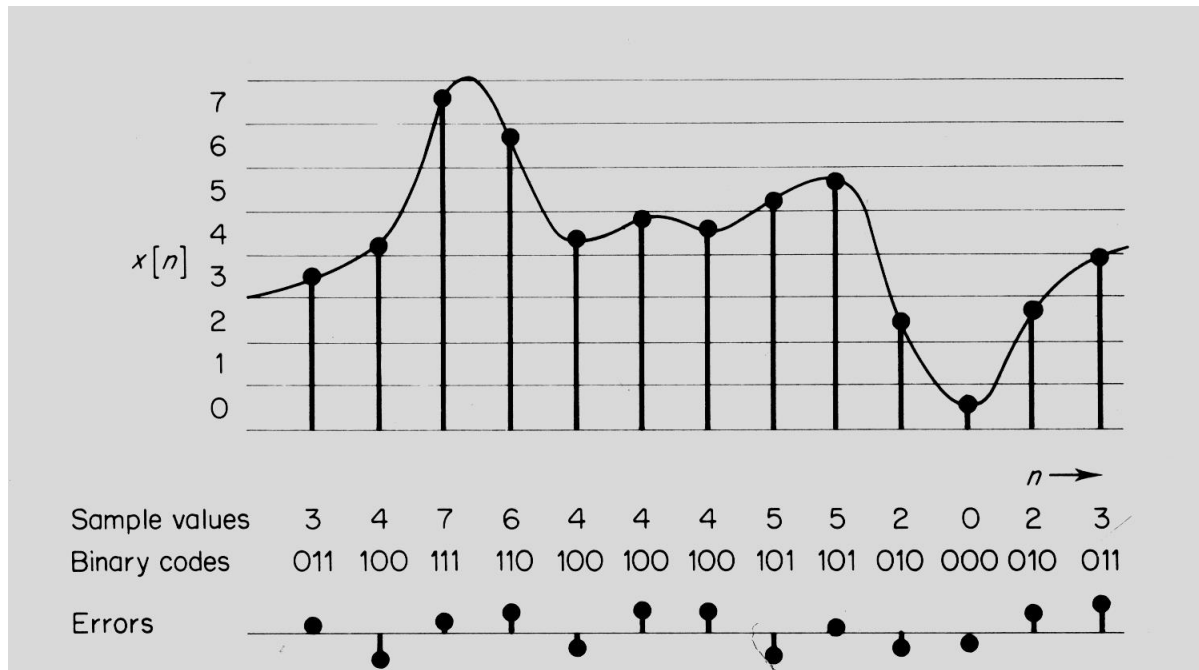
$$t'_k ?$$

x'_k será?

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

Desenvolvimento dos relés computadorizados

1.5 – A conversão analógica digital



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

Máximo erro introduzido:

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

Taxa amostral: outro parâmetro importante.

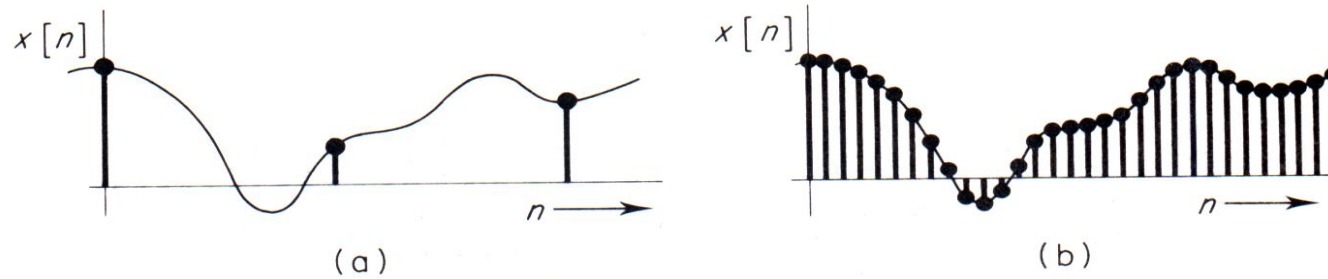
Convertendo um sinal analógico em um código binário

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

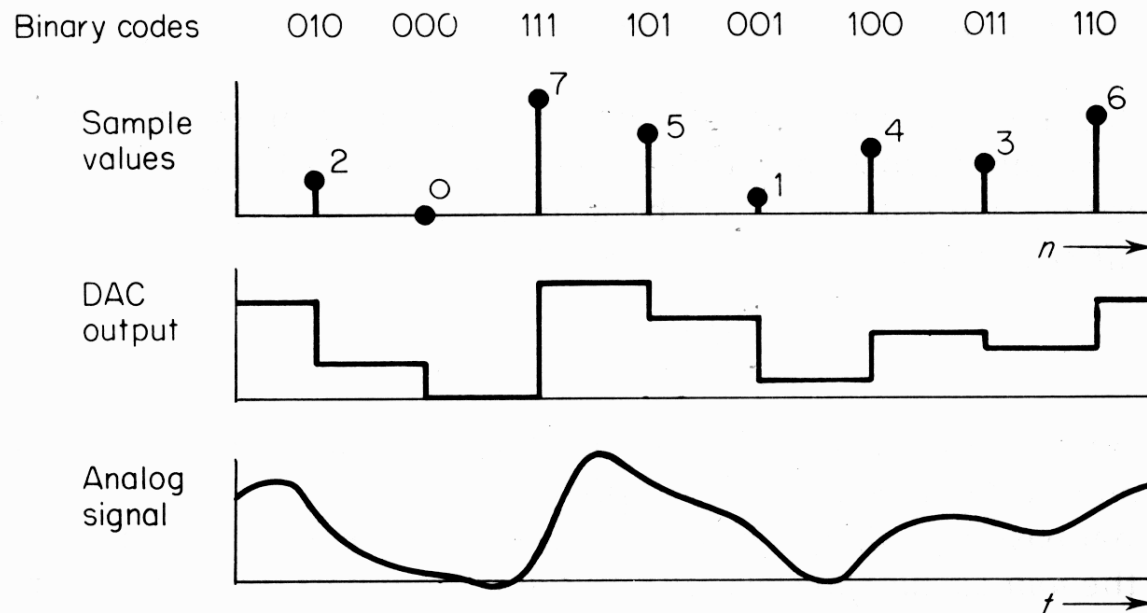
Exemplo: $N = 3 \therefore 2^3 = 8$ (8 níveis de quantização)

Conversão analógica/digital

► Amostragem de um sinal analógico



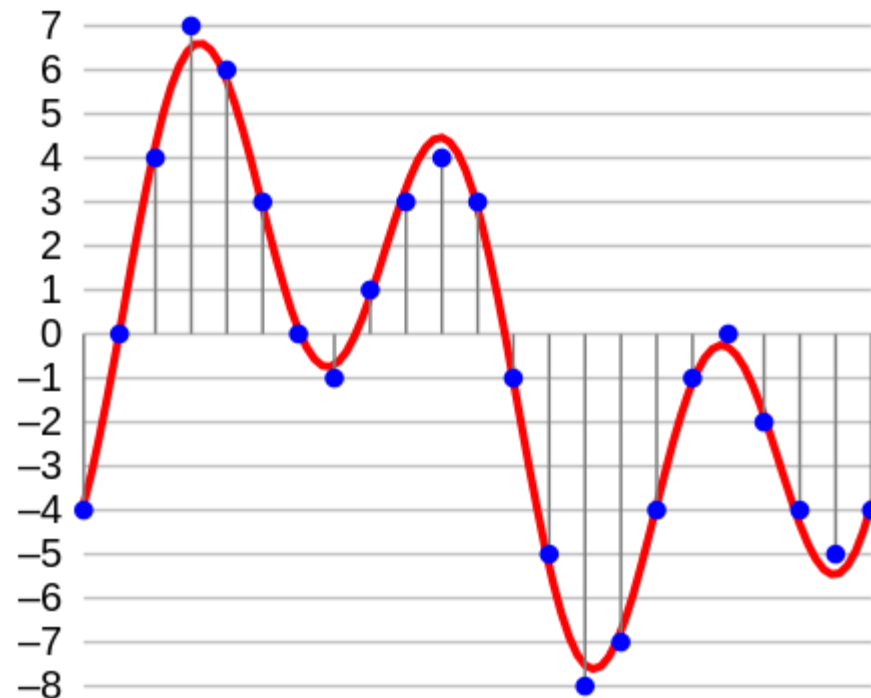
► Conversão digital/analógica



1. Introdução

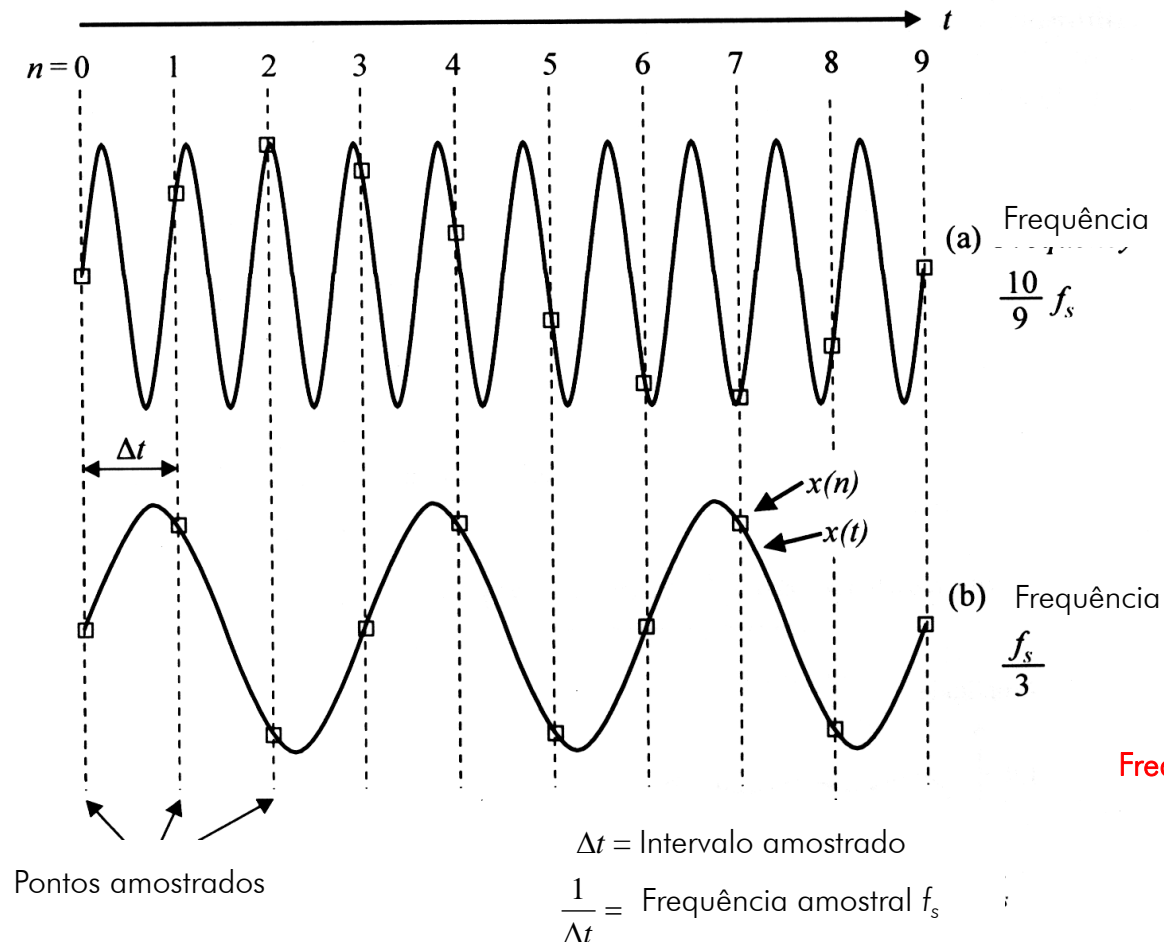
Conversão analógica/digital

- ▶ Amostragem de um sinal analógico (4 bits – 16 níveis de quantização)



Conversão analógica/digital

- ▶ Efeito aliasing em um sinal amostrado.



Frequência $< 0,5 f_s$

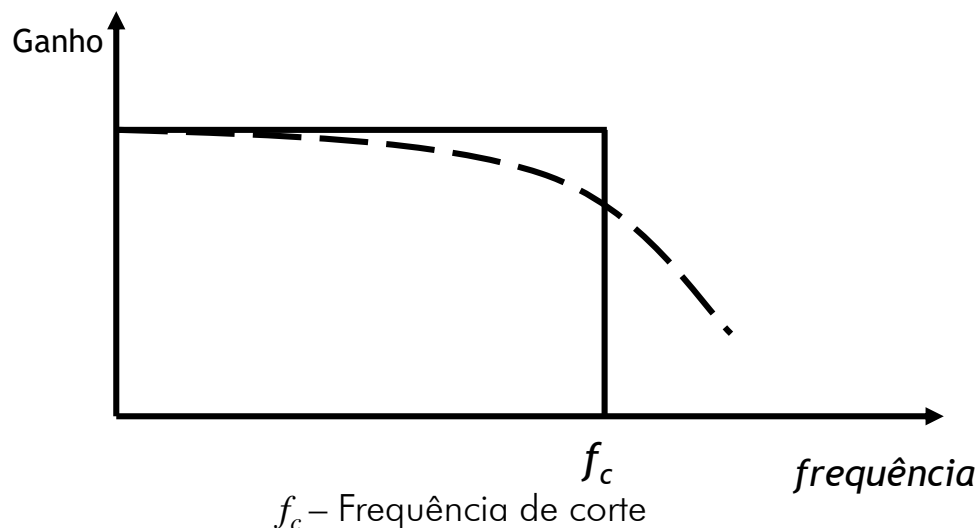
Teorema da amostragem:

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 $2xf_1$.

$f_1 = \text{Frequência de Nyquist}$

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

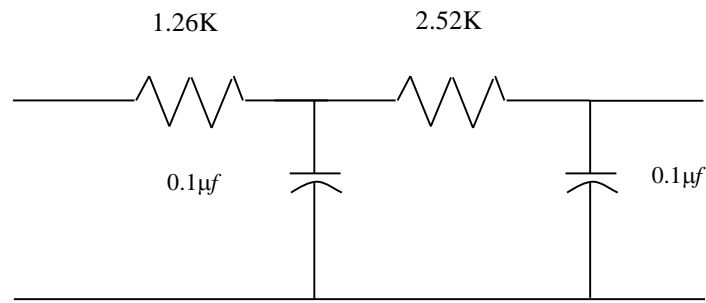


* A linha contínua mostra a característica ideal do filtro para uma frequência de corte f_c . O gráfico pontilhado mostra a característica real do filtro.

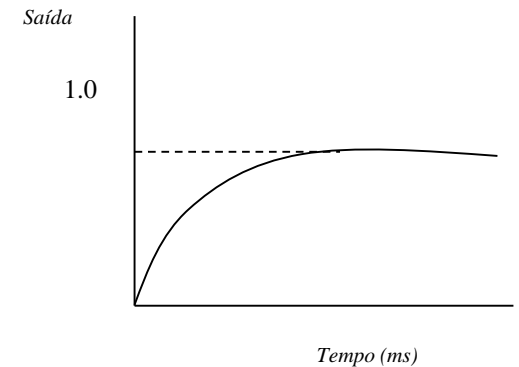
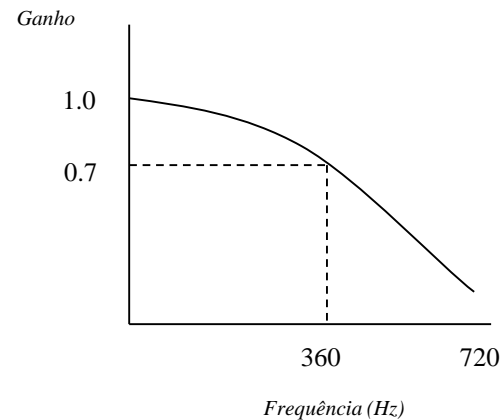
Comparação entre diferentes filtros para uma frequência de corte igual a 360 Hz:

1.6 – Filtros “anti-aliasing”

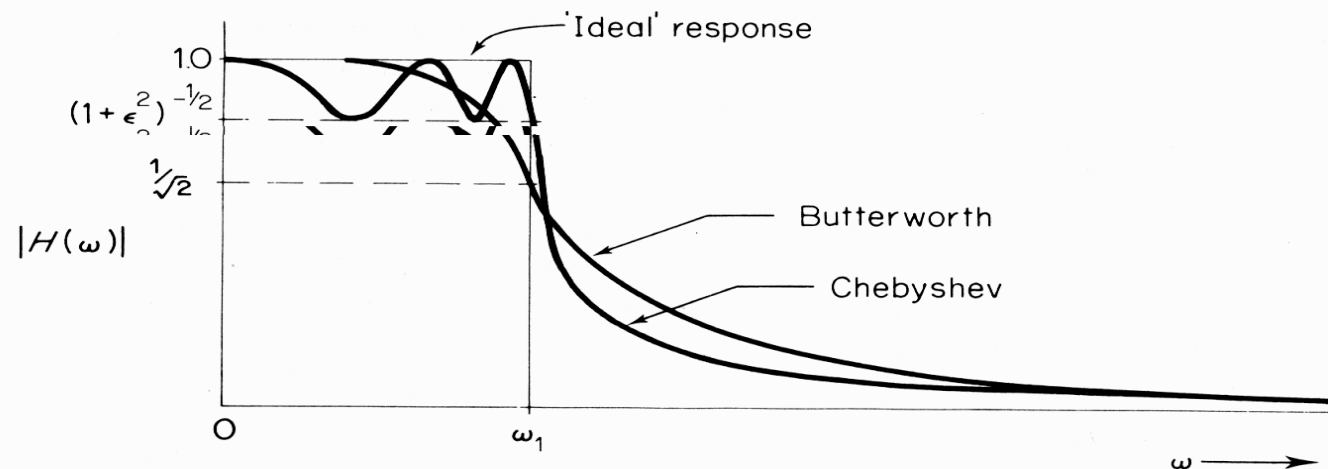
► Filtro RC – resposta em frequência e tempo



* Filtro RC com frequência de corte de 360 Hz

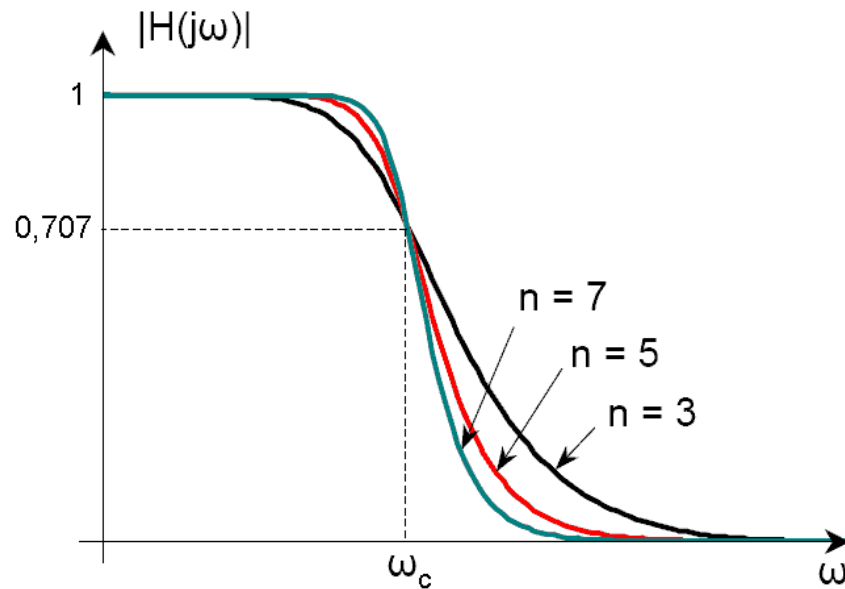


► Comparação entre o filtro *Butterworth* e *Chebyshev*.

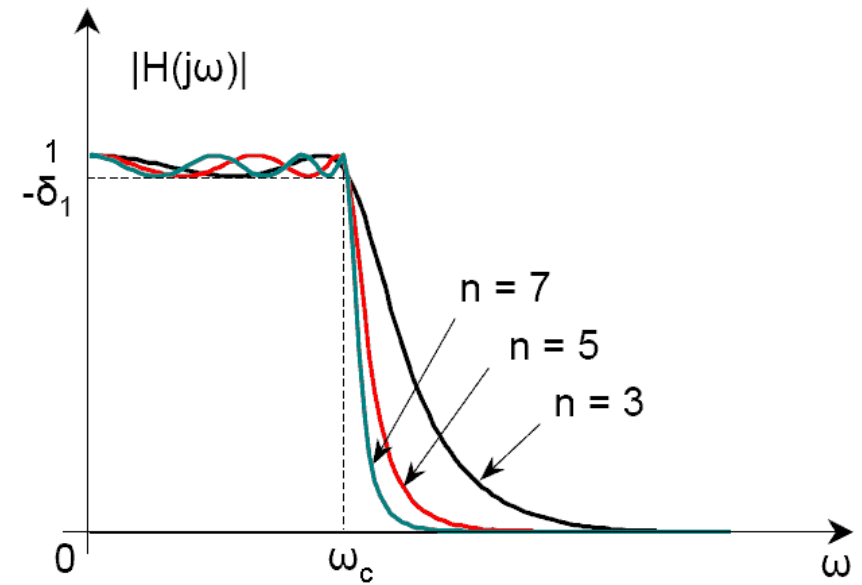


1. Introdução

Filtro Butterworth



Filtro 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.

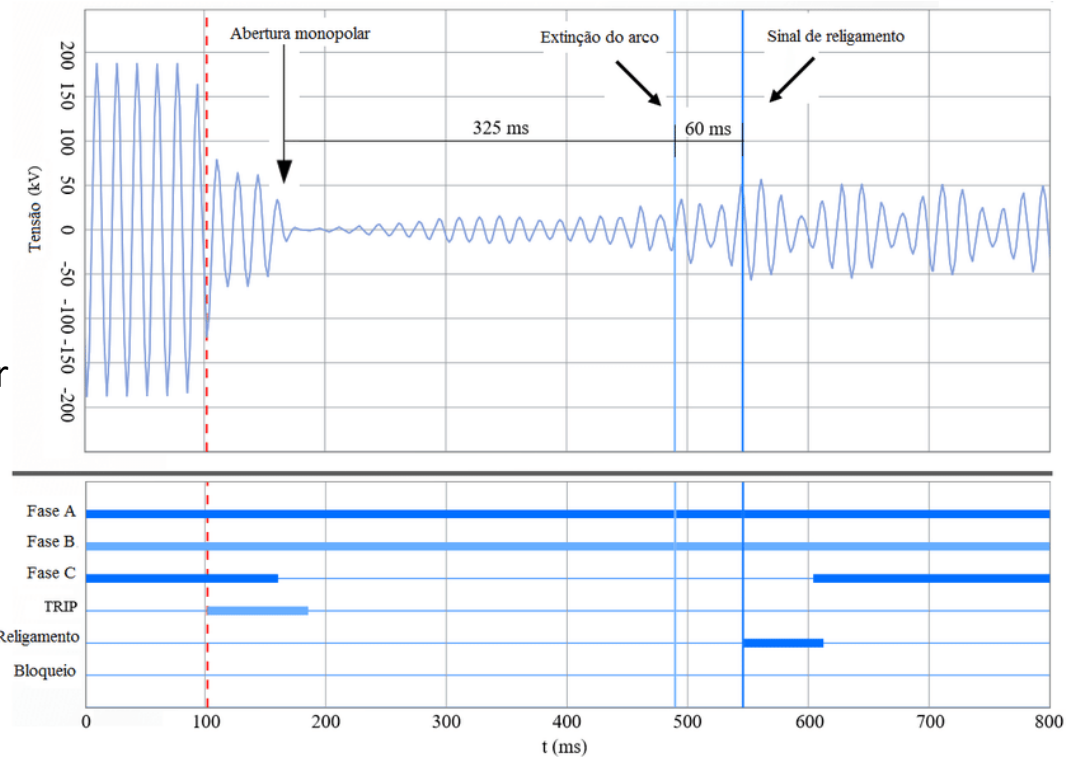
Possibilidade de sincronização de dados via **GPS** (*Global Positioning System*).

Tendências Modernas na Proteção de Sistemas

- A Comunicação de Dados e as **Fibras Ópticas**: Processo de compartilhamento e trocas de informação. **Cabos OPGW** (*Optical Ground Wire*). A Aplicação de Tecnologias Intranet.
- O uso do **GPS** e dos **PMUs** (*Phasor Measurements Units*): Permitem as concessionárias de energia a determinação de fasores de tensão e corrente com relação a uma referência fixa.
- A Proteção Adaptativa.
- O uso da Transformada Wavelet e Ferramentas Inteligentes.

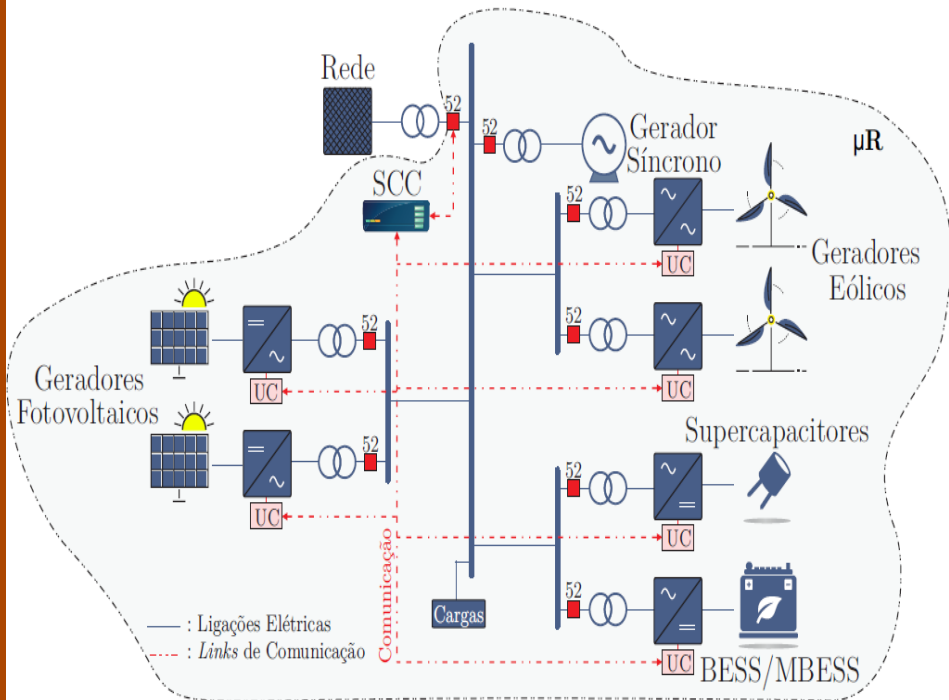
Análise Oscilográfica

- Importância do uso de oscilografias obtidas durante distúrbios e com os fundamentos de análise de sistemas elétricos e conceitos de proteção.
- **Objetivo:** diagnosticar ocorrências, recuperar o sistema em menor tempo e agilizar os trabalhos de manutenção.
- Verificação de faltas desequilibradas, componentes de sequência, caracterização dos defeitos.



Proteção Adaptativa

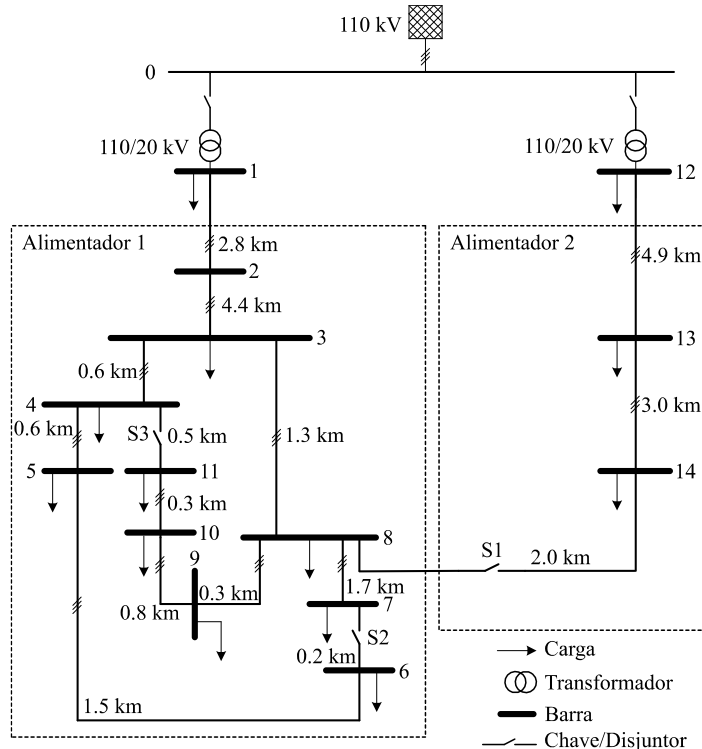
Microrredes



- Crescente aumento dos níveis de demanda de energia e conscientização ambiental.
- Aumento da oferta de fontes de Geração Distribuída (GD), incluindo o uso de energias renováveis. (Turbinas a gás, microturbinas, células fotovoltaicas, células combustíveis e energia eólica.)
- Uma microrrede pode ser definida como um conjunto de Sistemas de Geração Distribuída Híbrido (SGDH), sistemas de armazenamento e cargas que são conectados a uma rede de baixa ou de média tensão, ou rede de distribuição, através de um ponto de acoplamento comum (PAC).
- Advento das *Smart Grids*.
- Pode operar **conectada** a uma rede principal ou **ilhada**.

Proteção Adaptativa

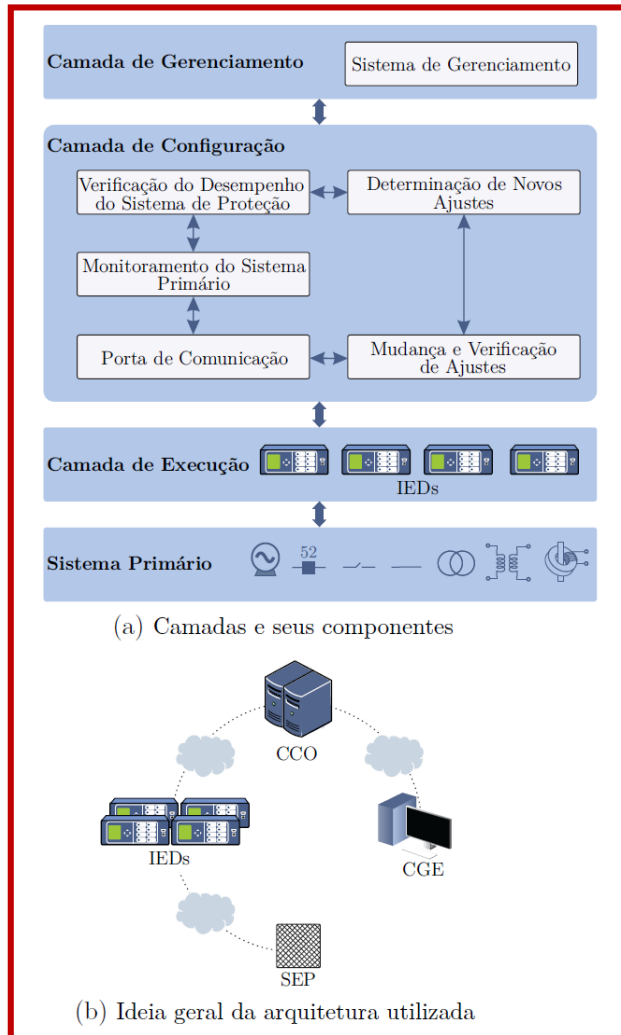
Microrredes



- Sistema teste de média tensão europeu – *benchmark* Cigré.
- Implementação computacional em laboratório.
- Sistema adaptado e permite uma certa flexibilidade no estudo. Inclusão e exclusão de GD.
- Trabalha isolado ou ilhado.
- Sistemas de proteção convencional (Relés de sobrecorrente) e adaptativo podem ser implementados.
- Softwares como o ATP (*Alternative Transients Program*) e um simulador digital em tempo real, RTDS™ (*Real Time Digital Simulator*) serão empregados.

Proteção Adaptativa

Microrredes

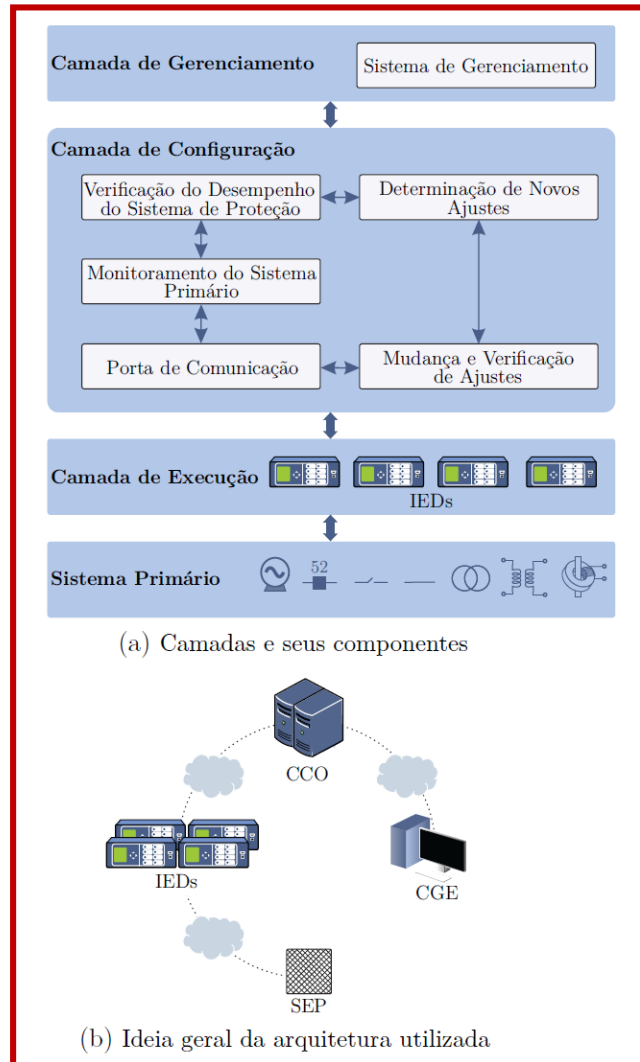


Camada de Gerenciamento (CGE)

- ▶ Detecção do estado da microrrede (normal ou ilhada): relé desub/sobrefrequência alocado junto ao GS;
- ▶ Detecção de entrada/saída de recursos distribuídos: A detecção de entrada ou saída das unidades geradoras ocorre a partir do monitoramento de dados digitais relativos ao *status* do disjuntor desses elementos; e
- ▶ Detecção do fechamento/abertura de chaves da microrrede: mudanças topológicas (ocorre a partir do monitoramento do *status* das mesmas).

Proteção Adaptativa

Microrredes

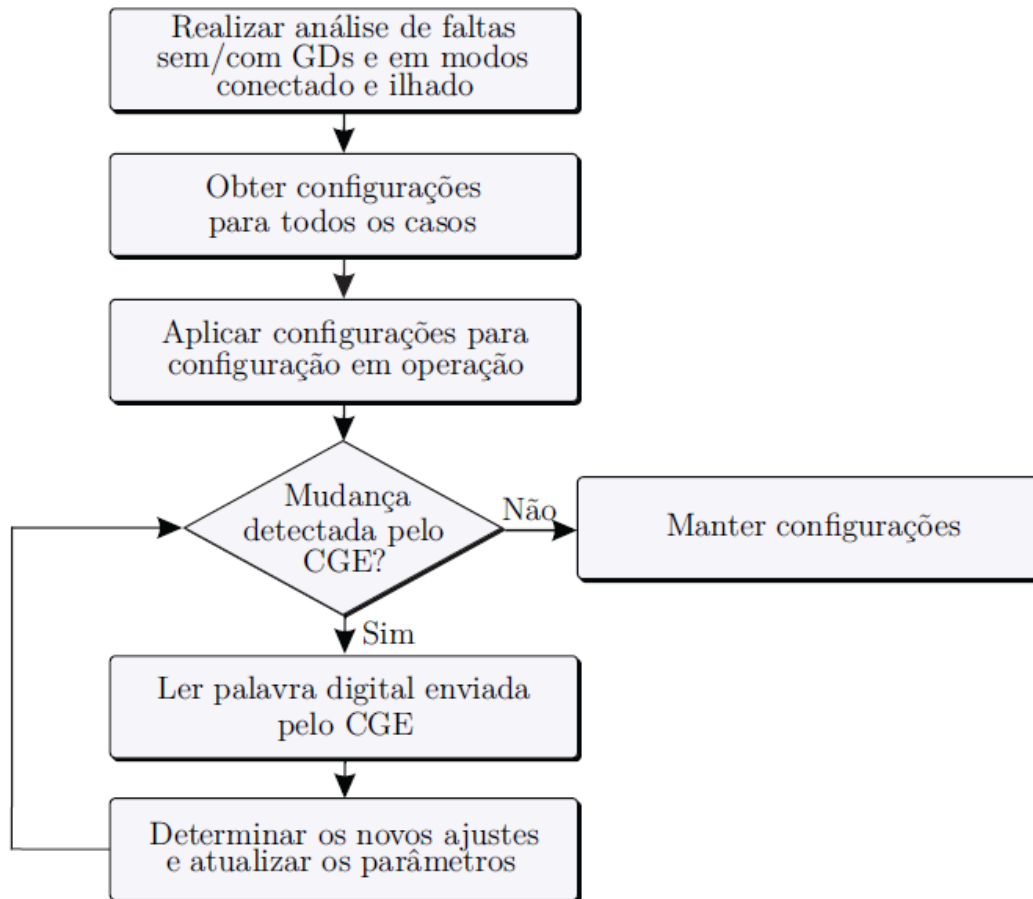


Camada de Configuração (CCO)

- Esta camada é responsável por receber informações do CGE referentes ao estado da microrrede, e com base nessas informações realizar as devidas mudanças nos ajustes dos dispositivos de proteção.
- Novas curvas, correntes de *pick-up* e múltiplos de tempo podem ser redefinidos.
- A interface entre as camadas de execução, configuração e gerenciamento pode ser baseada em protocolos de comunicação, tais como DNP3, Modbus, IEC60870-5 e IEC61850

Proteção Adaptativa

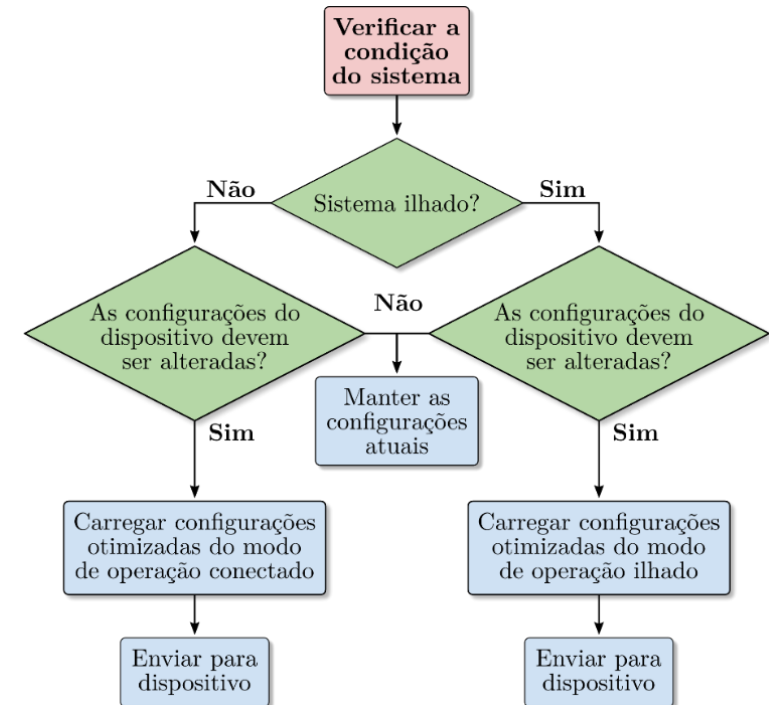
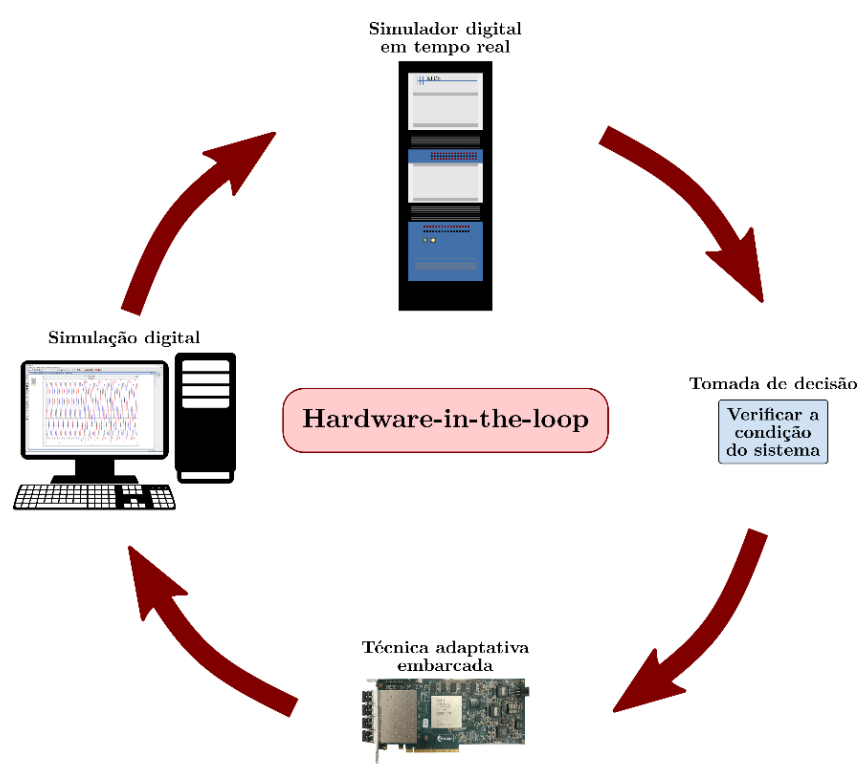
Microrredes



- Fluxograma representativo do processo de adaptação automática dos ajustes.

Proteção Adaptativa

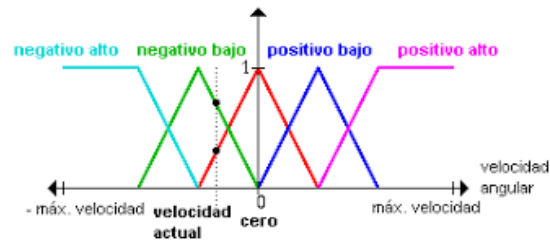
Microrredes



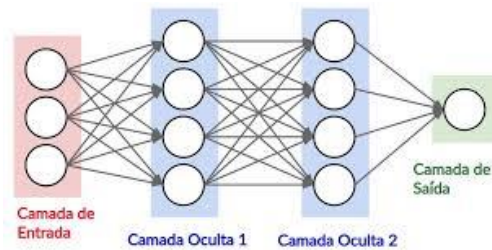
- ▶ A simulação em *hardware-in-the-loop* é uma técnica usada no desenvolvimento e teste de sistemas embarcados em tempo real. É usado um simulador digital em tempo real (RTDS™), bem como placas microprocessadas para que a lógica proposta seja embarcada.

Relés Inteligentes

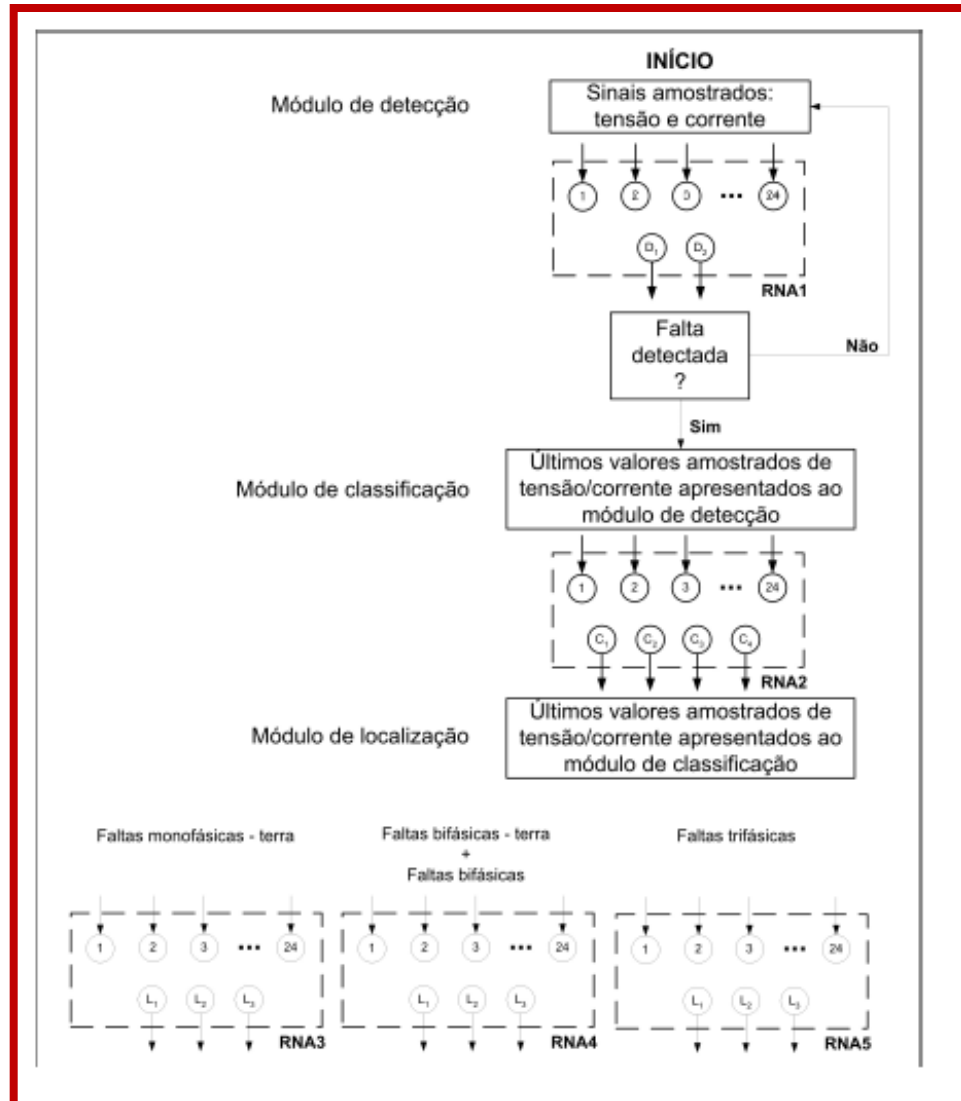
- **Lógica Fuzzy**



- **RNAs**



Relés Inteligentes usando RNAs



- Modelo geral para a proteção de distância aplicando-se RNAs.

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?

