

A Importância das Técnicas de Programação nos Sistemas Elétricos de Proteção

Francisco das Chagas Souza Júnior, M.Sc.

Instituto de Educação, Ciências e Tecnologia do Rio Grande do Norte

IFRN

Sistema de Proteção

- **O que é proteção de sistemas elétricos?**
 - Conjunto de equipamentos que detectam situações anormais nas redes elétricas;
 - Usam sinais de tensão, corrente, frequência, etc.

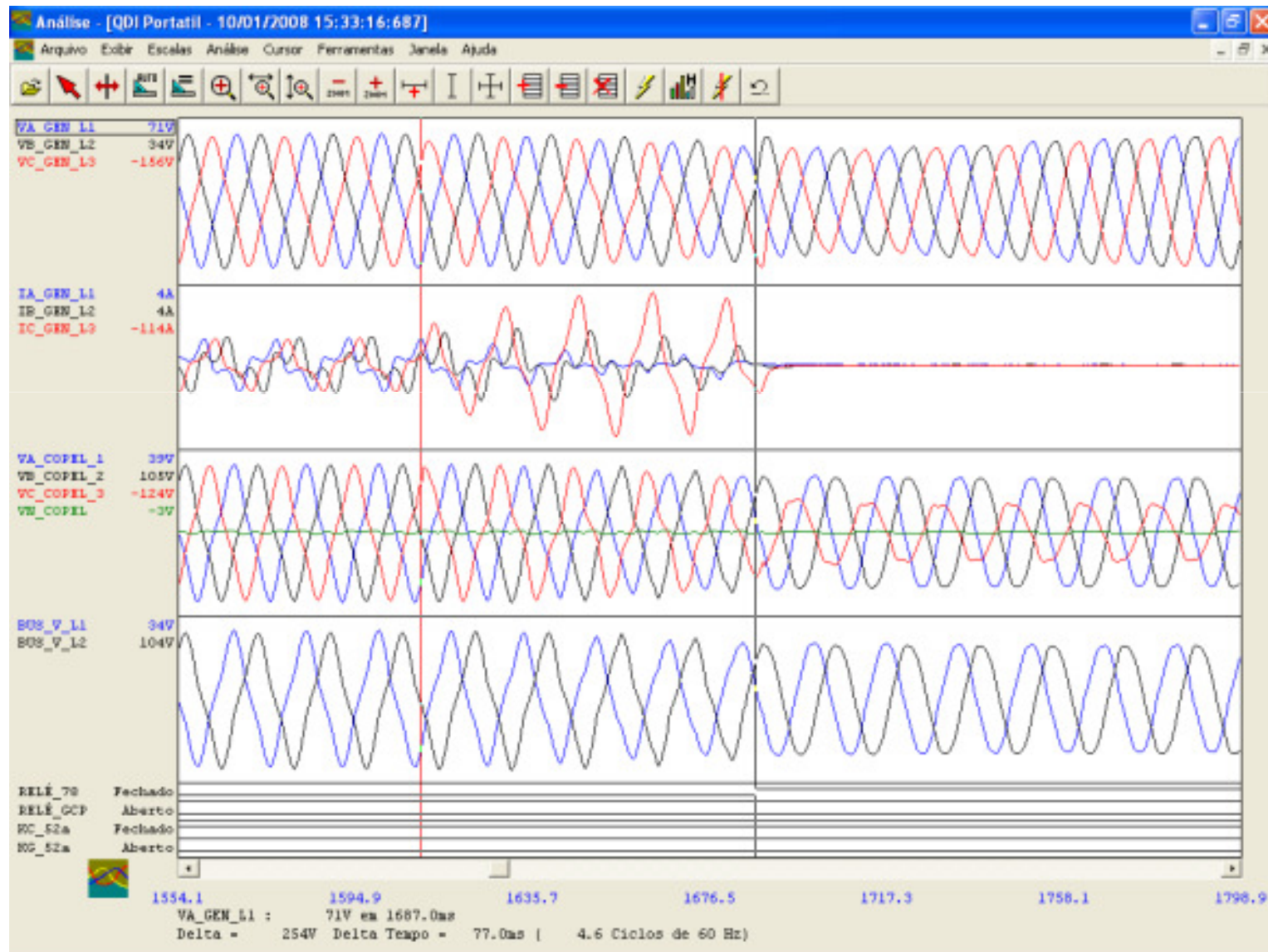
Sistema de Proteção

- Qual a função da proteção de sistemas elétricos?
 - Salvaguardar instalações e seus componentes bem como os usuários das mesmas.

Sistema de Proteção

- **Como atua a proteção de sistema elétricos?**
 - Deve atuar de maneira automática;
 - Em um tempo curto;
 - Eliminando a parte do sistema que apresenta falhas.

Sistema de Proteção



Sistema de Proteção

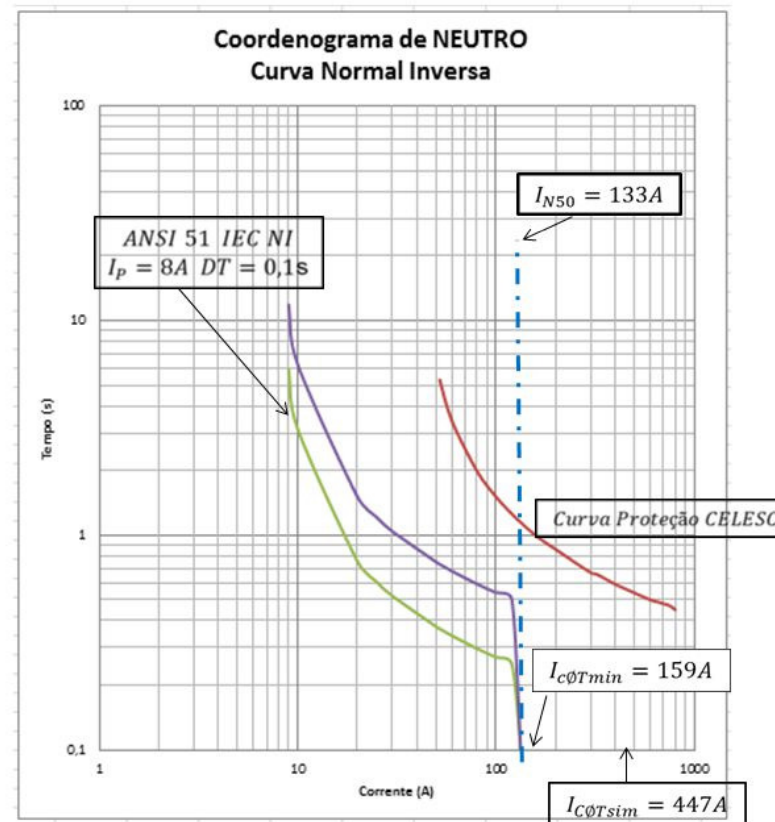
- De que é formado um sistema de proteção?
 - Dispositivos sensores de grandezas elétricas, tais como: tensão, corrente, entre outras;
 - Dispositivos seccionadores;
 - Dispositivos de comunicação.

Filosofia da Proteção

- **Tipos de proteção:**
 - Realizadas por meio de comparações entre os valores medidos e os ajustes, comumente chamados de *pick-up*:
 - Comparação de Magnitude;
 - Comparação de Distância;
 - Comparação de Diferencial.

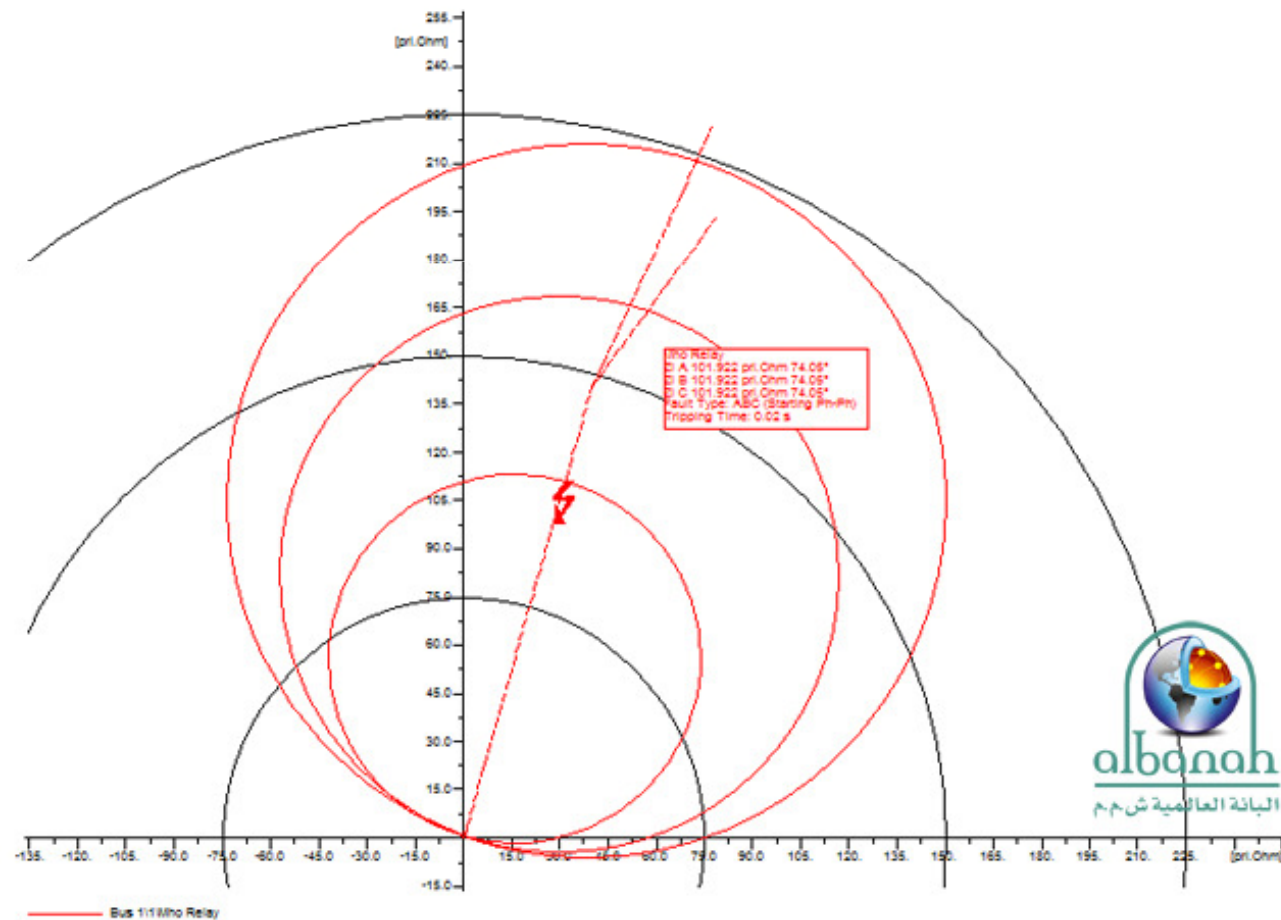
Filosofia da Proteção

- Tipos de proteção (Magnitude):



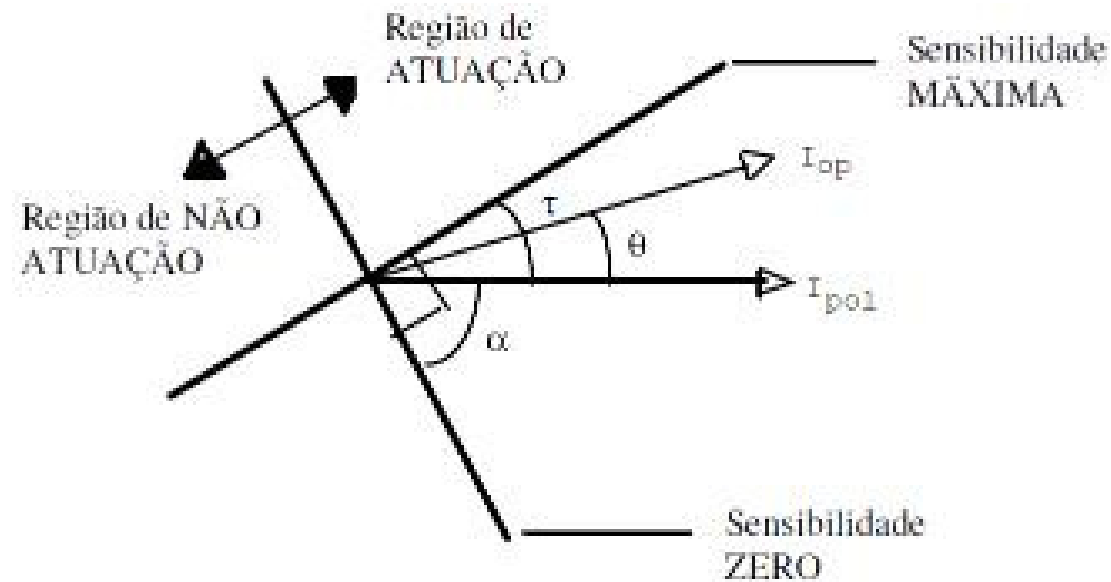
Filosofia da Proteção

- Tipos de proteção (Distância):



Filosofia da Proteção

- Tipos de proteção (Diferencial):



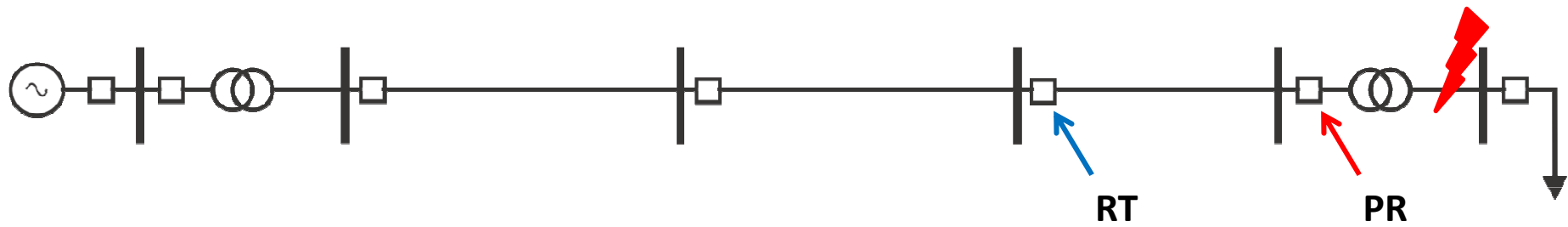
Filosofia da Proteção

- **Proteção principal/retaguarda:**
 - Proteção principal:
 - É a proteção mais rápida;
 - Deve desligar a menor parte possível do sistema.

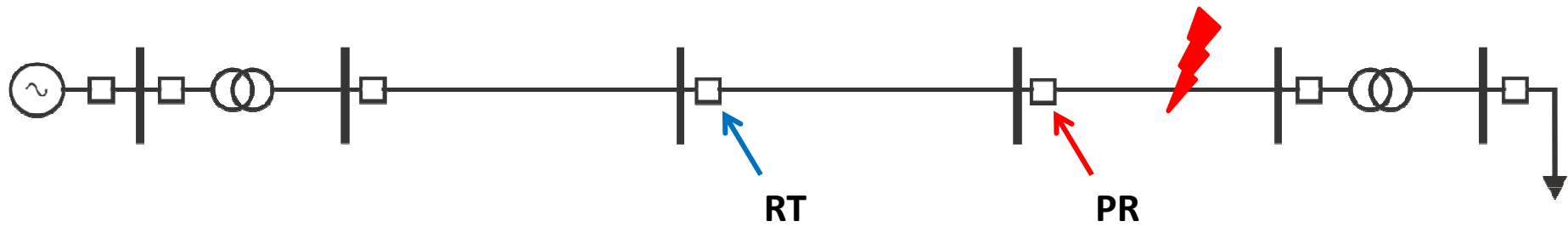
Filosofia da Proteção

- **Proteção principal/retaguarda:**
 - Proteção de retaguarda:
 - Deve atuar somente se a proteção principal falhar;
 - Quando atua, uma maior parte do sistema fica desenergizada.

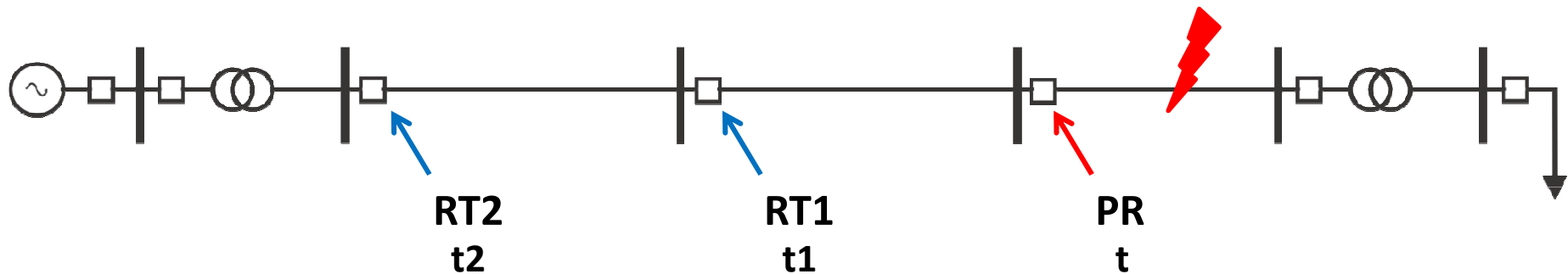
Filosofia da Proteção



Filosofia da Proteção



Filosofia da Proteção



Regra de Ouro da Proteção!!!

$$t < t_1 - \Delta t_1$$

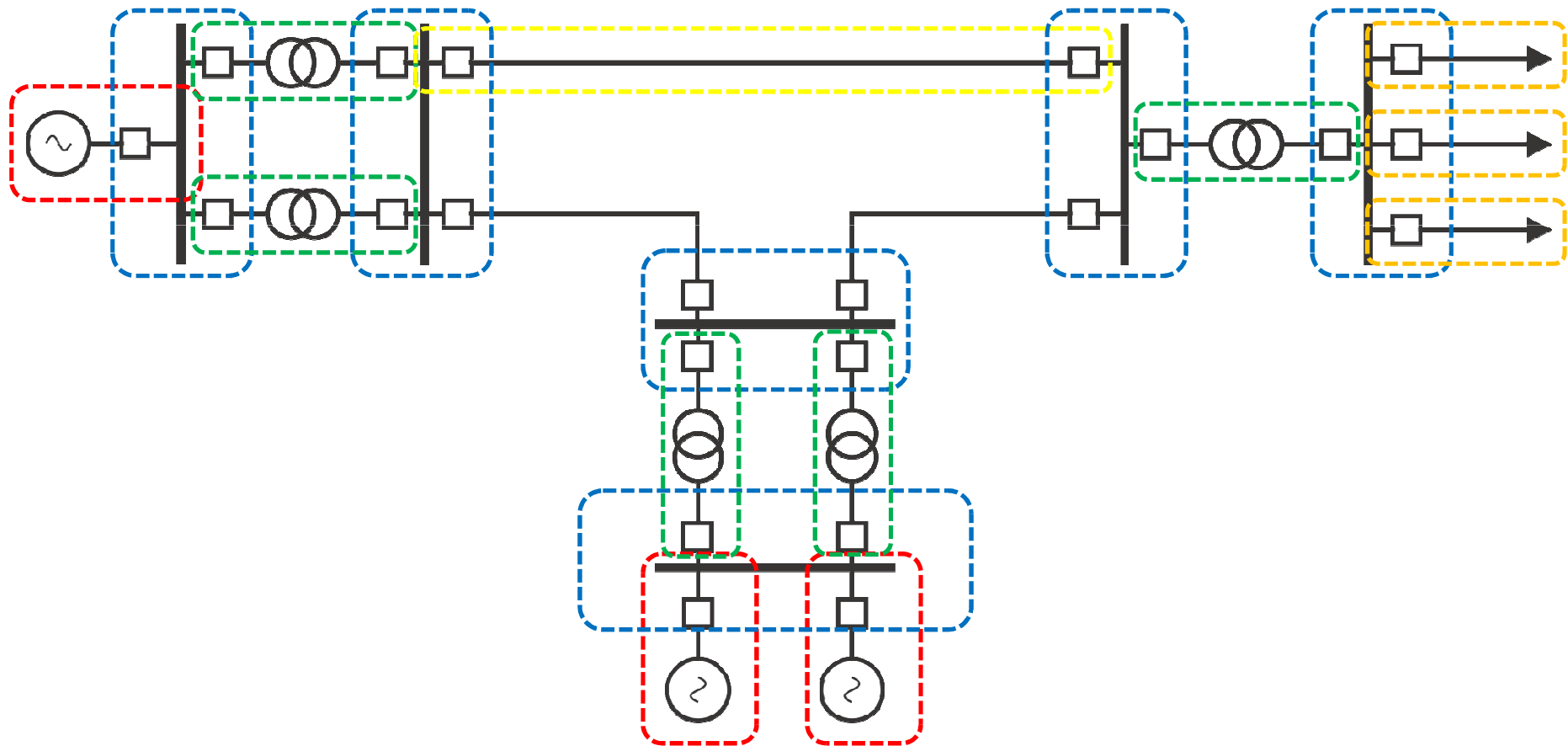
$$t_1 < t_2 - \Delta t_2$$

Filosofia da Proteção

- **Zonas de proteção:**
 - Cada relé deve ter sua região de atuação definida;
 - Todos os equipamentos do sistema devem fazer parte de pelo menos uma zona de proteção;

Filosofia da Proteção

- Zonas de proteção:



Filosofia da Proteção

- Quais são as características de um bom sistema de proteção?
 - **Confiabilidade:** Mede a habilidade do sistema de proteção atuar corretamente quando necessário e não atuar indevidamente;

Filosofia da Proteção

- Quais são as características de um bom sistema de proteção?
 - **Seletividade:** Os relés devem atuar apenas para faltas dentro das suas zonas de proteção;

Filosofia da Proteção

- Quais são as características de um bom sistema de proteção?
 - **Velocidade:** Quando detectada uma falha, o sistema deve isolá-la o mais rápido possível (normalmente 3 ciclos (>50 ms));

Sistema de Proteção

- Quem são os sensores que permitem que o sistema de proteção atue corretamente?
 - Elos fusíveis;
 - Relés.

Sistema de Proteção

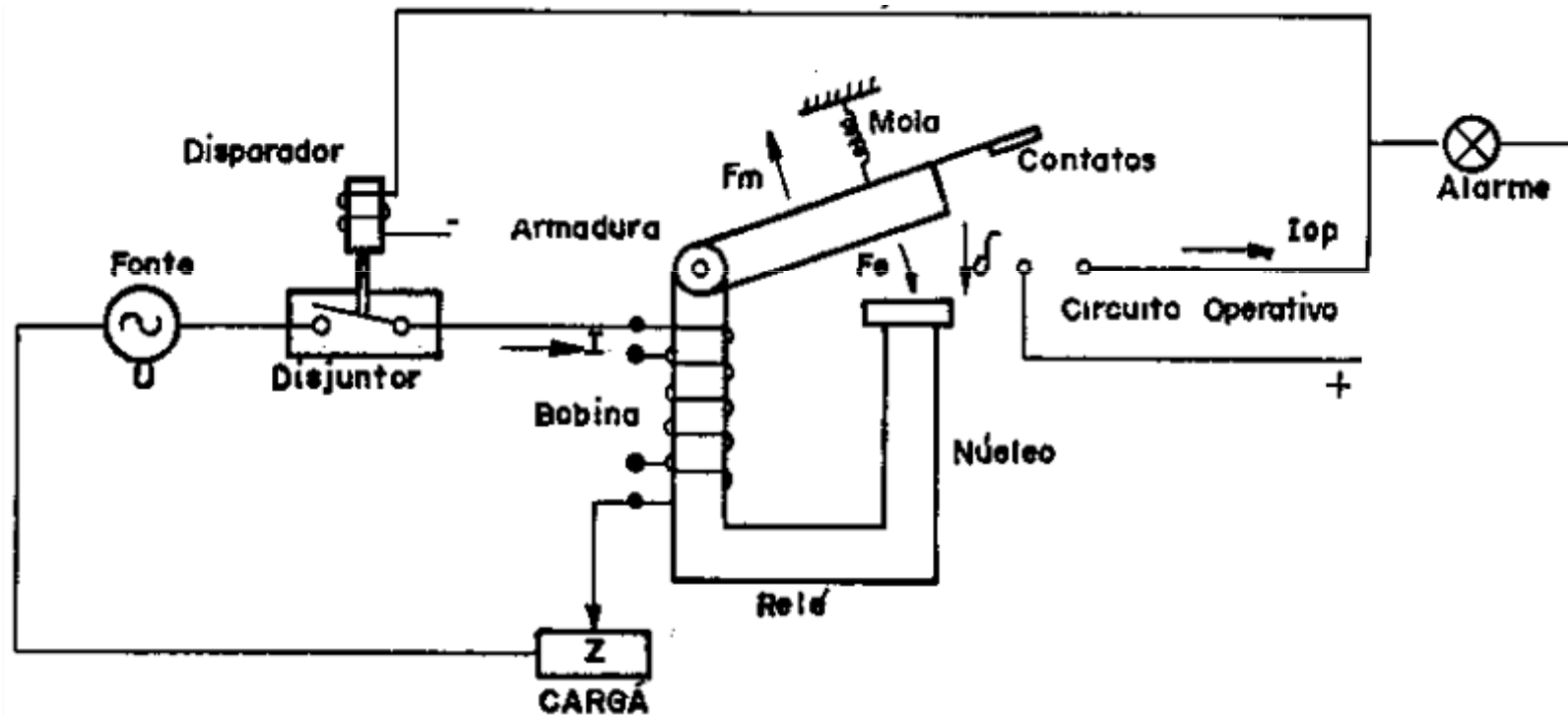
- **Histórico do desenvolvimento dos relés:**
 - **1901**: Primeiro dispositivo de proteção eletromecânico (relé de proteção de sobrecorrente do tipo indução);
 - **1908**: Princípio da proteção diferencial de corrente;
 - **1910**: Desenvolvimento das proteções direcionais;
 - **1930**: Desenvolvimento da proteção à distância;
 - **Década de 1930**: Surgimento dos relés à base de componentes eletrônicos (sem aceitação imediata devido aos eletromecânicos);
 - **1980**: Desenvolvimento de relés utilizando a tecnologia digital;

Sistema de Proteção

- **Relé eletromecânico:**
 - Atua de acordo com lei do eletromagnetismo, em especial com o princípio da indução.

Sistema de Proteção

- Relé eletromecânico:



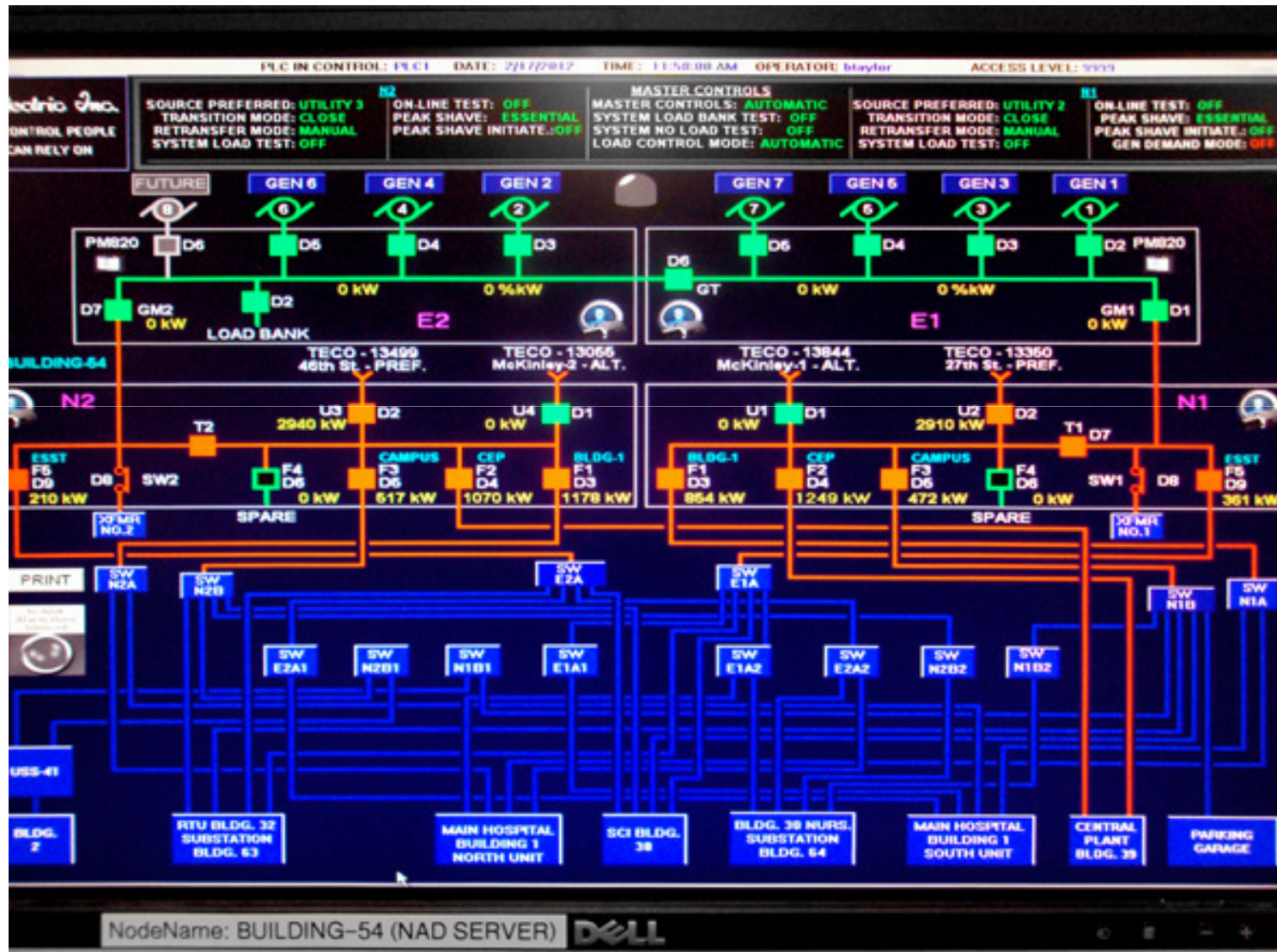
Sistema de Proteção

- **Relé digital:**
 - Baseado na análise de micro-controlador/microprocessador;
 - Apresenta as seguintes vantagens em relação aos relés eletromecânicos:
 - Alta confiabilidade;
 - Integração com os equipamentos da rede;
 - Realização de outras funções;
 - Permite comunicação e automação das relés elétricas.

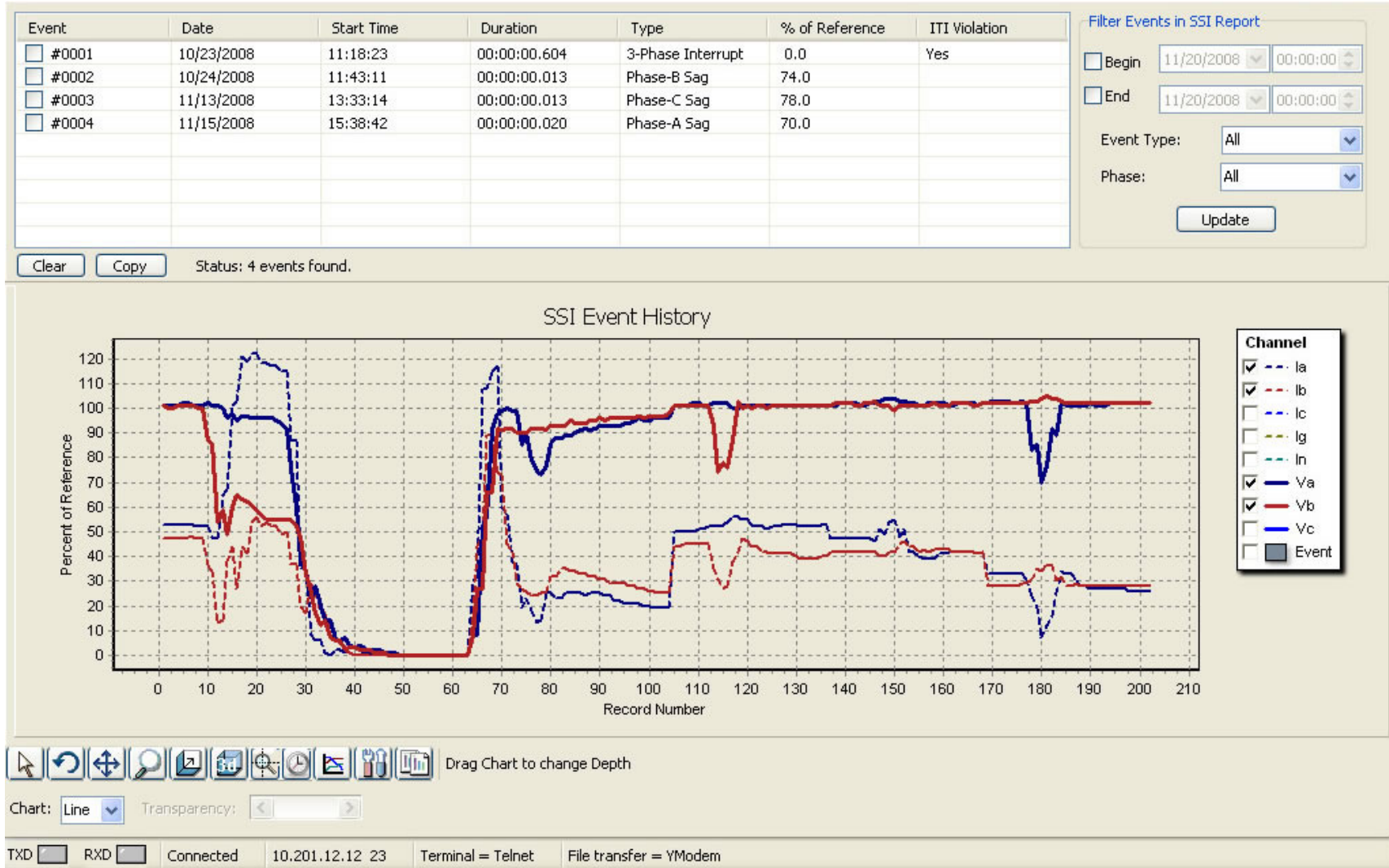
Sistema de Proteção



Sistema de Proteção



Sistema de Proteção



Sistema de Proteção

The screenshot displays the AcSELerator® QuickSet software interface. The main window is titled "Settings Editor - New Settings 1 (045-204-7-200-v0.2.2.0.2)". The left pane shows the "Device Manager" with a tree view of substation components, including "Mascara Substation" and "N. Mafra Substation". The central pane lists various settings categories, with "Load Enc" selected. The right pane, titled "Load Encroachment Element", displays the following settings:

Parameter	Value	Range
FLAD, Forward Load Impedance (Ohms secondary)	6.50	Range = 0.00 to 128.00
RLA, Reverse Load Impedance (Ohms secondary)	1.15	Range = 0.00 to 128.00
PLAP, Positive Forward Load Angle (degrees)	20.00	Range = -90.00 to 90.00
NLAP, Negative Forward Load Angle (degrees)	-48.21	Range = -90.00 to 90.00
PLAR, Positive Reverse Load Angle (degrees)	168.80	Range = -90.00 to 270.00
NLAR, Negative Reverse Load Angle (degrees)	211.24	Range = 90.00 to 270.00

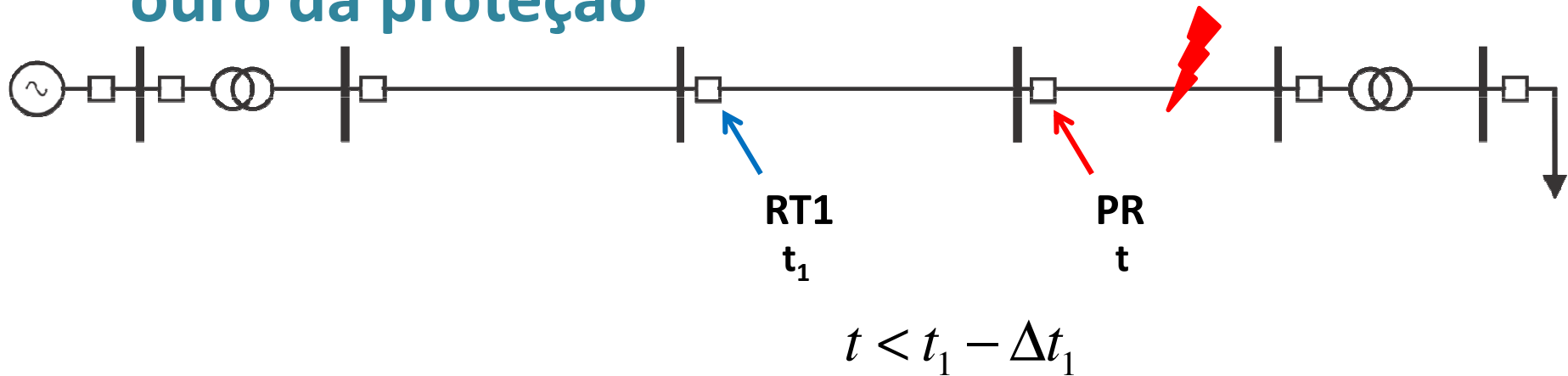
The "Graphical Settings Editor" window shows a plot with four red lines representing the load encroachment elements: FLAD, RLA, PLAP, and NLAR. The plot is divided into four quadrants by a horizontal and vertical axis. The lines are labeled with their respective parameters: FLAD (top-left), RLA (top-right), PLAP (bottom-left), and NLAR (bottom-right). The plot shows the relationship between the load impedance and the load angle for each element.

Filosofia da Proteção

- **Como fazer com que um sistema de proteção tenha as qualidades desejadas?**
 - Definir qual(is) função(ões) será(am) usada(s);
 - Realizar o estudo de coordenação e seletividade.

Estudo de Coordenação

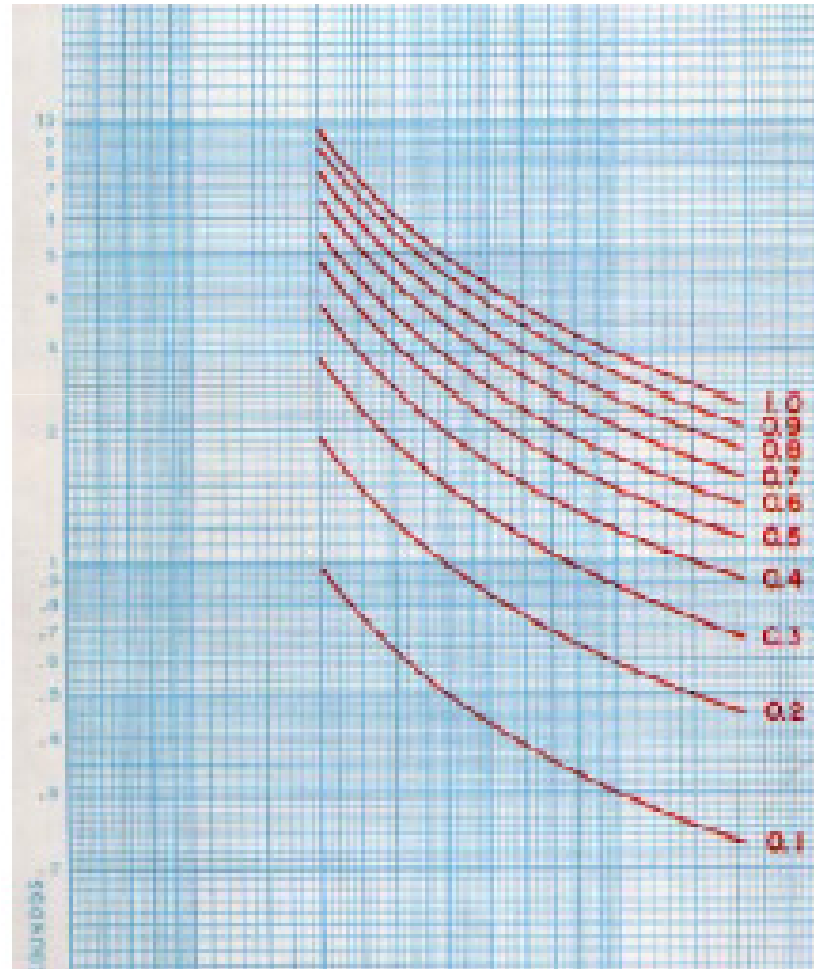
- Determinar os valores dos pick-ups dos relés de modo que seja respeitada a “regra de ouro da proteção”



Estudo de Coordenação

- **Relés de sobrecorrente:**
 - Unidade instantânea (função 50):
 - Atua para faltas próximo ao início do alimentador;
 - Envia o sinal para abertura do disjuntor assim que a falta é detectada;
 - Unidade temporizada (função 51):
 - Atua com um atraso em relação ao instante de detecção da falta.

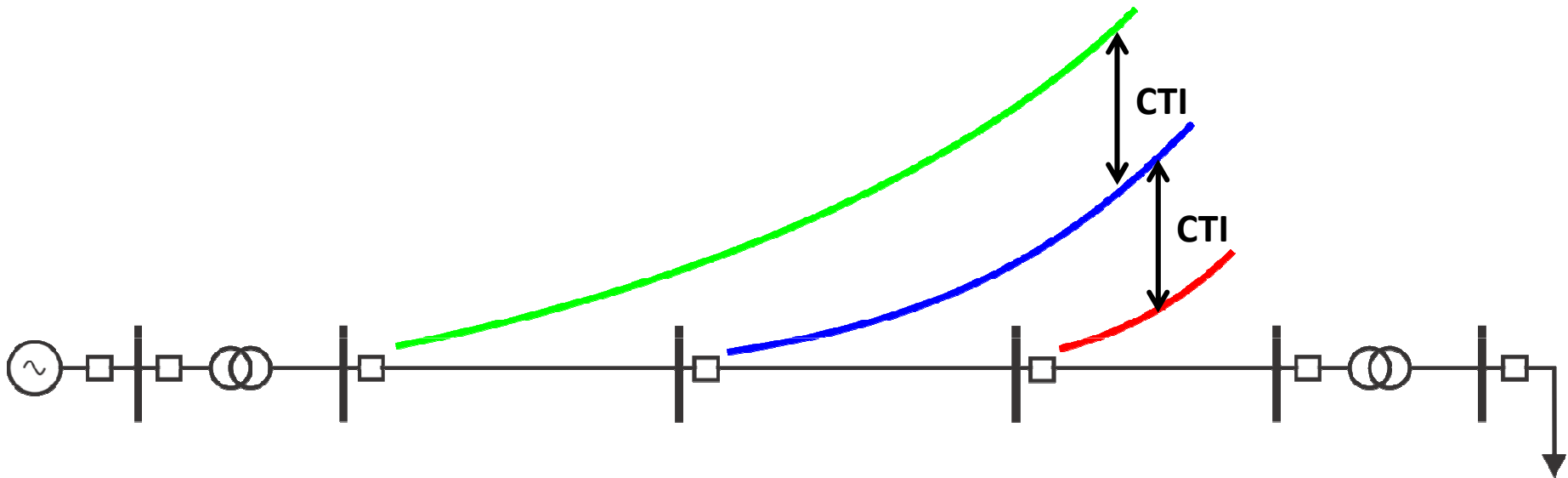
Estudo de Coordenação



Estudo de Coordenação

- **Como ajustar a unidade temporizada de um relé de sobrecorrente?**
 - Determinação da relação de transformação dos TC's;
 - Determinação das correntes de pick-up;
 - Determinação da curva característica do relé.

Estudo de Coordenação



Estudo de Coordenação

- **Determinação da relação de transformação dos TC's:**

$$I_{NP} \geq \frac{I_{CC_{MAX}}}{FS}$$

- FS (Fator de sobrecorrente), geralmente igual a 20
- **Valores comerciais de corrente do primário:**
 - 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1200, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000.

Estudo de Coordenação

- Determinação da corrente de pick-up:

$$\frac{k_a \times \sum I_{CARGA_{MAX}}}{RTC} \leq I_{pick-up} \leq \frac{I_{2\phi_{FINALDOTRECHO}}}{RTC}$$

$$k_a = \left(1 + \frac{a\%}{100}\right)^n$$

- k_a – fator de crescimento da carga a $a\%$ em n anos.

Estudo de Coordenação

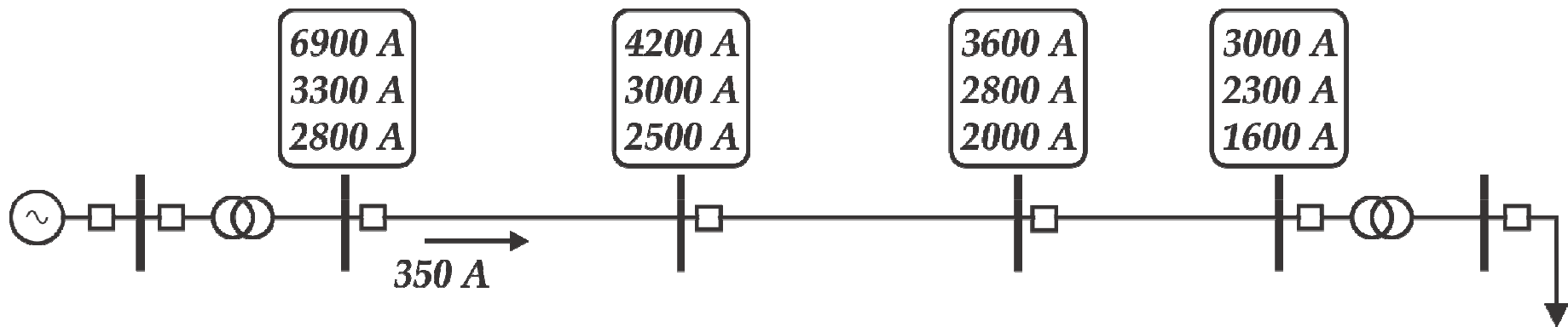
- Definição da curva de atuação dos relés:

$$t = \frac{k_1 \times TDS}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^{k_2} - 1}$$

- k_1 e k_2 – Dependem do tipo de curva (normal inversa, muito inversa, extremamente inversa);
- TDS – *Time Dial Setting*

Estudo de Coordenação

- Exemplo:



Estudo de Coordenação

- Exemplo:

- RTC:

$$I_{NP(R1)} \geq \frac{6900}{20} = 345A \rightarrow 400A$$

$$RTC_{R1} = 80:1$$

$$I_{NP(R2)} \geq \frac{4200}{20} = 210A \rightarrow 250A$$

$$RTC_{R2} = 50:1$$

$$I_{NP(R3)} \geq \frac{3600}{20} = 180A \rightarrow 200A$$

$$RTC_{R4} = 40:1$$

Estudo de Coordenação

- Exemplo:

- Corrente de pick-up:

$$\frac{1,6 \times 350}{80} \leq I_{pick-up} \leq \frac{3000}{80} \Rightarrow R1: 8A$$

$$\frac{1,6 \times 350}{50} \leq I_{pick-up} \leq \frac{2800}{50} \Rightarrow R1: 12A$$

$$\frac{1,6 \times 350}{40} \leq I_{pick-up} \leq \frac{2300}{40} \Rightarrow R1: 15A$$

Estudo de Coordenação

- Exemplo:

- *E as curvas características???*
- Baseadas na equação do tempo de atuação dos relés de sobrecorrente e na “regra de ouro da proteção”;
- Difícil solução por não ser linear.

Estudo de Coordenação

- Exemplo:
 - *E agora??? O que fazer???*

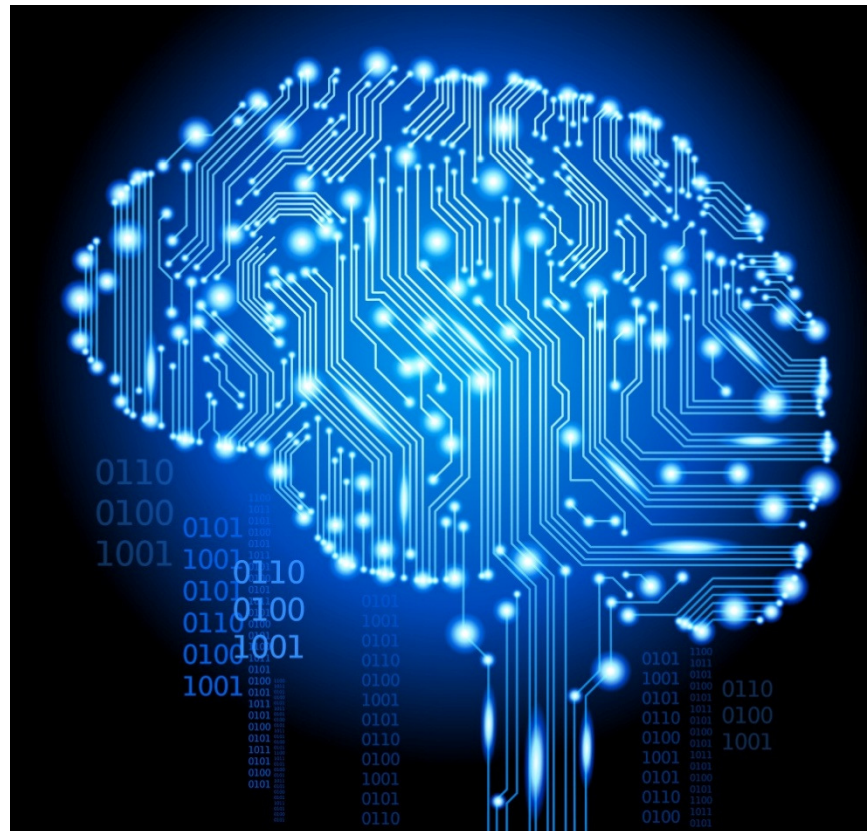


Estudo de Coordenação

- **Exemplo:**
 - Resolução gráfica do problema
 - Demorada e propícia a erros
 - Uso de técnicas de inteligência artificial!!!
 - Colocar os dados de entrada e esperar que o algoritmo resolva o problema.

Estudo de Coordenação / Técnicas de Inteligência Artificial

- **Inteligência Artificial:**
 - Tentativa de dotar máquinas de inteligência.



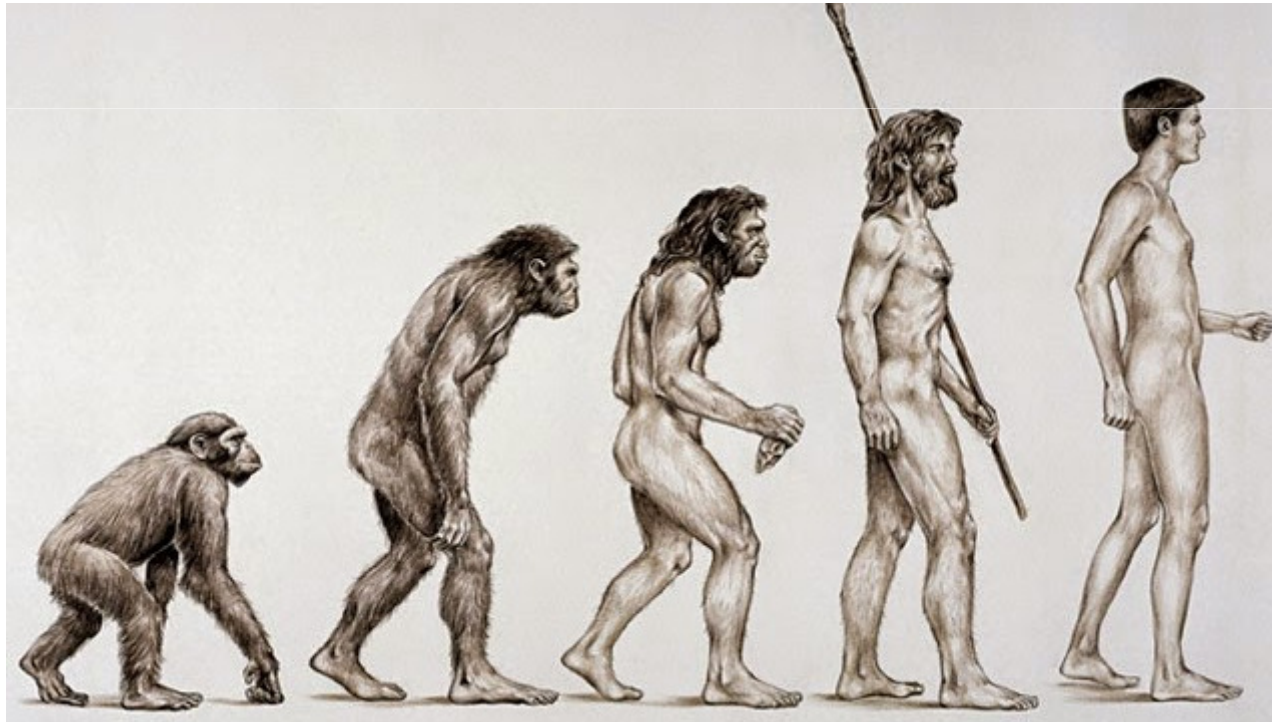


Estudo de Coordenação / Técnicas de Inteligência Artificial

- **Inteligência Artificial:**
 - Baseada nos próprios seres humanos ou em indivíduos que vivem em grupos, como: abelhas, formigas, pássaros, ou em mecanismos que ocorrem na natureza, como a evolução/adaptação.

Estudo de Coordenação / Técnicas de Inteligência Artificial

- **Algoritmos Genéticos:**
 - Baseado na teoria da evolução de *Charles Darwin*;



Estudo de Coordenação / Técnicas de Inteligência Artificial

- **Algoritmos Genéticos:**

- As soluções são codificadas em *indivíduos*, compostos por *cromossomos*;
- Mecanismos que simulam ações da natureza são utilizados;

Estudo de Coordenação / Técnicas de Inteligência Artificial

- **Algoritmos Genéticos:**
 - Todos os *indivíduos* são analisados e classificados conforme o seu grau de adaptabilidade ao problema durante um certo número de *gerações* (iterações);

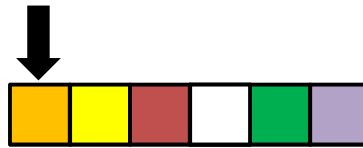
Estudo de Coordenação / Técnicas de Inteligência Artificial

- O AG não precisa ter conhecimento especialista sobre o problema ao qual se propõe;
- A escolha da função que analisa a adaptação dos *indivíduos*, e o tipo de codificação, constituem uma das partes mais importantes na elaboração do AG;
- Não há regras gerais para a formulação da função de aptidão.

Estudo de Coordenação / Técnicas de Inteligência Artificial

- Operações Genéticas:

- **Mutação**: alteração do valor de um dos *genes* de um determinado *indivíduo*;



```
%Mutacao
for i=1:round(taxaMutacao*num_popInicial)
    %Escolhe o individuo
    mutante = round(1 + (size(populacao,1)-1)*rand());

    %Gene a ser mutado
    gene = round(1 + (tam_cromossomo - 1)*rand());

    if(gene <= num_reles)
        populacao(mutante, gene) = round(1 + 2*rand());
    else
        populacao(mutante, gene) = round(1 + 9*rand());
    end
end
```

Estudo de Coordenação / Técnicas de Inteligência Artificial

- **Cruzamento**: dois *indivíduos* são escolhidos ao acaso para formarem novos *indivíduos* portadores da junção do material genético dos *pais*;



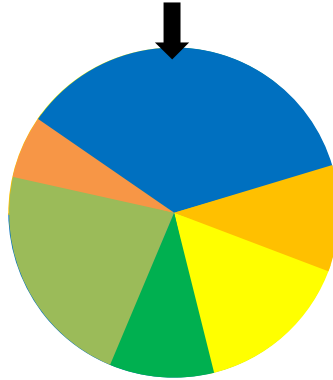
```
%Cruzamento
while i <= 2*round(taxaCrescimento*num_popInicial)
    %Escolhe os Pais
    pai1 = populacao(round(1 + (num_popInicial-1)*rand()),:);
    pai2 = populacao(round(1 + (num_popInicial-1)*rand()),:);

    %Ponto de corte
    corte = round(1 + (tam_cromossomo-1)*rand());

    %Salva novo indivíduo na população
    populacao(num_popInicial + i,:) = [pai1(1:corte) pai2(corte+1:tam_cromossomo)];
    i = i + 1;
    populacao(num_popInicial + i,:) = [pai2(1:corte) pai1(corte+1:tam_cromossomo)];
    i = i + 1;
end
```

Estudo de Coordenação / Técnicas de Inteligência Artificial

- **Seleção**: escolhe dos *indivíduos* que serão passados a *gerações* seguintes.



X



Estudo de Coordenação / Técnicas de Inteligência Artificial

– Seleção:

```
%Torneio
for i=1:2*round(taxaCrescimento*num_popInicial)
    individuo1 = 0;
    individuo2 = 0;
    while (individuo1 == individuo2)
        individuo1 = 1 + round(rand()*(size(populacao, 1) - 1));
        individuo2 = 1 + round(rand()*(size(populacao, 1) - 1));
    end

    if(FO(individuo1) > FO(individuo2))
        populacao(individuo1, :) = [];
        FO(individuo1) = [];
    else
        populacao(individuo2, :) = [];
        FO(individuo2) = [];
    end
end
end
```

Estudo de Coordenação / Técnicas de Inteligência Artificial

- Voltando ao exemplo...
 - Como usar Algoritmos genéticos para resolver o problema proposto???



Estudo de Coordenação / Técnicas de Inteligência Artificial

- Codificação dos indivíduos (possíveis soluções)
 - Pretende-se determinar a curva característica e o TDS dos relés;
 - Codificação proposta:



Curva

TDS

```
%Cria população inicial
]for i=1:num_popInicial
    TDS      = round(1 + 9*rand(1, num_reles));
    curva    = round(1 + 2*rand(1, num_reles));
    populacao(i,:) = [curva TDS];
-end
```


Estudo de Coordenação / Técnicas de Inteligência Artificial

- **Avaliação das possíveis soluções:**
 - Testar a coordenação para faltas trifásicas no “pé” do relé e bifásicas a jusante do mesmo

$$f = T_1 + \sum_{j=1}^{n-1} [(T_{j+1} - T_j) - \Delta t_1]^2 + \sum_{j=1}^{n-1} [(t_{j+1} - t_j) - \Delta t_2]^2$$

```
for i=1:size(populacao,1)
    tttotal(i) = 0;
    dTbf(i) = 0;
    dTmf(i) = 0;
    for j=1:num_pares
        tttotal(i) = tttotal(i) + tbf(i,j); % + tmf(i,j);
        dTbf(i) = dTbf(i) + (tbf_retaguard(i,j) - tbf_principal(i,j) - CTI)^2;
        dTmf(i) = dTmf(i) + (tmf_retaguard(i,j) - tmf_principal(i,j) - CTI)^2;
    end
end

%Função Objetivo
%Soma dos tempos de atuação dos reles principais com os tempos de
%coordenação
for i=1:size(populacao,1)
    FO(i) = tttotal(i) + dTbf(i) + dTmf(i);
end
```

Estudo de Coordenação / Técnicas de Inteligência Artificial

- Voltando ao exemplo...

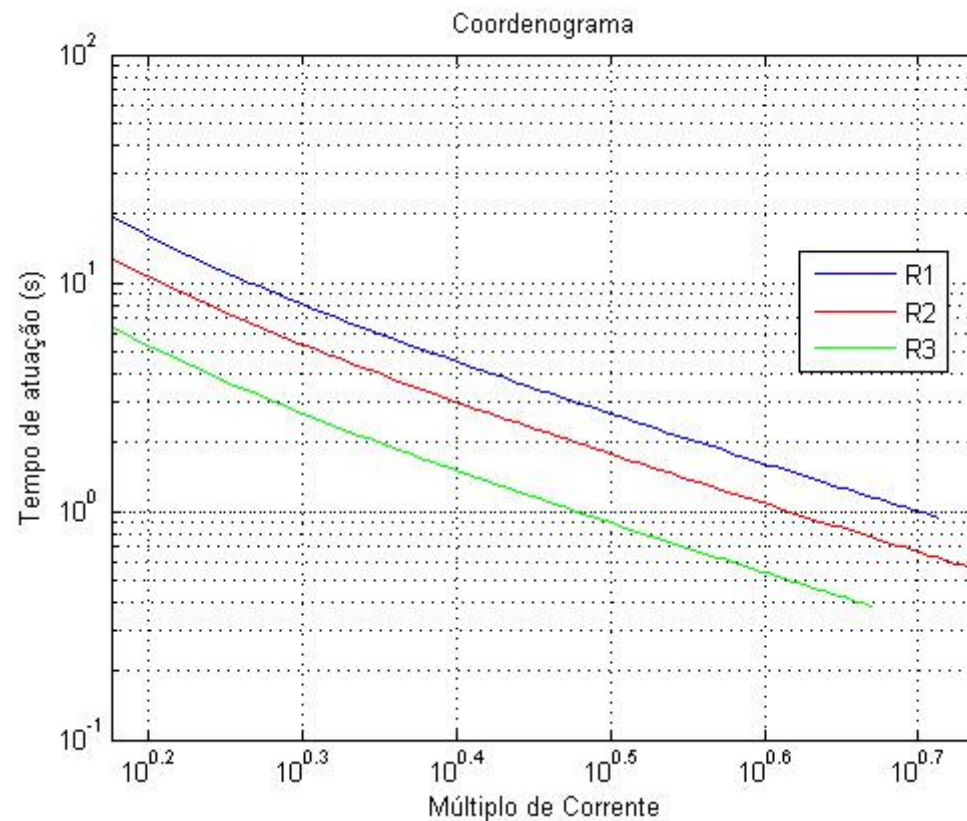
- Resultado obtido:

`ans =`

`3 3 3 3 2 1`

Estudo de Coordenação / Técnicas de Inteligência Artificial

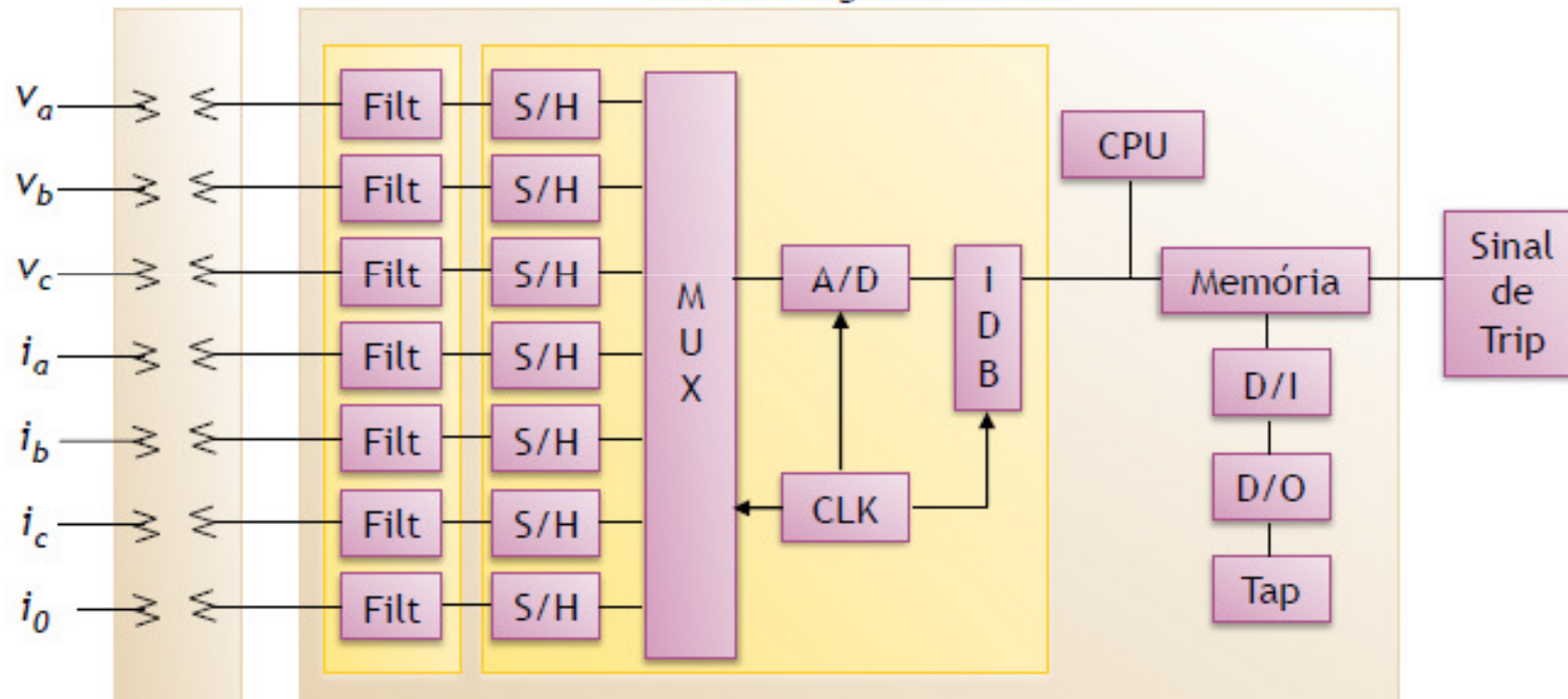
- Voltando ao exemplo...
 - Resultado obtido:



Proteção Digital

Unidade auxiliar
de transformação

Unidade Digital do Relé



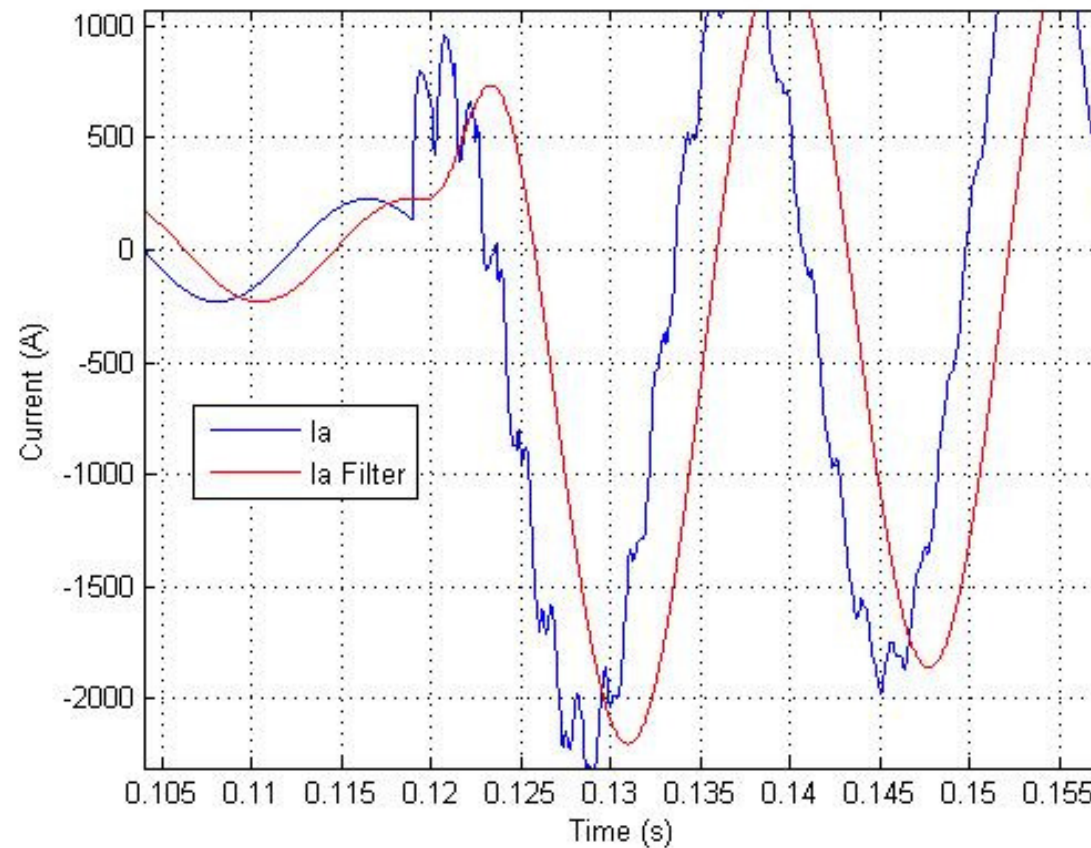
Proteção Digital

- **Filtro**

- Sinais de tensão e corrente apresentam grande nível de distorção devido a natureza transitória das faltas

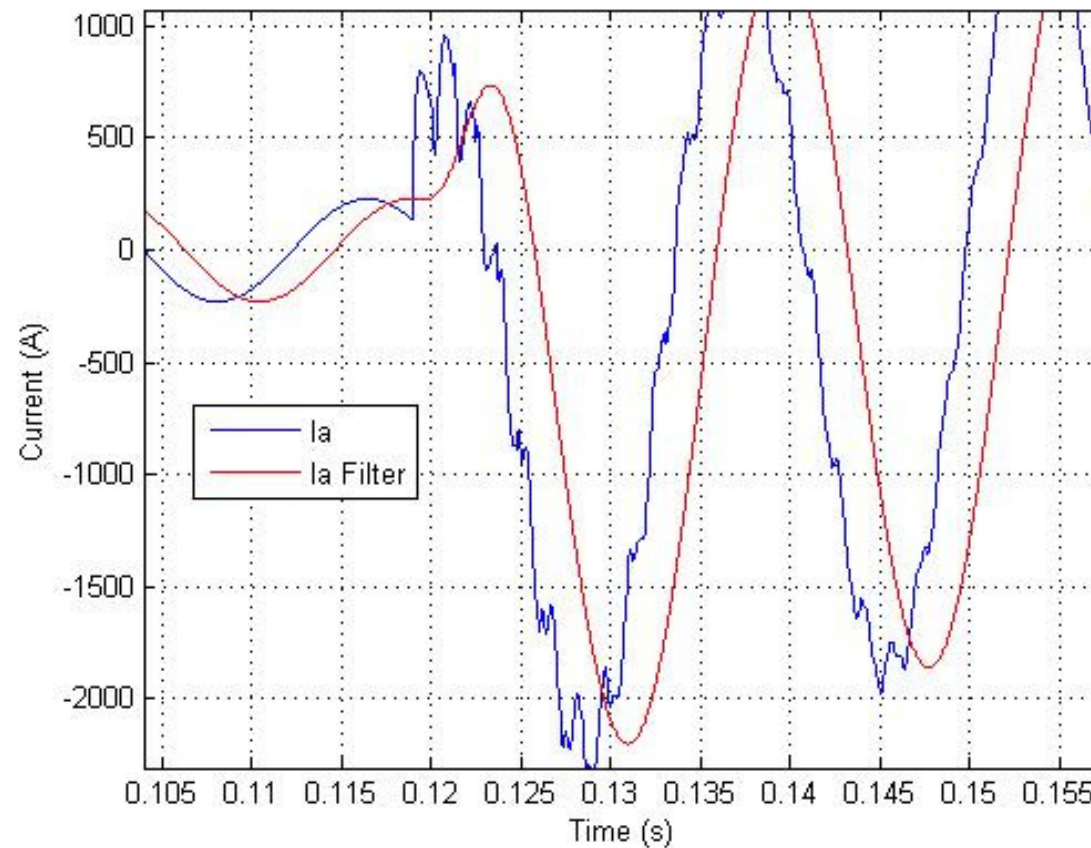
Proteção Digital

- Filtro



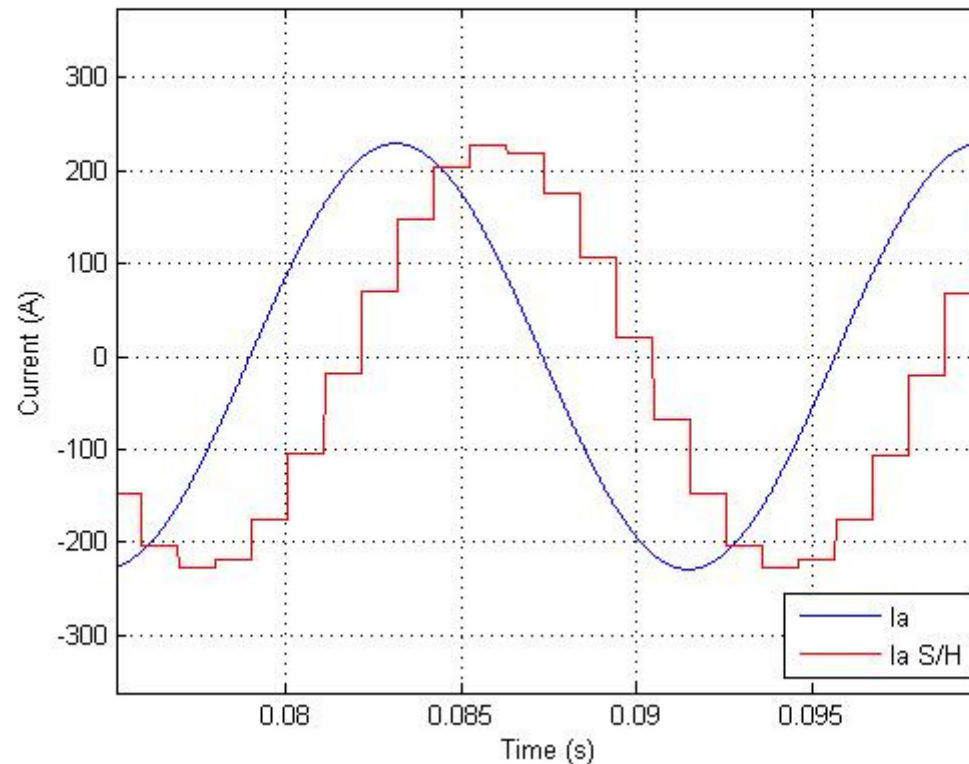
Proteção Digital

- Filtro



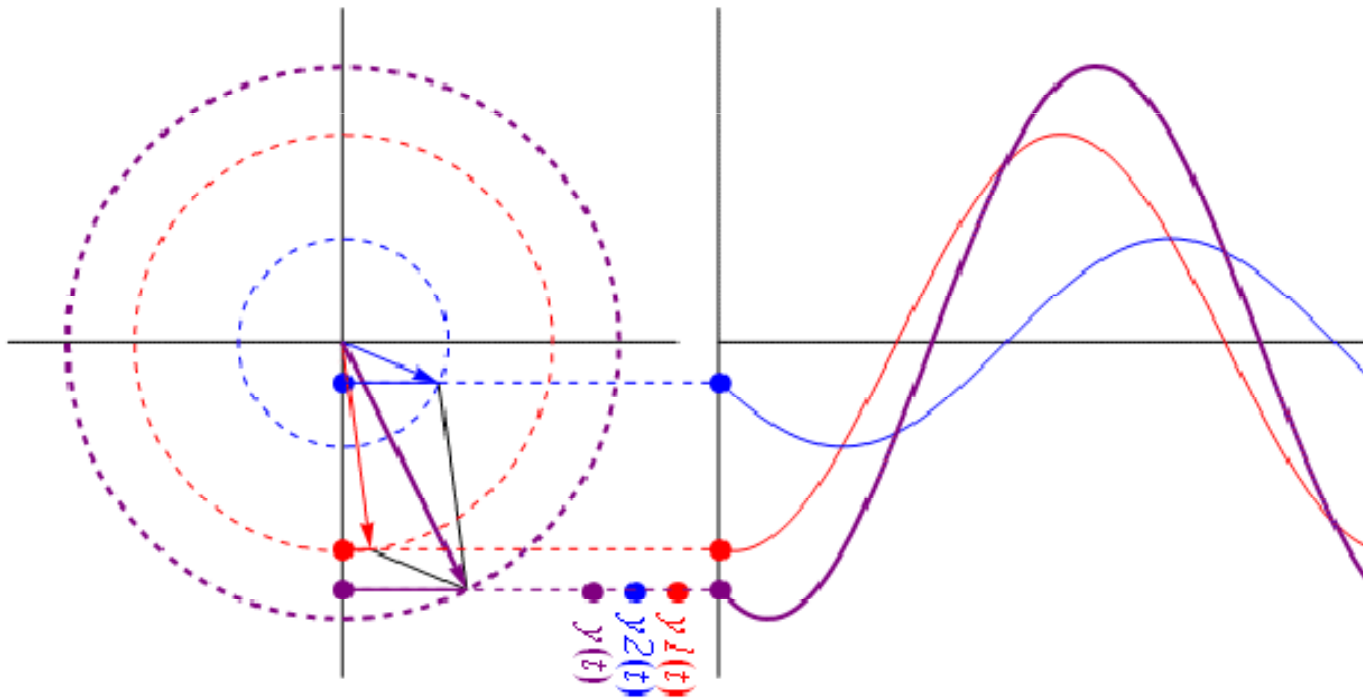
Proteção Digital

- Amostragem do sinal:
 - O micro processador é um dispositivo digital;
 - Taxa de amostragem de 16 amostras/ciclo.



Proteção Digital

- **Estimação de fasores:**
 - Processo matemático que permite saber a amplitude e a fase de um sinal alternado;



Proteção Digital

- Estimação de fasores:
 - Existem várias técnicas para estimação fasorial

$$X_{REAL} = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m \cos\left(\frac{2\pi}{N}m\right)$$

$$X_{IMAG} = -\frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m \text{sen}\left(\frac{2\pi}{N}m\right)$$

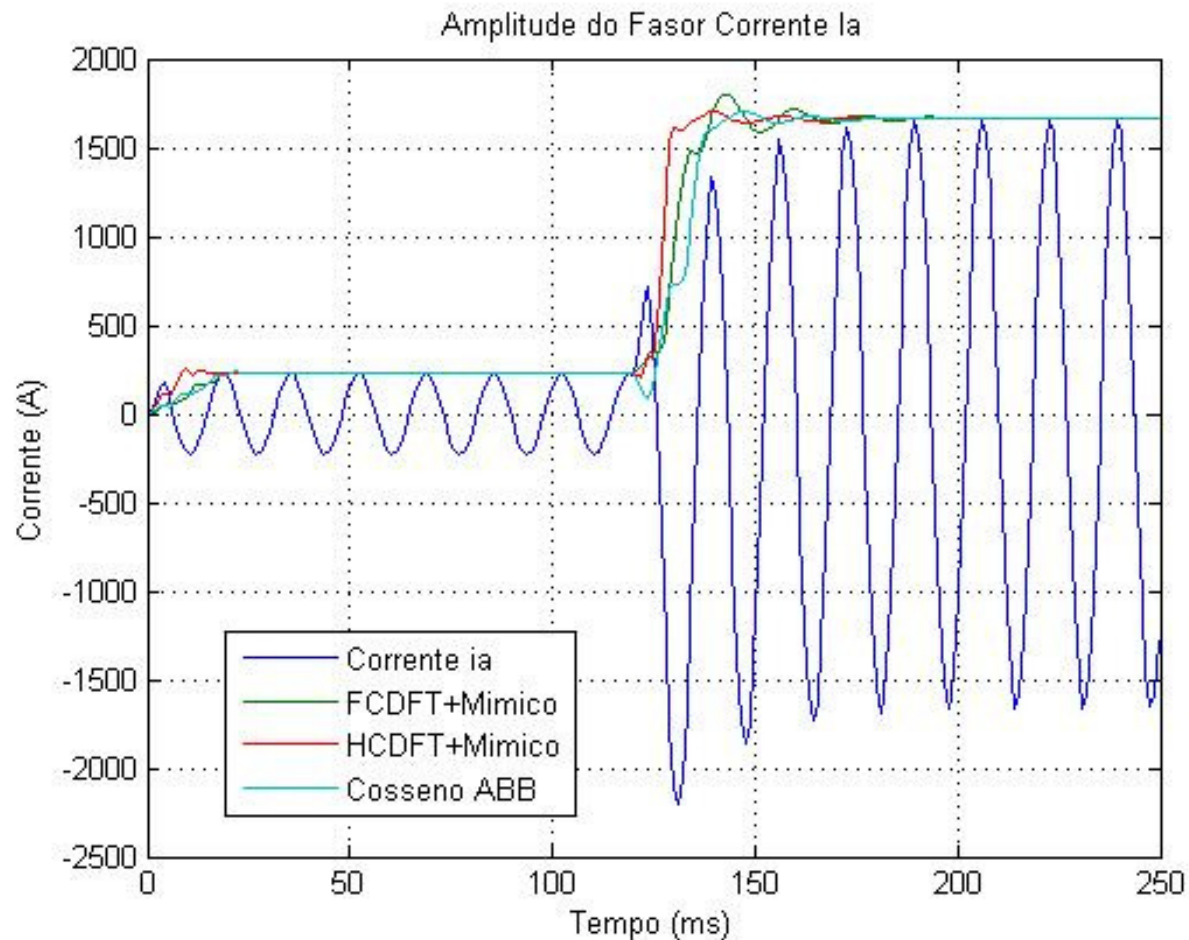
```
Xreal = 0;  
Ximag = 0;
```

```
for m=1:(N-1)  
    Xreal = Xreal + x(m) *cos(2*pi*m/N);  
    Ximag = Ximag - x(m) *sin(2*pi*m/N);  
end
```

```
ModX = sqrt(Xreal^2 + Ximag^2);  
FasX = atan(Ximag/Xreal);
```

Proteção Digital

- Estimação de fasores:



Proteção Digital

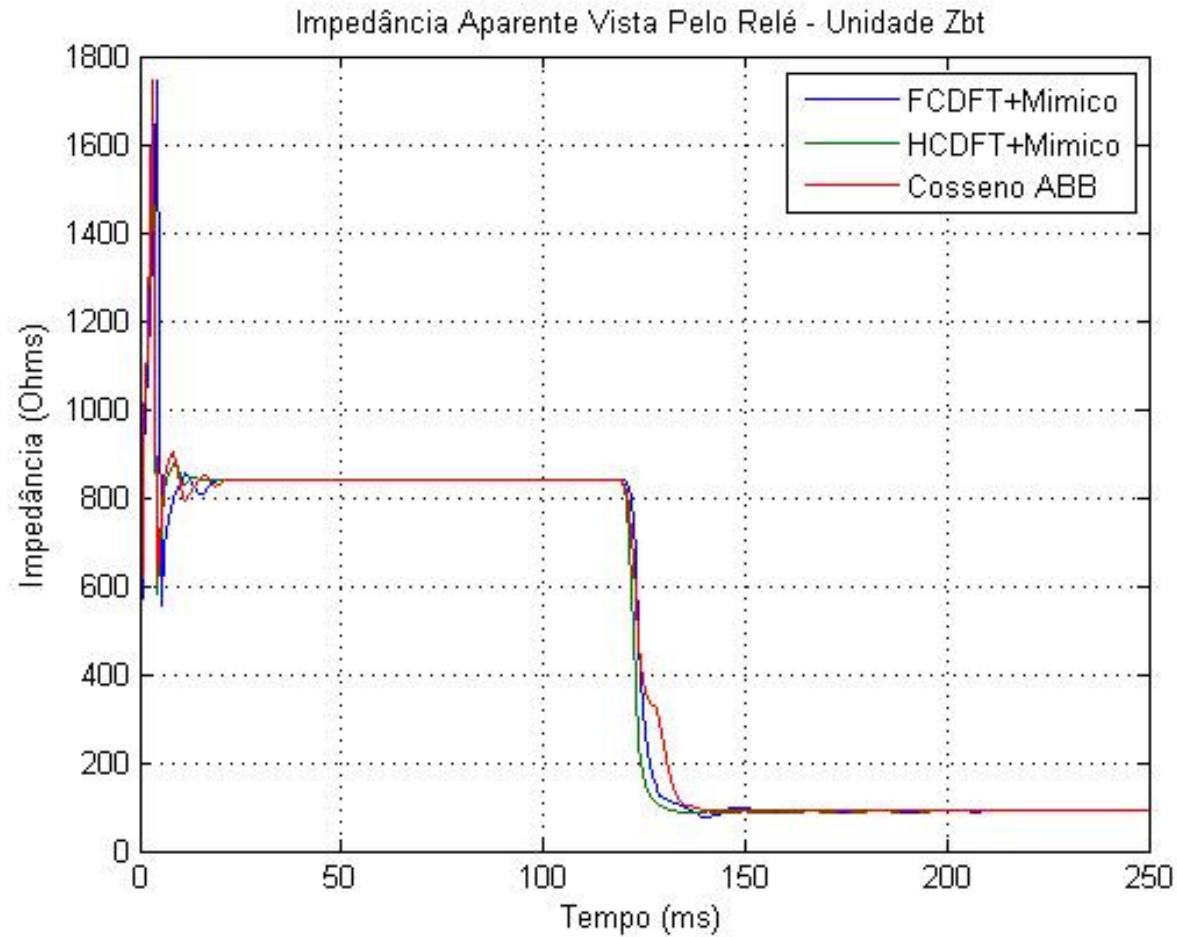
- De posse dos fasores de tensão e corrente, o relé pode analisar os dados de entrada e diferenciar entre um evento normal e uma situação de falta.

Proteção Digital

- **Proteção de Distância:**
 - Estima, baseado na impedância da rede, em qual local ocorreu a falta;
 - Utiliza comparadores de módulo e de fase do na impedância medida;

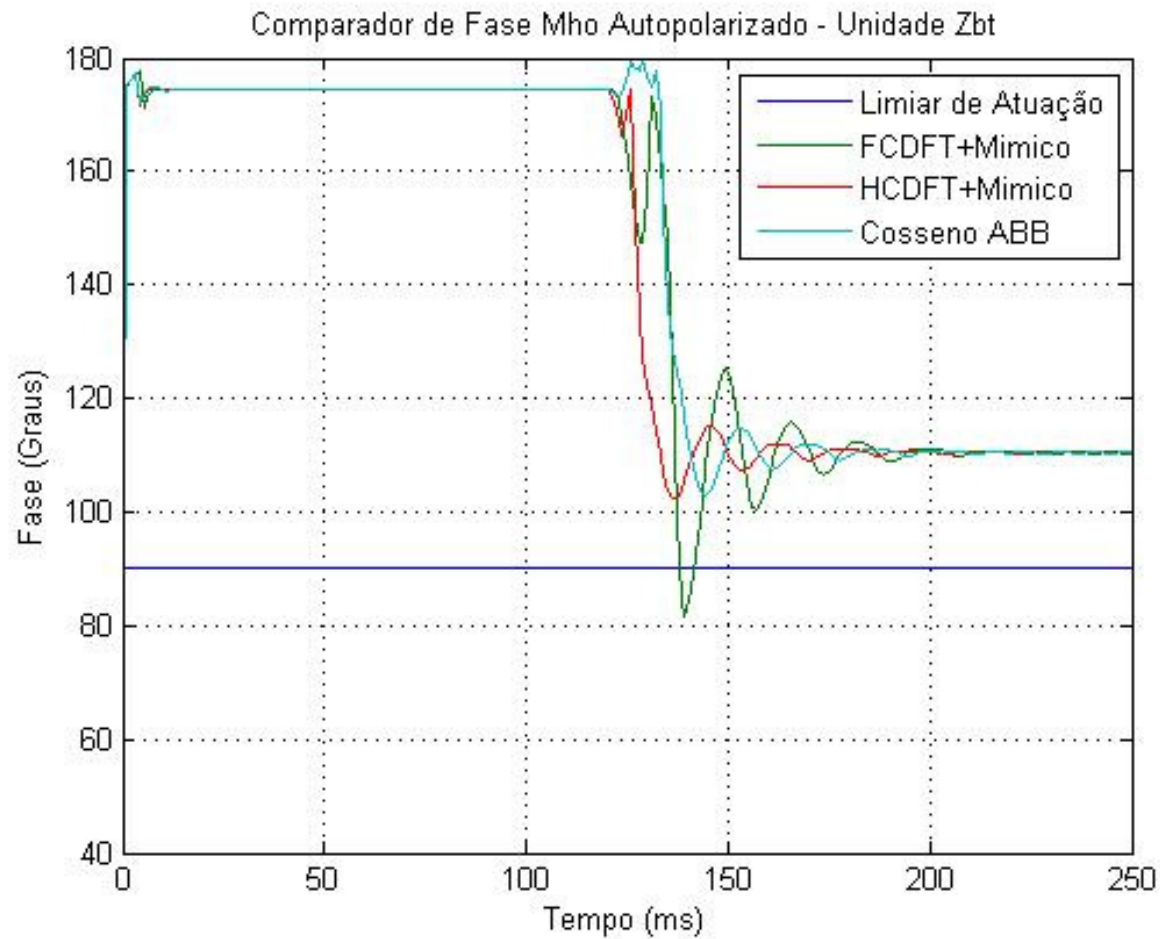
Proteção Digital

- Proteção de Distância:



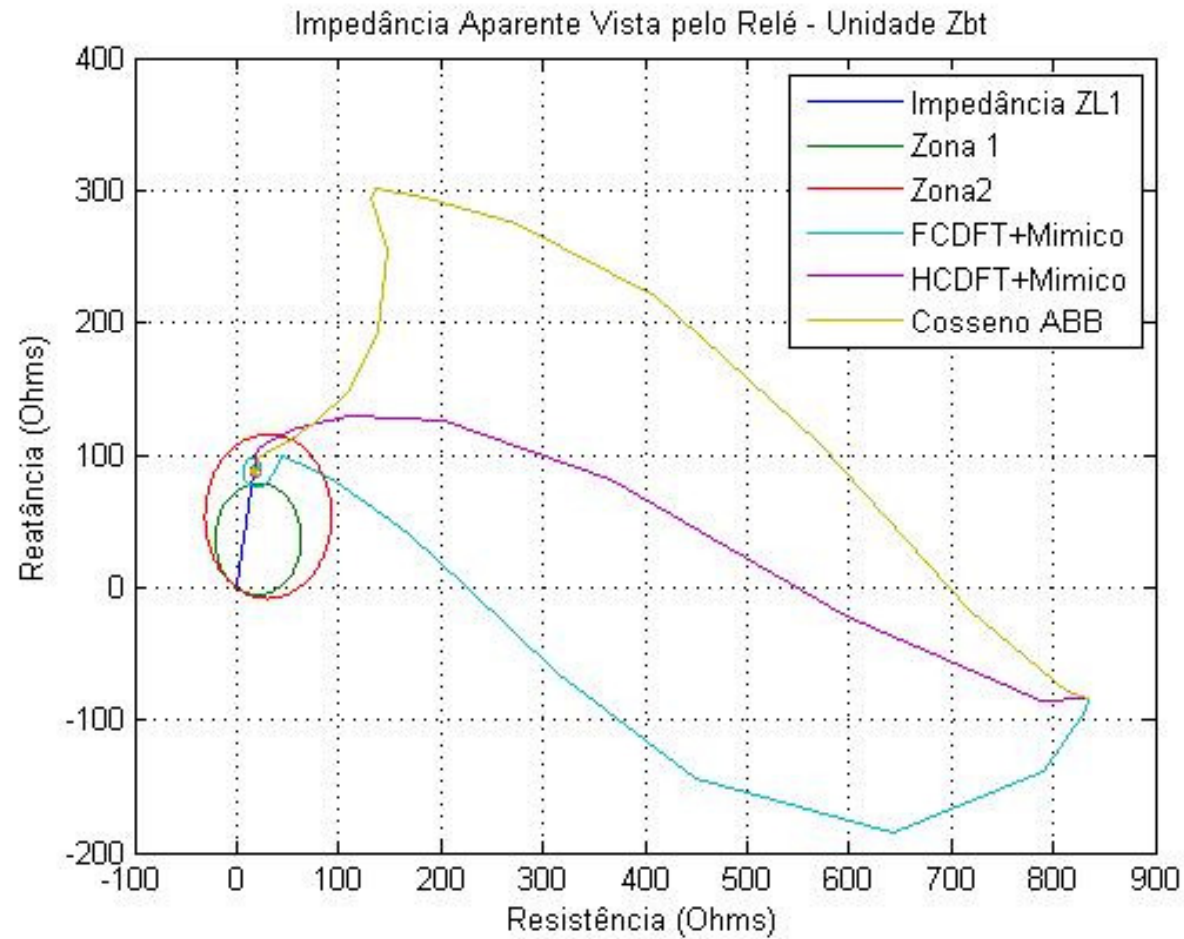
Proteção Digital

- Proteção de Distância:



Proteção Digital


- Proteção de Distância:





Proteção Digital

- **Vamos ao código!!**



A Importância das Técnicas de Programação nos Sistemas Elétricos de Proteção

Francisco das Chagas Souza Júnior, M.Sc.

francisco.souza@ifrn.edu.br