



**SEL354 Proteção de Sistemas de Energia Elétrica**

## TÓPICOS

---

### Localização de faltas em linhas de transmissão

- Introdução
- Localizadores digitais estudados.
- Localizador digital com dados de um terminal.
- Localizador digital com dados de dois terminais.
- Estudo prático comparativo dos localizadores apresentados.
- Conclusões dos métodos propostos.
- Localizador digital para LTs com três terminais
- Conclusões
- Outras metodologias (Ondas Viajantes)
- Localizadores comerciais

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

---

### 5.1 Introdução

Um localizador digital de faltas tem por função a determinação do **ponto exato de ocorrência de uma falta** em uma linha de transmissão.

Esta prática permite uma diminuição nos serviços de **manutenção** e uma **rápida restauração da operação** após a ocorrência de uma falta permanente na linha, contribuindo assim para a continuidade de fornecimento de energia elétrica.

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

---

### 5.2 Localizadores digitais estudados

Este tópico apresenta um estudo comparativo entre duas abordagens distintas para localização digital de faltas em linhas de transmissão de dois terminais, ambas baseadas no cálculo da impedância:

- ✓ Localização digital usando dados provenientes de um terminal da Linha  
(Takagi et al.)
- ✓ Localização digital usando dados provenientes de dois terminais da Linha  
(Girgis, A. A. et al.)
- ✓ Localização digital para LTs com três terminais  
(Coury, D.V. )

Um modelo de linha de transmissão faltosa (*software* ATP) é utilizado para seus testes.

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

---

### 5.3 Localizador digital com dados de um terminal

#### (a) Detecção do instante de ocorrência da falta

Determinação do ponto amostral onde a falta tem início (através de comparação com o ciclo de pré-falta).

#### (b) Extração dos fasores fundamentais

Filtragem digital através da teoria da Transformada Discreta de Fourier que produz a magnitude e o ângulo de fase dos fasores fundamentais de tensão e corrente.

#### (c) Obtenção dos componentes superpostos

Os componentes superpostos representam a diferença entre os valores de pós-falta e os valores de pré-falta em regime permanente.

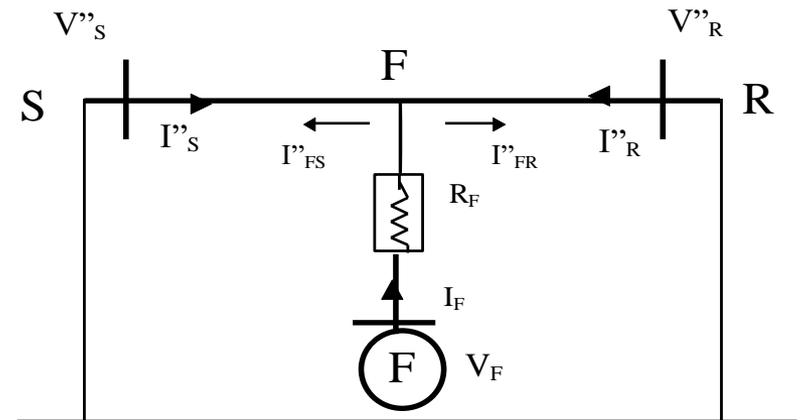
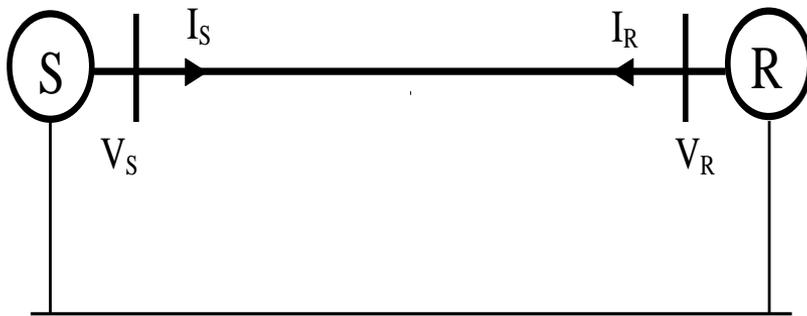
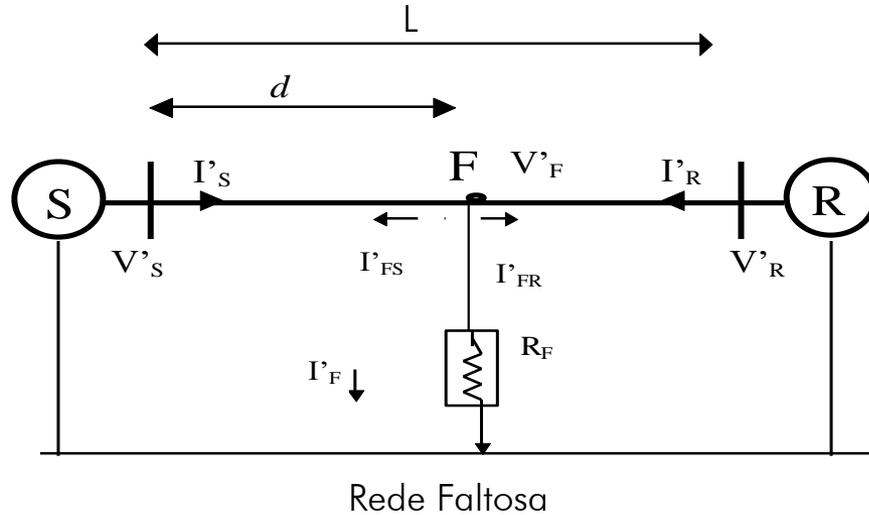
#### (d) Transformação modal

O cálculo dos modos permite que o sistema trifásico seja tratado como três sistemas monofásicos independentes, simplificando assim consideravelmente os cálculos necessários.

Os valores de fase são transformados em três modos desacoplados: um modo Terra e dois modos Aéreos, pela teoria dos modos naturais.

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### Equacionamento do localizador



## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### Equacionamento do localizador

Temos então:

$$V'_F = R_F \cdot I'_F = -R_F \cdot (I''_{FS} + I''_{FR})$$

Sendo,

$V'_F$  o fasor de tensão pós-falta no ponto  $F$ ,

$I'_F$  o fasor de corrente pós-falta no ponto  $F$ ,

$I''_{FS}$  igual a corrente da linha de  $F$  para  $S$  e  $I''_{FR}$  igual a corrente de  $F$  para  $R$ .

Uma nova variável  $K(d)$  é definida como:  $k(d) = \frac{I''_{FR}}{I''_{FS}}$

$K(d)$  é uma função da distância  $d$  à falta. Substituindo:

$$V'_F = -R_F \cdot I''_{FS} \cdot (1 + k(d))$$

$V'_F$  e  $I''_{FS}$  podem ser estimados pelos vetores medidos localmente, utilizando a teoria dos quadripólos:

$$V'_F = A(d)V'_S - B(d)I'_S \quad A, B, C, D \text{ - quadripólos}$$

$$I''_{FS} = C(d)V''_S - D(d)I''_S$$

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### Equacionamento do localizador

$$V_S'' \cong V_S' - V_S$$

$$I_S'' \cong I_S' - I_S$$

Assim:

$$A(d)V_S' - B(d)I_S' = -R_F \{(1 + k(d))\} \{C(d)V_S'' - D(d)I_S''\}$$

o que leva a

$$R_F \{1 + K(d)\} = - \frac{A(d)V_S' - B(d)I_S'}{C(d)V_S'' - D(d)I_S''}$$

Como a impedância de falta é puramente resistiva, isto implica que  $R_F$  é uma variável real. A equação básica do localizador é então definida como:

$$\text{Imag} \left[ \frac{A(d)V_S' - B(d)I_S'}{C(d)V_S'' - D(d)I_S''} \right] = 0$$

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### Equacionamento do localizador

Seja  $(.)^{(W)}$  uma quantidade modal. Então para uma falta fase-terra a equação fica:

$$\text{Imag} \left[ \frac{V_F^{(1)} + V_F^{(2)} + V_F^{(3)}}{C^{(j)}(d)V_S^{(j)} - D^{(j)}(d)I_S^{(j)}} \right] = 0$$

$$j = 1,2,3$$

Sendo para uma falta fase-fase:

$$\text{Imag} \left[ \frac{V_F^{(2)} - V_F^{(3)}}{C^{(j)}(d)V_S^{(j)} - D^{(j)}(d)I_S^{(j)}} \right] = 0$$

$$j = 1,2$$

As tensões modais em F são estimadas pela equação

$$V_F^{(W)} = A(W)(d)V_S^{(W)} - B(W)(d)I_S^{(W)}$$

$$W = 1,2,3$$

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

---

### 5.4 Localizador digital com dados de dois terminais

- (a) Detecção do instante de ocorrência da falta
- (b) Extração dos fasores fundamentais
- (c) Obtenção dos componentes superpostos
- (d) Sincronização dos dados

Esta abordagem necessita **sincronização dos dados** através de **GPS**, podendo esta sincronização também ser efetuada através do *software* do próprio localizador.

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### Equacionamento do localizador

Considerando-se a figura anterior:

$$V'_S = V'_F + d \cdot Z_{abc} \cdot I'_S$$

$$V'_R = V'_F + (L - d) \cdot Z_{abc} \cdot I'_R$$

Onde:  $Z_{abc}$  = matriz de impedância série da linha trifásica.

Subtraindo-se, fica:

$$V'_S - V'_R + L \cdot Z_{abc} \cdot I'_R = d \cdot Z_{abc} \cdot (I'_S + I'_R)$$

A equação pode ser rescrita, considerando o sistema trifásico, da forma:

$$\begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} d \quad \text{ou} \quad Y = Md$$

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### Equacionamento do localizador

Onde:

$$Y_{Sj} = V'_{Sj} - V'_{Rj} + L \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} I'_{Ri}$$

$$M_j = \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} (I'_{Si} + I'_{Ri})$$

Para  $j = a,b,c$  e com  $Z_{ji}$  = matriz de impedância série (3x3).

A incógnita ( $d$ ) é a distância da falta em relação a um terminal da linha.

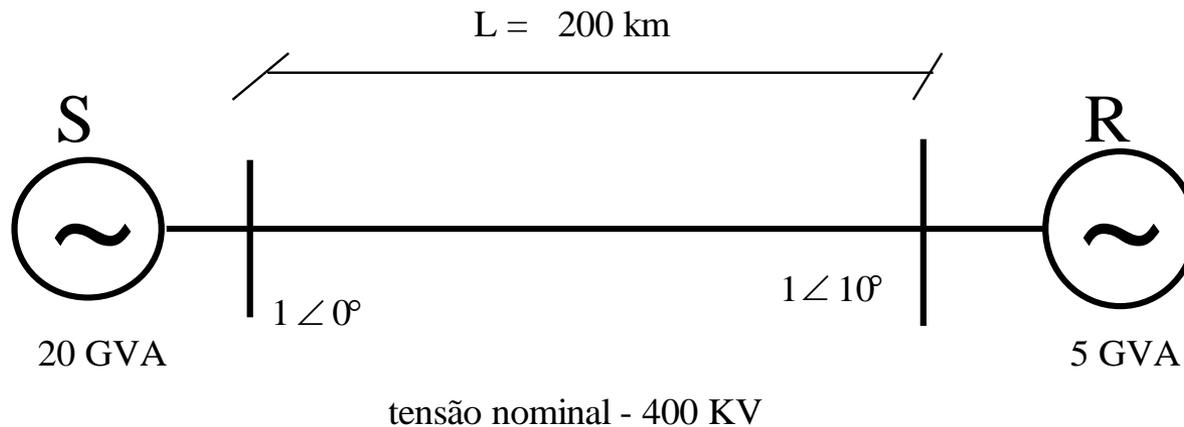
A solução para  $d$  pode ser obtida empregando-se a equação geral do localizador:

$$d = (M^+ M)^{-1} M^+ Y$$

com  $M^+$  = matriz transposta conjugada de  $M$ .

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

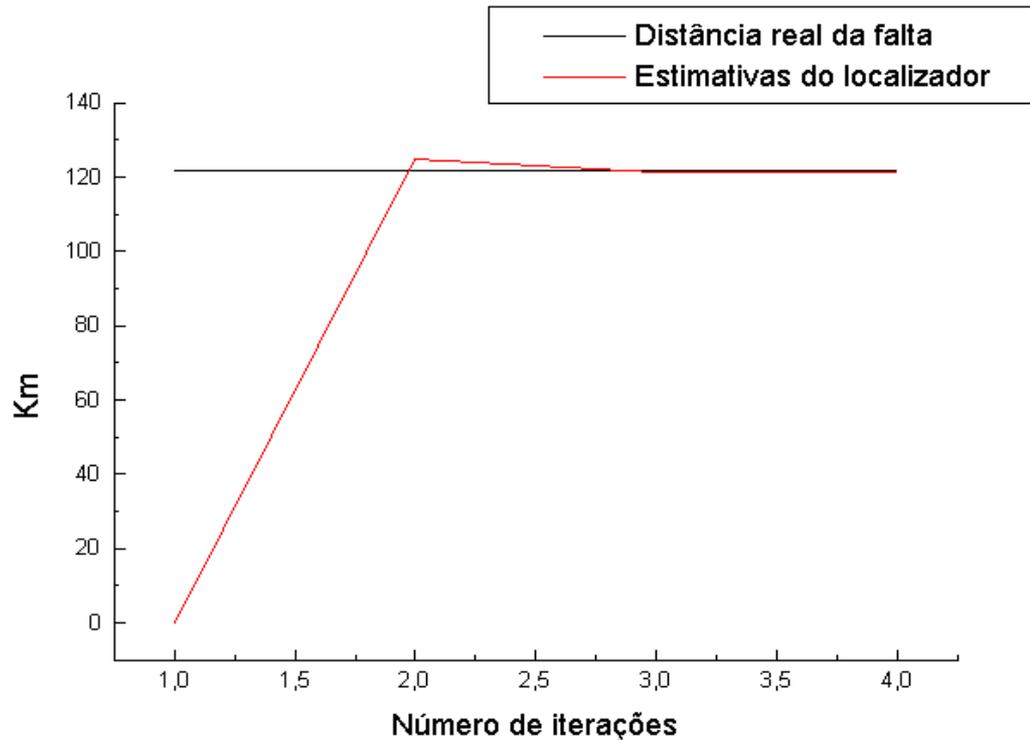
### 5.5 Estudo prático comparativo dos localizadores apresentados



Modelo do sistema de potência estudado.

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### Técnica baseada em um terminal



Processo iterativo de solução de uma falta fase terra à 122 Km do terminal local S ( $R_F=0\Omega$ ).

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### Técnica baseada em um terminal

Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
05	5.205	0.10	AT
05	4.922	0.04	ABC
20	20.998	0.50	BT
20	20.278	0.14	AB
40	38.946	0.53	CT
40	38.802	0.60	BCT
85	85.510	0.26	ABT
85	85.521	0.26	BC
99	95.234	1.88	BCT
99	101.008	1.00	AT
135	136.648	0.82	ACT
135	142.246	3.62	BT
160	161.909	0.95	BC
160	153.259	3.37	CT
180	173.291	3.35	AC
180	184.717	2.36	AB

$R_F$ (ohms)	Dist. Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
30 $\Omega$	20	30.98	5.49	AT
30 $\Omega$	65	99.88	17.44	BC
30 $\Omega$	115	120.34	2.67	CT
30 $\Omega$	160	209.91	24.96	ABC
10 $\Omega$	20	26.575	3.29	AT
10 $\Omega$	65	52.931	6.03	BC
10 $\Omega$	115	133.112	9.02	CT
10 $\Omega$	160	204.234	22.12	ABC

**Efeito da resistências de falta de 30 e de 10  $\Omega$ .**

**Efeito do tipo de falta (T- terra, A,B,C - fases envolvidas na falta,  $R_F=0 \Omega$ )**

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### Técnica baseada em um terminal

Capacida de Fonte S(GVA)	Dist. Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
50	05	5.136	0.07	AT
10	05	5.329	0.16	AT
5	05	5.569	0.28	AT
50	99	94.575	2.21	ABC
10	99	94.243	2.38	ABC
5	99	94.500	2.25	ABC
50	195	193.917	0.54	ACT
10	195	193.600	0.70	ACT
5	195	193.129	0.94	ACT

**Efeito da variação da capacidade da fonte S ( $R_f=0 \Omega$ ).**

#### **Efeito da taxa amostral utilizada:**

Testes foram realizados para taxas amostrais de 1 kHz e 2 kHz, mantendo-se a mesma margem de erros registrados para a taxa amostral de 4 kHz.

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### Técnica baseada em dois terminais

Distância Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
05	4.83	0.08	AT
05	5.87	0.44	ABC
20	20.60	0.30	BT
20	19.11	0.44	AB
40	40.93	0.47	CT
40	40.86	0.43	BCT
85	85.52	0.26	ABT
85	84.61	0.20	BC
99	99.31	0.16	BCT
99	99.12	0.06	AT
135	134.90	0.05	ACT
135	134.63	0.18	BT
160	159.17	0.41	BC
160	159.06	0.47	CT
180	178.81	0.59	AC
180	180.88	0.44	AB

$R_f$ (ohms)	Dist. Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
30 $\Omega$	20	15.38	2.31	AT
30 $\Omega$	65	56.53	4.23	BC
30 $\Omega$	115	117.97	1.48	CT
30 $\Omega$	160	176.11	8.06	ABC
10 $\Omega$	20	18.02	0.99	AT
10 $\Omega$	65	62.23	1.38	BC
10 $\Omega$	115	114.39	0.31	CT
10 $\Omega$	160	164.89	2.44	ABC

**Efeito de resistências de falta de 30 e de 10  $\Omega$ .**

**Efeito do tipo de falta (T- terra, A,B,C - fases envolvidas na falta,  $R_f=0\Omega$ ).**

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### Técnica baseada em dois terminais

Capacidade de Fonte S (GVA)	Dist. Real (km)	Dist. Estimada (km)	% de ERRO	Tipo de Falta
50	05	4.84	0.08	AT
10	05	4.88	0.06	AT
5	05	4.36	0.32	AT
50	99	101.82	1.41	ABC
10	99	97.89	0.55	ABC
5	99	95.93	1.53	ABC
50	195	194.70	0.15	ACT
10	195	194.25	0.38	ACT
5	195	194.12	0.44	ACT

#### Efeito da taxa amostral utilizada:

Testes foram realizados para taxas amostrais de 1 kHz e 2 kHz, mantendo-se a mesma margem de erros registrados para a taxa amostral de 4 kHz.

#### Efeito da variação da capacidade da fonte S ( $R_f=0 \Omega$ )

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

---

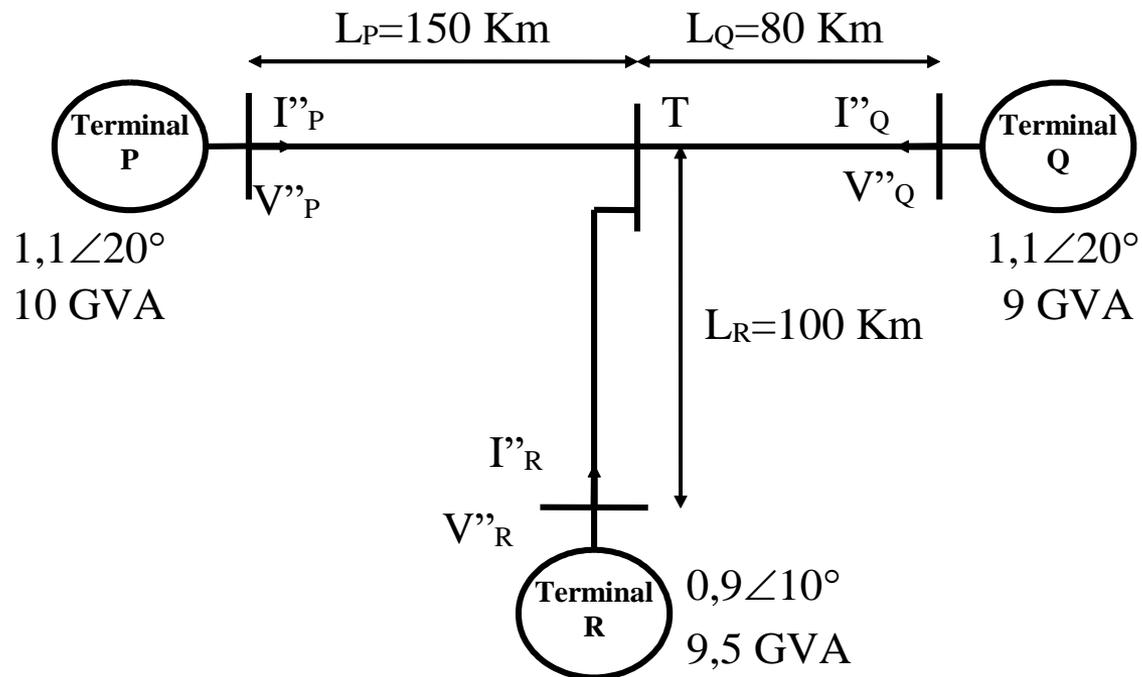
### 5.6 Conclusões dos métodos propostos

Os benefícios gerais do cálculo da localização de falta através de um algoritmo usando dados de ambos os terminais são:

- Maior **precisão** dos resultados.
- Não sofre efeito significativo da **resistência de falta e fluxo de carga na linha**.
- Não sofre efeito significativo da **capacidade das fontes** e de parâmetros externos a linha de transmissão.
- Não sofre efeito significativo de um possível **acoplamento mútuo da linha**.
- O valor da resistência de falta pode ser facilmente calculado e pode fazer parte dos **levantamentos estatísticos** da companhia elétrica.

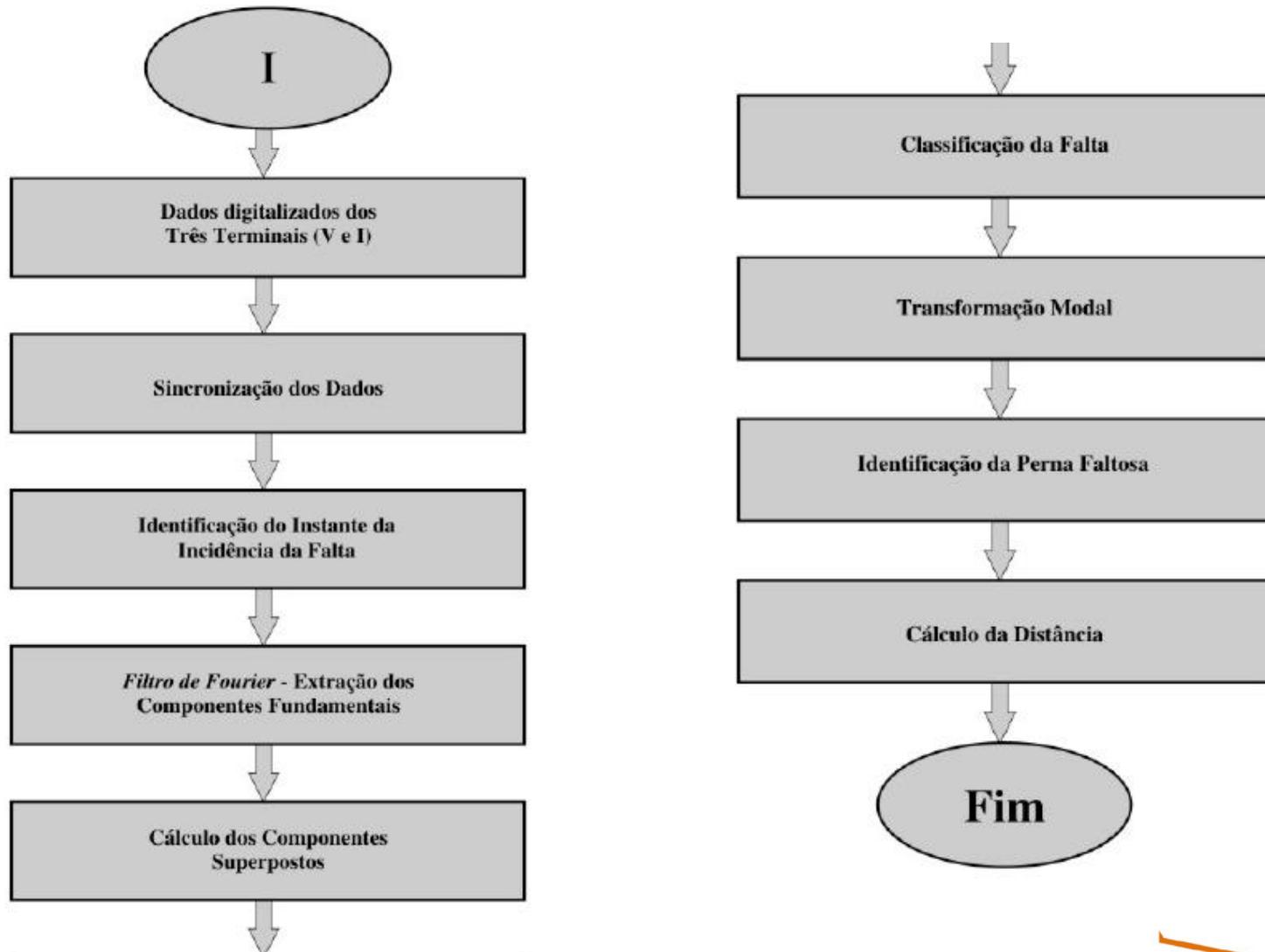
## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### 5.7 Localização digital para LTs com três terminais



Modelo de uma Linha de 400 kV com três terminais.

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão



## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

$$[x_k] = \arctanh [D_k / C_k] / \Gamma_k$$

onde:

$$\begin{aligned} A_k &= \cosh(\Gamma_k L_Q) V''_{Qk} - Z_{0k} \sinh(\Gamma_k L_Q) I''_{Qk} \\ B_k &= -\cosh(\Gamma_k L_k) I''_{Qk} + Y_{0k} \sinh(\Gamma_k L_R) V''_{Rk} \\ &\quad - \cosh(\Gamma_k L_R) I''_{Rk} + Y_{0k} \sinh(\Gamma_k L_Q) V''_{Qk} \\ C_k &= -Z_{0k} I''_{Pk} + A_k \sinh(\Gamma_k L_P) - Z_{0k} B_k \cosh(\Gamma_k L_P) \\ D_k &= -V''_{Pk} + A_k \cosh(\Gamma_k L_P) + Z_{0k} B_k \sinh(\Gamma_k L_P) \end{aligned}$$

e:

- $k$  é igual a 1 para modo terra, 2 e 3 para os modos aéreos;
- $\Gamma_k$  é a constante de propagação modal;
- $Z_{0k} = 1/Y_{0k}$  é a impedância característica modal e
- $x$  é a distância da falta.

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

---

### 5.8 Conclusões

- A técnica em questão mostrou a utilização de fasores de tensão e corrente trifásicos nos três terminais de uma linha para o cálculo preciso da distância da falta, **sendo uma extensão do segundo método visto no item anterior.**
- Os testes utilizaram simulações do software **ATP-EMTP (Alternative Transients Program)** sobre uma linha de transmissão com três terminais em condição faltosa (taxa amostral de 1 kHz).
- O erro na grande maioria dos casos foi **menor que 2 %**, e a maior concentração de erros percentuais foram próximos aos barramentos. Testes mostram que para valores de resistência de falta de até  $500 \Omega$ , o método apresenta valores bastante precisos .
- Em conclusão, a seleção de um método de localização digital de faltas depende da **configuração da rede, da disponibilidade do sistema de comunicação de dados e das necessidades da concessionária de energia.**

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

---

### 5.9 Localizadores comerciais



Painel principal com relés e localizadores [Schweitzer Engineering Laboratories](#)

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

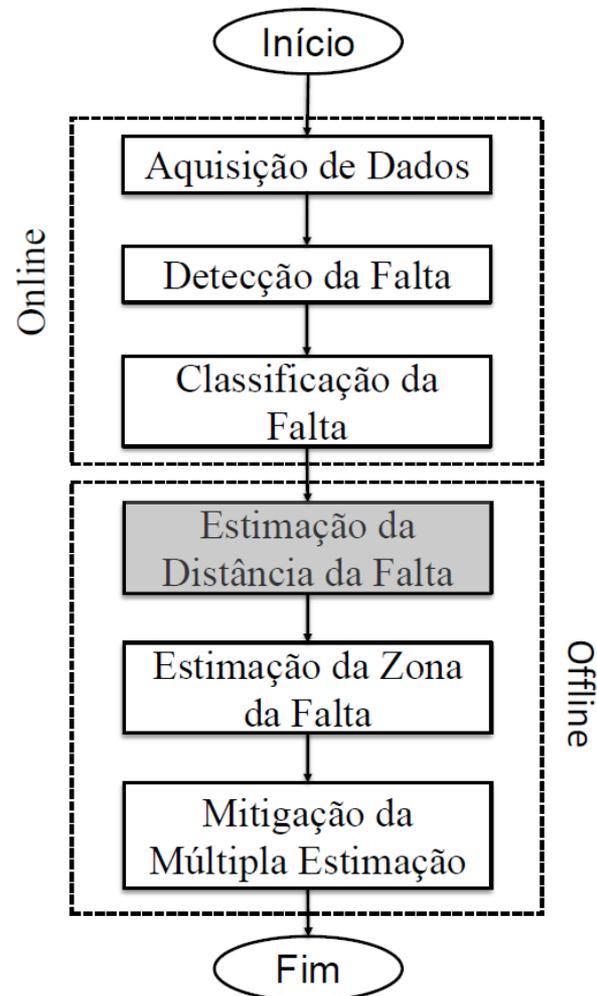
---

### 5.10 Outras metodologias

- Variações das técnicas apresentadas.
- Técnicas utilizando ondas viajantes, especialmente associada a teoria de *Wavelets*.
- Técnicas utilizando inteligência artificial, especialmente redes neurais artificiais e algoritmos genéticos.

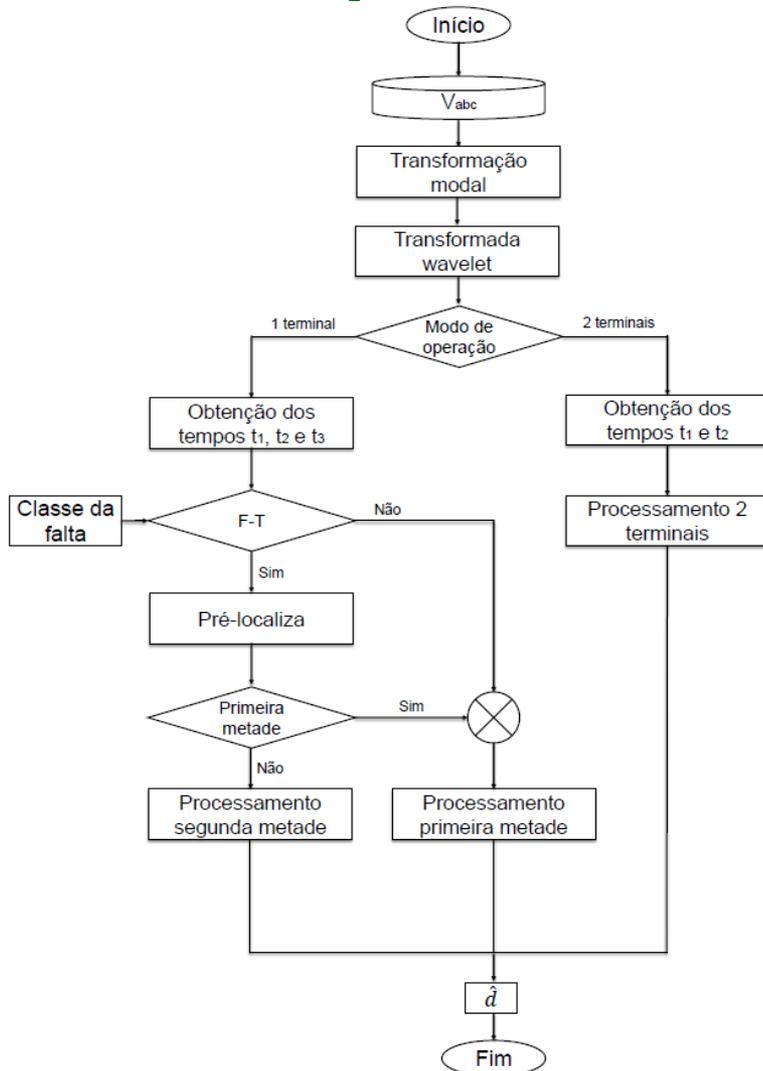
## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### 5.11 Princípios do Método de Ondas Viajantes



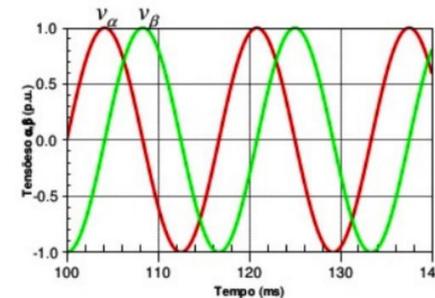
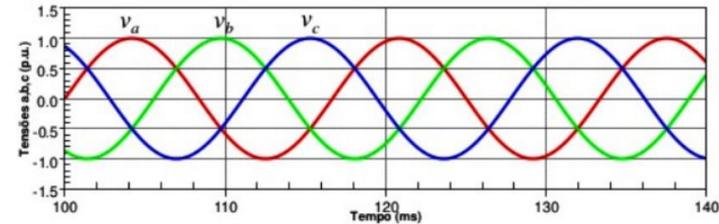
## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### 5.11 Princípios do Método de Ondas Viajantes



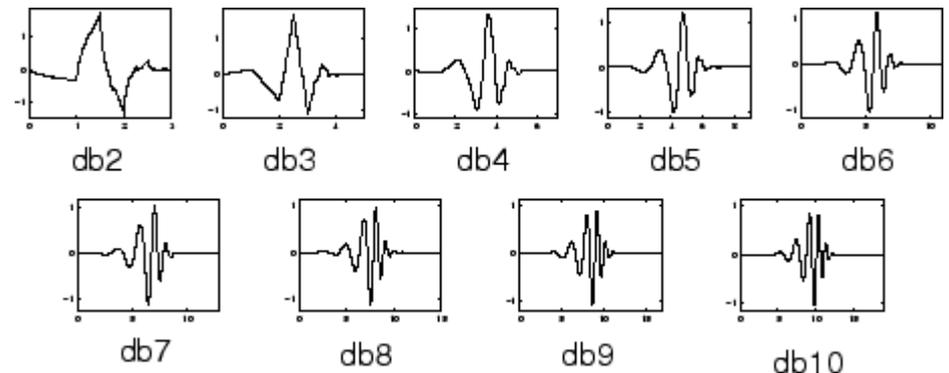
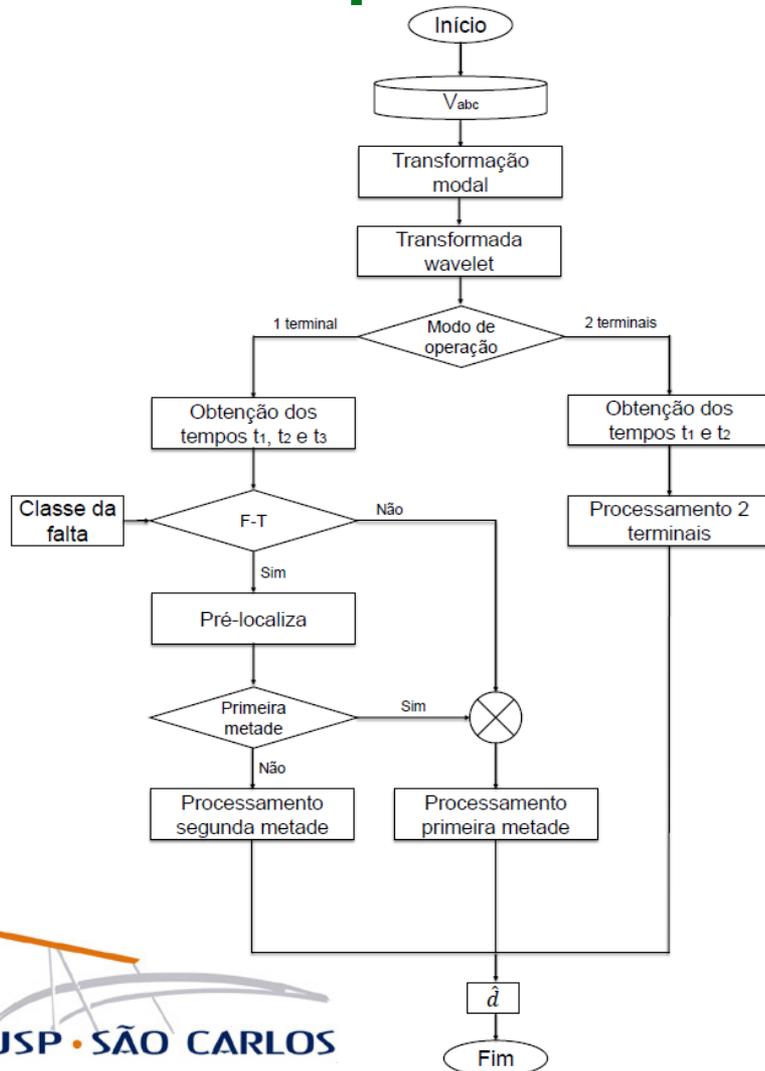
Transformação modal

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

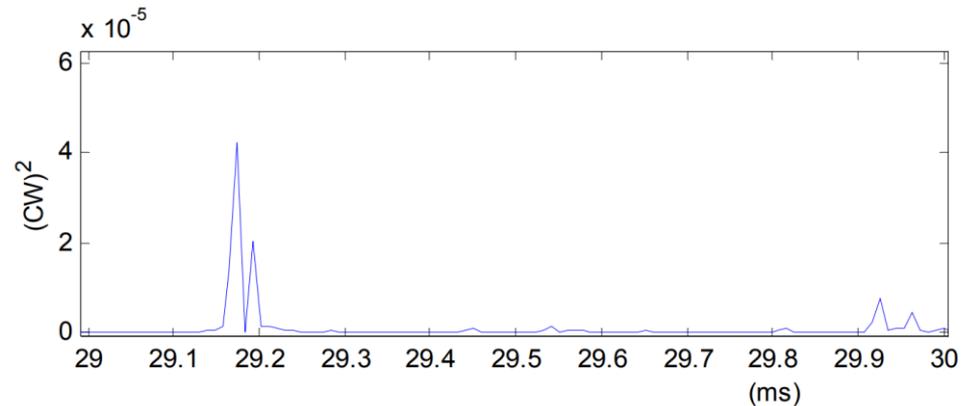


## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### 5.11 Princípios do Método de Ondas Viajantes

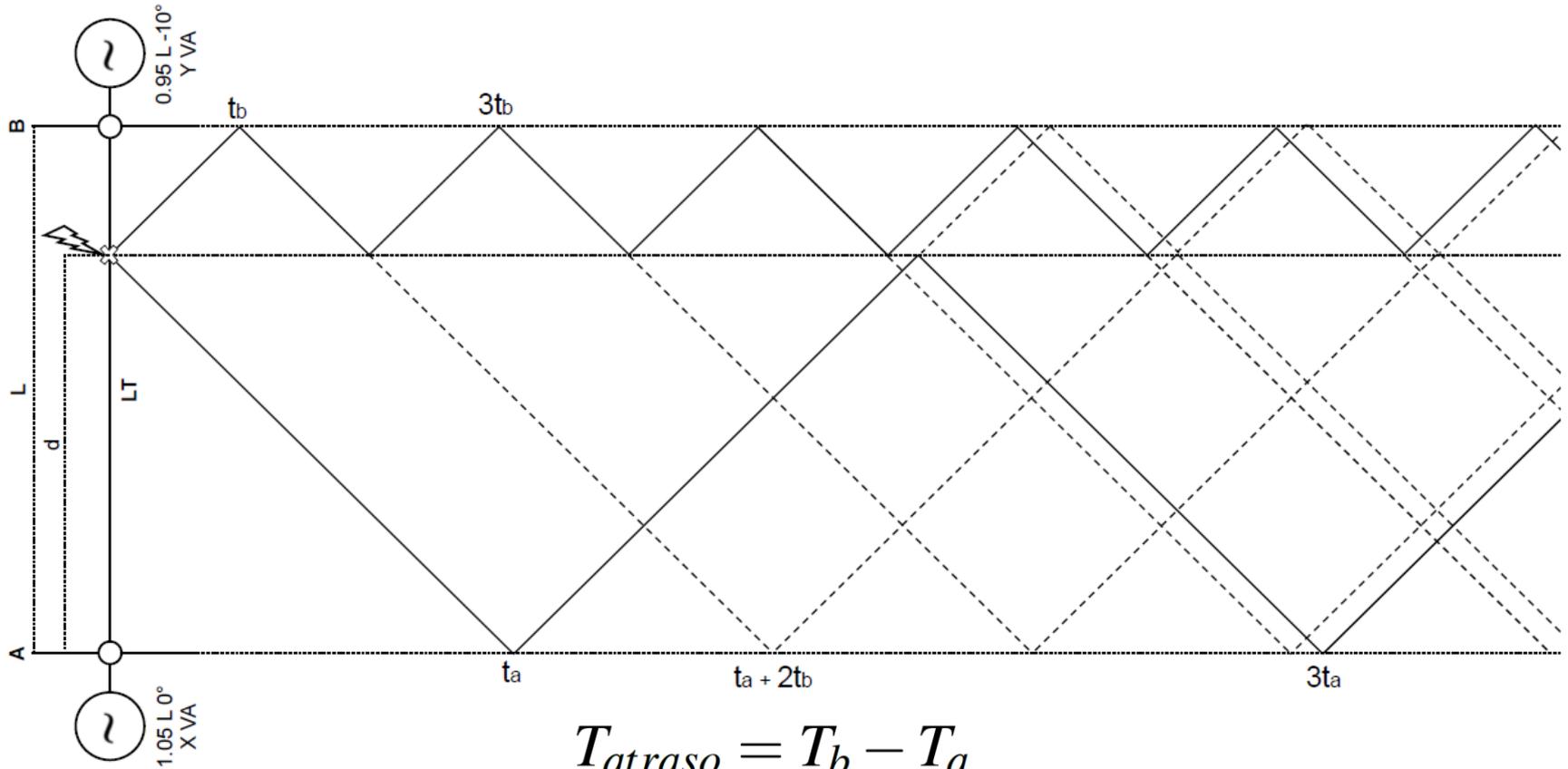


$$TWD(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \sum_n x(n) \Psi \left( \frac{k - n b_0 a_0^m}{a_0^m} \right)$$



## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### 5.11 Princípios do Método de Ondas Viajantes

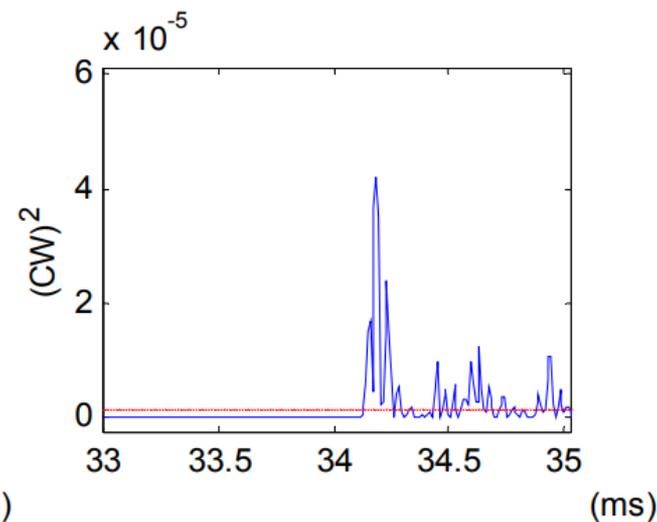
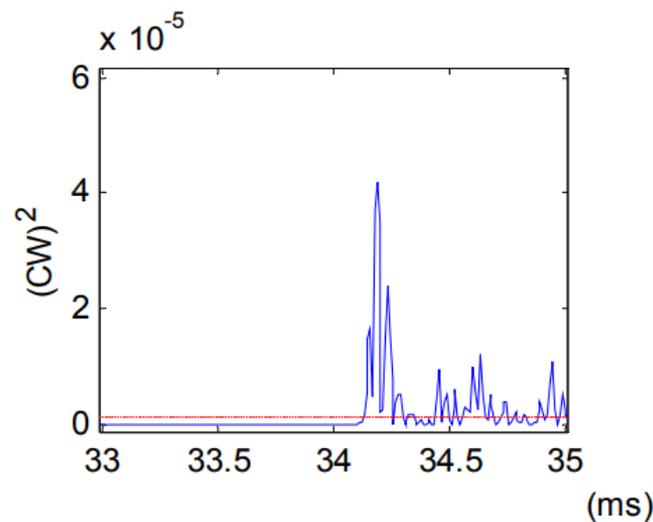
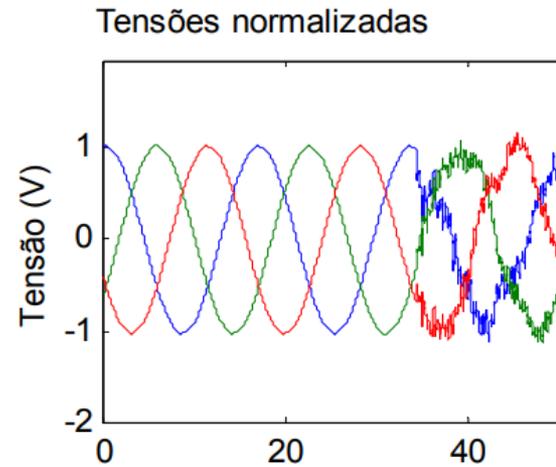
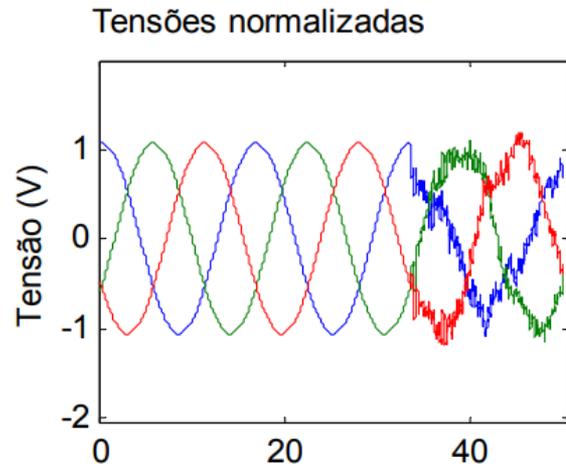


$$T_{atraso} = T_b - T_a$$

$$\hat{d} = \frac{L - Vp \times T_{atraso}}{2}$$

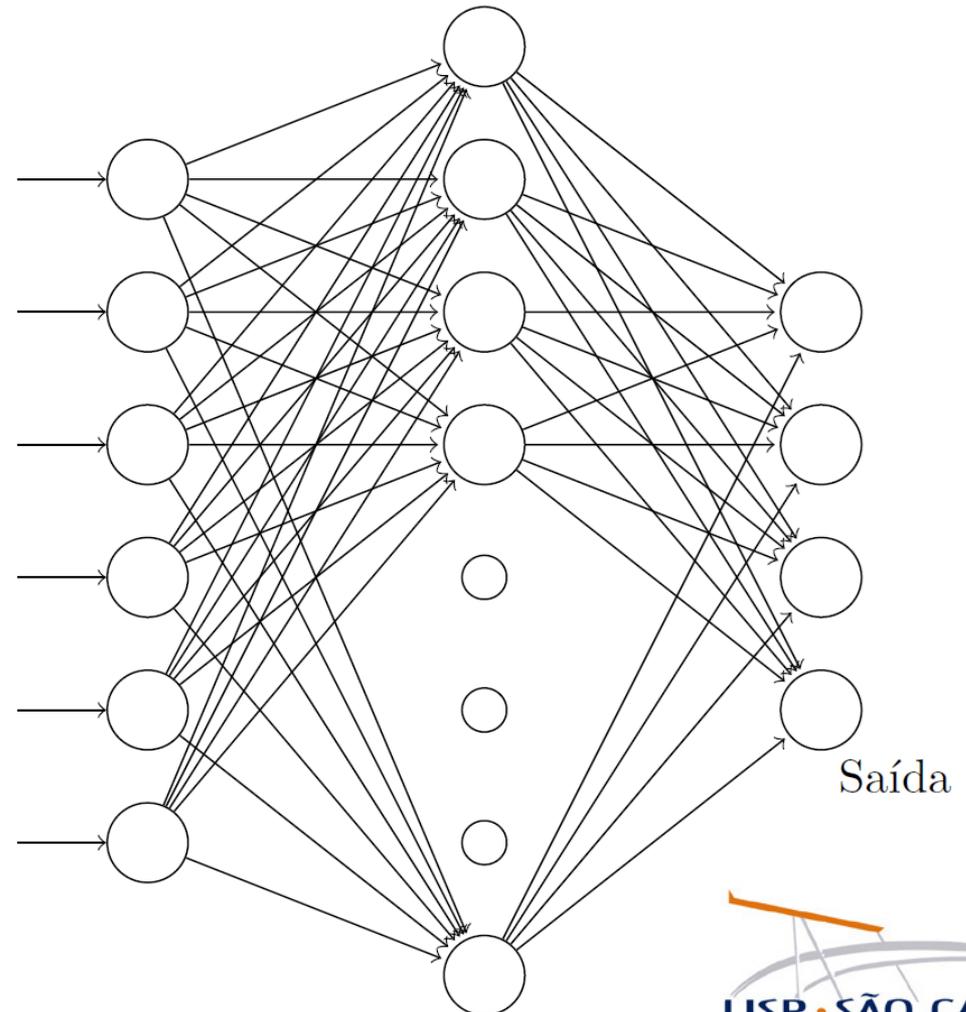
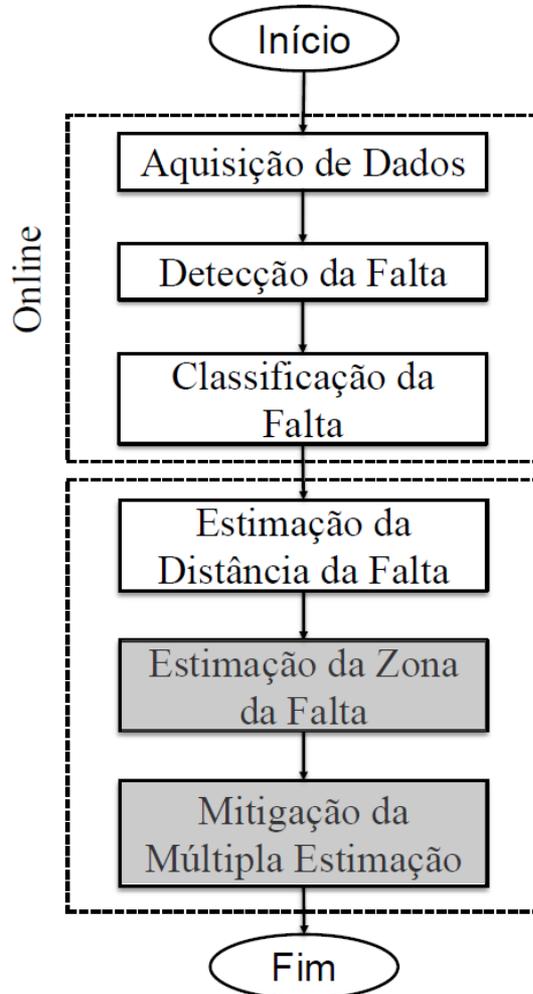
## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### 5.11 Princípios do Método de Ondas Viajantes



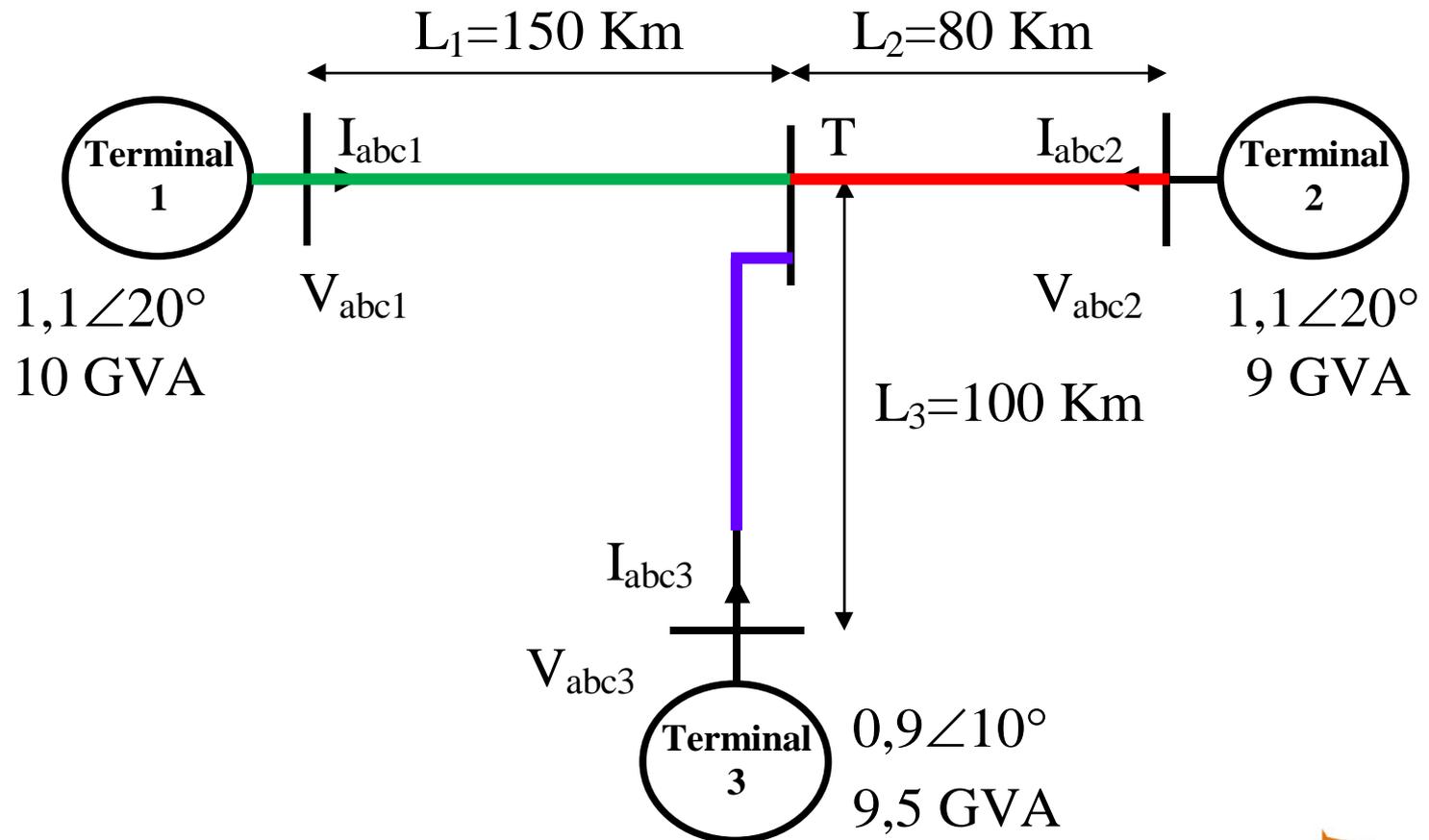
## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### 5.11 Princípios do Método de Ondas Viajantes



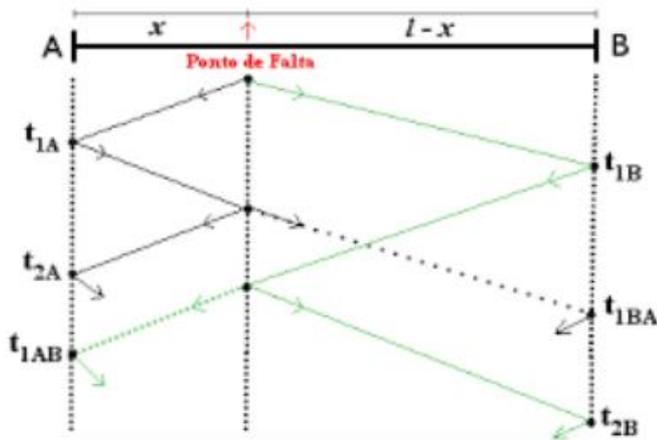
## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### 5.11 Princípios Múltipla Estimação



## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

### 5.11 Princípios do Método de Ondas Viajantes



Uma evolução do relé de proteção de linha no domínio de tempo SEL-T400L, o SEL-T401L inclui um pacote completo de funções de proteção primária e secundária.

## 5. Localização digital de faltas em linhas de transmissão

---

### 5.12 Exercício

A respeito dos localizadores de falta aplicados em LTs, responda:

- a) Explique como a resistência de falta afeta a precisão na localização, tanto quando se utiliza o cálculo da impedância aparente quanto quando se emprega a teoria de ondas viajantes.
- b) Cite e explique uma desvantagem do método que utiliza ondas viajantes em comparação com o cálculo da impedância aparente.
- c) Represente graficamente o diagrama espaço-tempo para uma falta a 25% da distância do medidor A e outra a 75% do mesmo medidor. Compare os resultados, explicando a influência na localização ao utilizar ondas viajantes.

