

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**DENISE PIVATTO MARZEC**

**RELÉ DE DISTÂNCIA TIPO-FASE COMPENSADO PARA  
SISTEMAS DE TRANSMISSÃO**

Porto Alegre

2011

**DENISE PIVATTO MARZEC**

**RELÉ DE DISTÂNCIA TIPO-FASE COMPENSADO PARA  
SISTEMAS DE TRANSMISSÃO**

*Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.  
Área de concentração: Energia*

**ORIENTADOR: Arturo Suman Bretas**

Porto Alegre

2011

DENISE PIVATTO MARZEC

## **RELÉ DE DISTÂNCIA TIPO-FASE COMPENSADO PARA SISTEMAS DE TRANSMISSÃO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, UFRGS

Doutor pela Virginia Polytechnic Institute and State University,  
EUA

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luís Fernando Costa Alberto, USP

Doutor pela EESC-USP – São Carlos, Brasil

Prof. Dr. Roberto Chouhy Lebourgne, UFRGS

Doutor pela Chalmers University of Technology – Göteborg, Suécia

Prof. Dr. Sérgio Luís Haffner, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, Julho de 2011

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho ao meu noivo Tiago Oviedo Frosi, que nunca duvidou da capacidade que cada pessoa tem de superar a si mesma.

## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste trabalho em muito se deve ao apoio, incentivo e auxílio de diversas pessoas, às quais transmito meus mais sinceros agradecimentos.

Ao professor Arturo Suman Bretas, pela dedicação, incentivo, amizade e compreensão demonstrada ao longo dos quatro anos de trabalho junto ao LASEP. Com certeza um exemplo de caráter e simplicidade a ser seguido.

Aos meus pais, João Marzec e Ana Pivatto Marzec, pelo apoio, carinho e dedicação dados em toda a minha vida e pela sempre preocupação em investir nos estudos, o que me possibilitou sempre seguir com segurança mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao meu irmão, pela amizade e companheirismo, e por ser um exemplo de quem também se dedica à grande área da Engenharia.

Ao meu noivo Tiago Oviedo Frosi, pelo amor e apoio incondicionais e por estar presente em todos os momentos, não apenas referentes à vida acadêmica, mas nos desafios da vida. Agradeço também por dividir comigo tantos conhecimentos dentro do Karate, uma arte marcial que certamente deu novo sentido à minha vida.

Aos professores e colegas do Laboratório de Sistemas Elétricos de Potência (LASEP) e do Grupo de Modelagem e Análise de Sistemas de Potência (GMASP), por todo apoio, amizade e pelos conhecimentos compartilhados ao longo dessa caminhada.

Um agradecimento especial ao agora Doutor Rodrigo Hartstein Salim, pelos anos de convivência durante minha graduação em Engenharia Elétrica, pela sempre disposição em ajudar e por ter sido sempre grande inspiração para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFRGS, seus respectivos professores e funcionários, por todo conhecimento transmitido, pela oportunidade de desenvolver meus trabalhos e pela estrutura disponibilizada.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico, o CNPq, pelo auxílio financeiro concedido através da bolsa de mestrado.

A todos os cidadãos brasileiros que, através da honestidade e do trabalho árduo, contribuem para a manutenção de uma universidade pública, gratuita, e de qualidade.

## **RESUMO**

Relés de distância são muito utilizados para proteger linhas de transmissão. Porém, há baixa precisão dos limites de sua zona de proteção devido a fenômenos de subalcance e sobrealcance. Assim, nesta dissertação de mestrado é proposto um algoritmo com compensação da resistência de falta, baseado em coordenadas de fase, objetivando aumentar a precisão dos limites da zona de proteção. A formulação proposta utiliza uma estimativa da corrente de falta para estimar a resistência de falta e compensar a impedância aparente calculada. Foram realizados o equacionamento e desenvolvimento do algoritmo para faltas tipo fase. Simulações e testes numéricos comparativos com formulações estado-da-arte verificaram a eficiência do método proposto.

**Palavras-chave: Relés de Distância, Proteção Digital, Resistência de Falta, Zona de Proteção.**

## **ABSTRACT**

Distance Relays are widely used to protect transmission lines. However, due to underreaching and overreaching phenomena, there is a low precision in protection zone limits of distance relays. Thus, in this dissertation, a new algorithm based in phase coordinates is proposed to increase the precision in zone protection limits. The proposed method uses the fault current to estimate the fault resistance and compensate the apparent impedance calculated. The equation development was done for phase type faults. Comparative tests with state-of-the-art formulations verified the efficiency of the proposed method.

**Keywords: Distance Relaying, Power System Protection, Fault Resistance, Protection Zone.**

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	Objetivo geral .....	15
1.2	Justificativa.....	16
1.3	Proposta.....	16
1.4	Estrutura do Trabalho .....	16
2.	REVISÃO DE LITERATURA .....	18
2.1	Proteção Digital de Sistemas Elétricos .....	18
2.2	Atuação de um Relé de Distância.....	24
2.3	Equacionamento de um Relé de Distância Convencional.....	27
2.3.1	Metodologia Tradicional para Faltas Fase-Fase.....	28
2.3.2	Metodologia Tradicional para Faltas Fase-Fase-Terra e Faltas Trifásicas .....	29
3.	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PROPOSTA PARA RELÉS DE DISTÂNCIA TIPO FASE.....	32
3.1	Análise Matemática para Faltas Fase-Fase .....	32
3.2	Análise Numérica da Estimativa da Resistência de Falta Usando Coordenadas de Fase para Faltas Fase-Fase .....	38
3.3	Procedimento Iterativo de Estimativa da Corrente de Falta.....	40
3.4	Formulação Matemática para Faltas Fase-Fase-Terra .....	44
3.5	Análise Numérica da Estimativa da Resistência de Falta Usando Coordenadas de Fase para Faltas Fase-Fase-Terra.....	48
3.6	Formulação Matemática para Faltas Trifásica-Terra.....	52
3.7	Análise Numérica da Estimativa da Resistência de Falta Usando Coordenadas de Fase para Faltas Trifásica-Terra .....	56
4.	METODOLOGIA.....	60
4.1	Estudo de Caso .....	61
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	67
5.1	Efeito da Resistência de Falta.....	67

5.2	Efeito da Distância de Falta.....	68
5.3	Efeito do Desbalanceamento do Sistema .....	69
5.4	Efeito do Tempo Computacional.....	69
6.	CONCLUSÃO.....	71
Apêndice A:	Discussão Sobre o Termo $V_{sb}/I_{sa}$ .....	77
Apêndice B:	Efeito do Erro de Estimação da Corrente de Falta .....	79

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Componentes de um Sistema Elétrico de Potência (PANSINI, 2005) .....	14
Figura 2.1: Representação do fenômeno de subbalcance em relés de distância, devido a resistência de falta (FILOMENA et al, 2008). .....	21
Figura 2.2 – Três Zonas de Proteção de um Relé de Distância .....	25
Figura 2.3 – Circuito com Componentes Simétricas para Faltas B-C .....	28
Figura 2.4: Circuito com Componentes Simétricas para Faltas B-C-g.....	30
Figura 2.5: Circuito com Componentes Simétricas para Faltas Trifásicas .....	30
Figura 2.6: Conexões de Relés de Distância para Faltas Tipo-Fase.....	31
Figura 3.1: Representação da Falta Fase-Fase em Sistema Genérico de Transmissão.....	32
Figura 3.2: Diagrama de blocos com passo-a-passo matemático do método iterativo para faltas fase-fase .....	43
Figura 3.3: Representação da Falta Fase-Fase-Terra em Sistema Genérico de Transmissão ..	44
Figura 3.4: Diagrama de blocos com passo-a-passo matemático do método iterativo para faltas fase-fase-terra .....	51
Figura 3.5: Representação da Falta Trifásica-Terra em Sistema Genérico de Transmissão ....	52
Figura 3.6: Diagrama de blocos com passo-a-passo matemático do método iterativo para faltas trifásica-terra .....	59
Figura 4.1: Sistema Elétrico de Potência Trifásico utilizado como principal Caso de Estudo	62
Figura 4.2: Representação da zona de atuação do relé para falta fase-fase com resistência de falta de 0 ohms e distância de falta de 180 km.....	65
Figura 4.3: Representação da zona de atuação do relé para falta fase-fase com resistência de falta de 0 ohms e distância de falta de 160 km.....	65
Figura 4.4: Representação da zona de atuação do relé para falta fase-fase com resistência de falta de 50 ohms e distância de falta de 180 km.....	65
Figura 4.5: Representação da zona de atuação do relé para falta fase-fase com resistência de falta de 50 ohms e distância de falta de 160 km.....	65
Figura 4.6: Representação da zona de atuação do relé para falta fase-fase-terra com resistências de falta de 30, 40 e 50 ohms e distância de falta de 180 km .....	65
Figura 4.7: Representação da zona de atuação do relé para falta fase-fase-terra com resistências de falta de 30, 40 e 50 ohms e distância de falta de 160 km .....	65
Figura 4.8: Representação da zona de atuação do relé para falta trifásica-terra com resistências de falta de 70, 70,70 e 50 ohms e distância de falta de 160 km .....	66
Figura 4.9: Representação da zona de atuação do relé para falta trifásica-terra com resistências de falta de 70, 70,70 e 50 ohms e distância de falta de 180 km .....	66
Figura 4.10: Mesma representação da zona de atuação do relé para falta trifásica-terra com resistências de falta de 70, 70, 70 e 50 ohms e distância de falta de 180 km – ampliação da imagem para visualização da falta externa vista pela metodologia proposta.....	66

Figura 5.1: Efeito da distância de falta no erro da estimativa da resistência de falta para faltas fase-fase. Eixo x: distancia de falta [km]; Eixo y: erro percentual na estimativa da resistência de falta..... 69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Visão Geral de Alguns Resultados para Faltas Fase-Fase em um SEP Desequilibrado.....	63
Tabela 4.2: Visão Geral de Alguns Resultados para Faltas Fase-Fase em um SEP Equilibrado .....	63
Tabela 4.3: Visão Geral de Alguns Resultados para Faltas Fase-Fase-Terra em um SEP Desequilibrado.....	64

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

A-B: Falta fase-fase entre as fases A e B

A-B-C-g: Falta trifásica-terra

A-B-g: Falta fase-fase-terra entre as fases A e B e terra

GMASP: Grupo de Modelagem e Análise de Sistemas de Potência

LASEP: Laboratório de Sistemas Elétricos de Potência

PPGEE: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

SEP: Sistemas Elétricos de Potência

## 1. INTRODUÇÃO

A Energia Elétrica é um dos recursos fundamentais da sociedade contemporânea. Ela está disponível para o usuário instantaneamente, nas corretas tensão e frequência, e na exata quantidade em que é necessária. Segundo Stevenson (1974), o progresso industrial de uma nação pode ser medido pelo grau de aproveitamento de suas fontes de energia. Esse desempenho é alcançado através de cuidadoso planejamento, instalação e operação de uma complexa rede de geradores, transformadores e linhas de transmissão e distribuição, conforme pode ser visto na Figura 1.1, obtida de Pansini (2005). Para o usuário final, o sistema elétrico aparenta estar sempre imperturbável, constante e com capacidade infinita (HOROWITZ;PHADKE, 1995).

Entretanto, o sistema elétrico de potência está sujeito a constantes perturbações, as chamadas faltas ou curtos-circuitos, que são definidos como qualquer falha que interfira no fluxo normal da corrente em um Sistema Elétrico de Potência (GRAINGER;STEVENSON, 1994). As faltas estão associadas com diferentes causas, como: arborização, iluminação, falha de equipamentos e contato de animais e árvores com algum equipamento elétrico. Essas perturbações não apenas colocam em risco a continuidade do fornecimento da energia elétrica, como também representam perigos à sociedade. Essa noção dos perigos de um curto-circuito está presente, desde os pequenos acidentes em aparelhos domésticos, até eventos de grande amplitude, como *blackouts*.

Devido a sua natureza estocástica, faltas são dificilmente previsíveis, o que desafia os engenheiros de potência a projetar esquemas de proteção para prevenir graves danos ao sistema. A falta deve ser eliminada o mais rápido, seguro e confiável quanto possível.

Com a entrada em vigor do Código de Defesa do Consumidor, em 11/09/1990, aumentou ainda mais a importância dos Sistemas de Proteção. O Artigo 22 do referido código

explicita: “Os órgãos públicos, por si ou suas empresas, concessionárias, pressionárias ou sob qualquer outra forma de empreendimento, são obrigados a fornecer serviços adequados, eficientes, seguros e, quando aos essenciais, contínuos” (BRASIL, 1990). Atualmente, com o aumento da demanda e a grande preocupação com a qualidade e confiabilidade no fornecimento de energia elétrica, as empresas de transmissão e distribuição vêm adotando sistemas de proteção cada vez mais complexos e de maior sensibilidade.

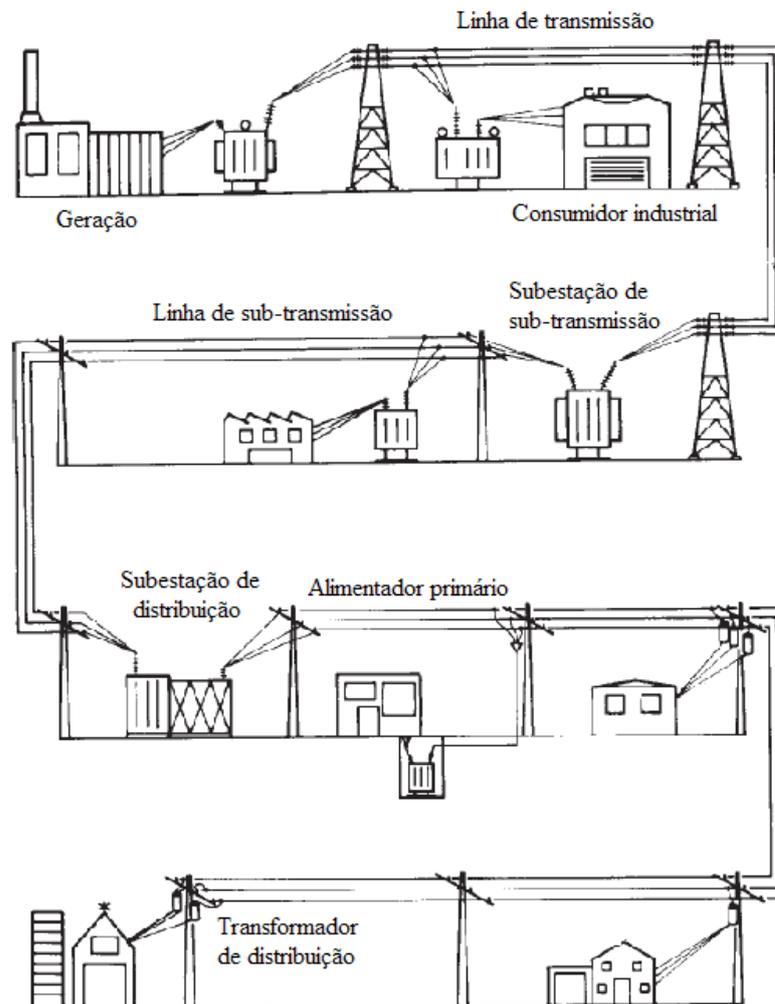


Figura 1.1: Componentes de um Sistema Elétrico de Potência (PANSINI, 2005)

Entre os dispositivos de proteção mais utilizados estão os relés, que possuem como principais características: sensibilidade, seletividade, velocidade e confiabilidade

(FILOMENA et al, 2008). Essas, são qualidades indispensáveis para que, não se conseguindo proteger totalmente, ao menos sejam minimizados os danos causados a equipamentos e também as interrupções no fornecimento de energia.

A proteção dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) é feita por esquemas de proteção que, por sua vez, são basicamente comandados por relés. A função primordial desses relés é: identificar os defeitos, localizá-los da maneira mais exata possível e alertar a quem opera o sistema (HOROWITZ;PHADKE, 1995). Esse procedimento ocorre efetuando o disparo de alarmes, sinalizações e comandando a abertura de disjuntores, de modo a tentar isolar o defeito, mantendo o restante do sistema em operação normal, sem que os efeitos dessa falha prejudiquem as condições de operação do SEP. Havendo alguma anomalia, por exemplo, um curto-circuito, a corrente de curto-circuito sensibiliza o relé e esse opera enviando um sinal para a abertura do disjuntor. Com a abertura, o trecho defeituoso é desconectado do sistema. Neste caso, o sistema continua a operar com a mesma configuração anterior, apenas sem o trecho com falha.

O estudo e a prática de Proteção por Relés não constituem uma ciência exata. Muito de arte e bom senso estarão sempre associados à técnica empregada. Assim, a experiência assume um aspecto significativo para qualquer profissional que trate do assunto (COMASSETTO, 2010).

## **1.1 Objetivo geral**

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia que visa aumentar a precisão e a eficiência da Proteção de Sistemas de Potência, utilizando coordenadas de fase e compensação da resistência de falta.

## **1.2 Justificativa**

Procura-se contribuir com este estudo para o avanço da área de Proteção de Sistemas de Potência, garantindo a continuidade e a segurança no fornecimento de Energia Elétrica.

## **1.3 Proposta**

O trabalho desenvolvido diz respeito a uma nova metodologia proposta para aumentar a precisão dos limites das zonas de proteção de relés de distância, melhorando a eficiência do processo de proteção de sistemas elétricos. Uma nova formulação para o uso de relés de distância é abordada. Um novo algoritmo, baseado em coordenadas de fase, utiliza a compensação da resistência de falta para determinar a localização do ponto faltoso com maior precisão.

## **1.4 Estrutura do Trabalho**

A sequência desta dissertação é composta pelos seguintes tópicos: o Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o estado-da-arte em Proteção Digital utilizando relés de distância. O Capítulo 3 introduz uma análise e modelagem matemática de uma linha de transmissão trifásica afetada por faltas fase-fase, faltas fase-fase-terra e faltas trifásica-terra, respectivamente. A fundamentação matemática proposta do esquema de localização de defeitos utilizando compensação da resistência de falta é escrita em detalhes nesses capítulos.

O Capítulo 4 apresenta as características das linhas utilizadas para simulação, bem como os softwares nos quais o sistema teste e o algoritmo proposto foram implementados. Também são colocadas tabelas com resultados atingidos através de simulações.

No Capítulo 5, são discutidos os resultados comparativos obtidos através do esquema proposto e através do relé tradicional. Concluindo, as considerações finais e as sugestões de trabalhos futuros são realizadas no Capítulo 6.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Proteção Digital de Sistemas Elétricos

O conceito do uso de computadores digitais para operações de relés começou a mais de 30 anos. Desde então o campo de pesquisas dessa área tem crescido rapidamente. Os computadores têm passado por uma mudança significativa – se tornaram mais potentes, baratos e resistentes (PHADKE;THORP 2009). Hoje em dia os relés digitais são muito utilizados por razões econômicas e técnicas. Os avanços nos *hardwares* foram acompanhados por desenvolvimentos analíticos no campo de estudos das aplicações dos relés. Através da participação de pesquisadores nas Universidades e nas Organizações Industriais, a teoria da Proteção de Sistemas Elétricos ganhou suporte em uma excelente base matemática. Tem-se percebido que, em muitos casos, as investigações matemáticas confirmam o fato de que relés tradicionais tiveram boas soluções para o problema de operações dos relés. Isso destaca a importância da teoria e prática estarem andando juntas (PHADKE;THORP 2009).

Em 1977, Phadke e sua equipe (1977) deduziram as equações de *performance* de um relé de distância de alta velocidade, que são baseadas na teoria de componentes simétricas. Uma única equação mostra-se adequada para lidar com todos os tipos de falhas que possam ocorrer em um sistema de potência trifásico. Já em 1979, o mesmo pesquisador apresentou um conceito de componentes simétricas aplicadas a relés de distância. Nesse artigo (PHADKE et al., 1979), são descritas características do algoritmo do relé e dos notáveis resultados dos testes de laboratórios realizados. Em 1981, Phadke e seus colaboradores novamente lançam novo artigo sobre o assunto, onde são descritos testes de campo em uma Linha de Transmissão feitos por um microcomputador baseados em relé de distância com componentes simétricas (PHADKE et al., 1981).

Em 1988, foi publicada a primeira edição de Computer Relaying (PHADKE;THORP, 2009). As duas décadas seguintes foram de aceitação generalizada dos relés digitais pelos engenheiros de potência em todo o mundo. De fato, em muitos países, os relés digitais são os dispositivos de proteção atuantes e seria difícil encontrar relés eletromecânicos ou eletrônicos com recursos comparáveis. É evidente que a economia de fabricação de relés digitais desempenhou um papel importante em tornar isso possível, e a melhoria do desempenho, a verificação de autoatendimento e o acesso às configurações do relé através de linhas de comunicação foram as principais características desta tecnologia, que trouxe sua aceitação a tão grande escala.

Relés de Distância, seja tipo-fase ou tipo-terra, são frequentemente aplicados como a principal forma de proteção de linhas de transmissão (FILOMENA et al., 2008). A função desses relés é remover prontamente de serviço qualquer elemento do sistema de potência que começa a operar de uma maneira irregular. Em geral, relés não previnem danos ao equipamento; eles operam após algum dano detectado já ter ocorrido. Sua finalidade é limitar, na medida do possível, ainda mais danos aos equipamentos, minimizar o perigo às pessoas, reduzir influência em outros aparelhos e, acima de tudo, remover o equipamento faltoso do sistema de potência tão rápido quanto possível, para que a integridade e estabilidade do restante do sistema seja mantida. O aspecto de controle do sistema do relé também ajuda o sistema de potência a retornar para uma configuração aceitável o mais rapidamente para que o serviço aos clientes seja restabelecido.

Os relés de distância tradicionais fazem uma comparação entre a impedância aparente de sequência positiva medidas de um terminal da linha (o chamado terminal local) e a impedância característica de operação do relé, a fim de decidir entre a abertura da linha, ou não. Esse procedimento é executado após a detecção da ocorrência de uma falta e é baseado na impedância da linha para a decisão de atuação. O relé somente atua (decisão de abertura da

linha) se é detectada uma falta dentro da sua área de proteção, a chamada zona primária (para atuação instantânea).

Durante uma falta de baixa resistência, é possível alcançar razoável precisão usando esse método, uma vez que a impedância efetiva entre o relé e o ponto da falta tem valor próximo ao da impedância aparente medida pelo relé. No caso de relés de distância tipo fase, a impedância efetiva é dada pela soma da impedância total de ambas fases sujeitas à falta (ANDERSON, 1999). Relés tradicionais são projetados para operar como proteção primária para um valor de impedância limitado. Para faltas fora dessa zona, relés de distância podem ser usados como auxílio na proteção, com coordenação de atraso de tempo (HOROWITZ;PHADKE, 2006).

A resistência de falta introduz um erro na estimativa da distância obtida com relés tradicionais, uma vez que em faltas resistivas, a distância entre o relé e o ponto da falta não é necessariamente proporcional à impedância vista pelo relé (ZIEGLER, 2006; ANDERSON, 1999; HOROWITZ;PHADKE, 1995). O erro introduzido pela resistência de falta para uma falta simétrica (HOROWITZ;PHADKE, 1995) é dado por:

$$Z_A = \frac{E}{I} = Z_L + R_F \cdot \left( \frac{I_R}{I_S} + 1 \right) \quad (2.1)$$

onde  $Z_A$  é a impedância aparente medida,  $E$  e  $I$  são os fasores fundamentais de tensão e corrente calculados com as informações obtidas do ponto de localização do relé,  $Z_L$  é a impedância atual da linha entre o relé e o ponto da falta,  $R_F$  é a resistência de falta, e  $I_R$  e  $I_S$  são, respectivamente, os fasores de corrente dos terminais remoto e local da linha (HOROWITZ;PHADKE, 1995). A resistência de falta causa um fenômeno de subcance –

que será melhor explicado posteriormente – e sua representação gráfica pode ser visualizada na figura 2.1.

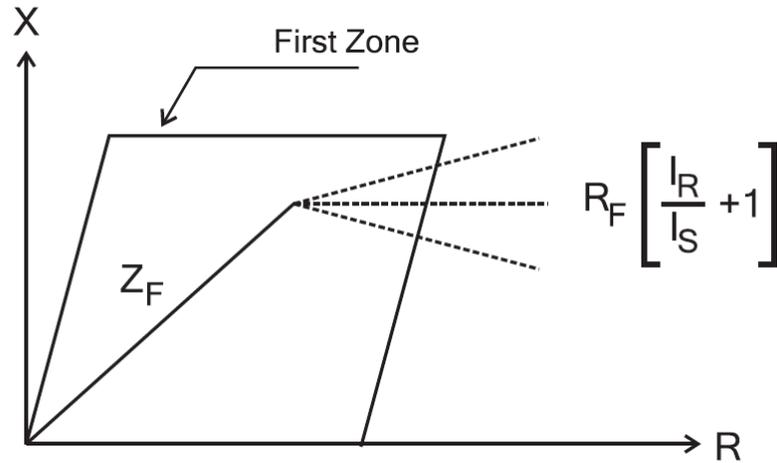


Figura 2.1: Representação do fenômeno de subalcance em relés de distância, devido a resistência de falha (FILOMENA et al, 2008).

O erro introduzido pela resistência de falha para uma falta fase-fase, considerando o relé de distância tradicional baseado em componentes simétricas, depende das fases envolvidas na falta. Essa representação faz com que os relés das fases A-B e C-A vejam impedâncias que também são afetadas pelas impedâncias de sequência negativa do sistema de potência (ANDERSON, 1999). Matematicamente, as impedâncias aparentes vistas pelos relés das fases A-B, B-C e C-A são dadas respectivamente por:

$$Z_{m_{ab}} = Z_{L1} + \frac{Z_F}{C_1 + a \cdot C_2} + \frac{3 \cdot Z_2}{(1 - a^2) \cdot C_1 + (a - 1) \cdot C_2} \quad (2.2)$$

$$Z_{m_{bc}} = Z_{L1} + \frac{Z_F}{C_1 + C_2} \quad (2.3)$$

$$Z_{m_{ca}} = Z_{L1} + \frac{Z_F}{C_1 + a^2 \cdot C_2} + \frac{3 \cdot Z_2}{(a - 1) \cdot C_1 + (1 - a^2) \cdot C_2} \quad (2.4)$$

onde  $a = e^{j120^\circ}$ , onde  $Z_{L1}$  é a impedância de sequência positiva da linha,  $Z_F$  é a impedância de falta,  $Z_2$  é a impedância equivalente da rede de sequência negativa do sistema de potência, e  $C_1$  e  $C_2$  são constantes que dependem das redes de sequências, conforme definido em (ANDERSON, 1999).

A partir de (2.2), (2.3) e (2.4), fica claro que a aproximação por componentes simétricas depende de algumas variáveis do sistema, dificultando o entendimento de vários efeitos diferentes sobre a impedância medida. Entretanto, a maior dificuldade diz respeito à resistência de falta, que é uma variável estocástica por natureza.

Uma maneira de superar o efeito resistência de falta é compensando esta variável. Relés de distância tradicionais alcançam tal compensação usando uma característica quadrilateral, que depende o ângulo entre as correntes do terminal local e do terminal remoto (ZIEGLER, 2006). Aplicando esta técnica, é possível obter uma melhor cobertura da resistência de falta e de compensação do arco, sem problemas associados com a perda de operação por sobrecarga de relés de distância. Outras formas de zonas de atuação de relés de distância também são possíveis (ZIEGLER, 2006; EREZZAGUI;CROSSLEY, 2003; LI;LAI, 1997; XIA;DAVID;LI, 1994). No entanto, nestas técnicas a compensação resistência de falta são limitadas pelo carregamento máximo da linha, o que pode causar perda de operação do relé para faltas com resistência de falta de alto valor.

Para superar essa limitação, nos últimos anos foram publicados trabalhos que sugerem o uso de estimativa da resistência de falta nos algoritmos de relés de distância (EISSA, 2006; WAIKAR;CHIN, 1998; WAIKAR;ELANGOVAN;LIEW, 1997; WAIKAR;LIEW;ELANGOVAN, 1997; WAIKAR;ELANGOVAN;LIEW, 1994). Esses trabalhos fornecem uma estimativa da resistência de falta e compensação antes da decisão de abertura, objetivando atingir melhores resultados na operação de relés de distância digitais tipo terra. A

resistência de falta é estimada utilizando componentes simétricas ou análise modal, restringindo o uso dessas técnicas para sistemas equilibrados e linhas transpostas. Outros trabalhos também sugerem o uso de relés adaptativos para superar o efeito de resistência de falta, usando tensão de polarização (LIU et al., 2008). Em ambas as abordagens, nenhuma teoria foi desenvolvida especificamente para os relés de distância tipo fase, o que limita a utilização destas técnicas para faltas fase-terra.

Recentemente, através de trabalho realizado no Laboratório de Sistemas Elétricos de Potência (LASEP), foi publicado um trabalho estendido de (FILOMENA et al, 2008), em que é proposta uma técnica de compensação de resistência de falta utilizando coordenadas de fase, para relés de distância tipo-fase. A estimativa da resistência de falta é obtida usando medições de tensão e corrente do terminal local em um processo iterativo. O método é adequado tanto para linhas transpostas, como para linhas não transpostas, seja em sistemas equilibrados ou desequilibrados, e utiliza uma configuração adaptativa e resistência de falta constante durante o período analisado (SALIM et al, 2010). Porém o sistema utilizado se restringe a utilização de uma configuração de carga constante no terminal remoto da linha, o que restringe seu uso na proteção de linhas de transmissão.

A seguir será realizada uma breve descrição sobre relés de distância e o equacionamento por componentes simétricas para relés de distância tradicionais tipo fase. Esse equacionamento será utilizado para posterior comparação com a metodologia proposta nesse trabalho.

## 2.2 Atuação de um Relé de Distância

Conforme já visto anteriormente, relés de distância, tanto tipo fase como o tipo terra, são frequentemente empregados como principal forma de proteção de linhas de transmissão. Eles respondem pela impedância entre o local do relé e o ponto da falta. Como a impedância por unidade de distância é razoavelmente constante, esses relés respondem pela distância até a falta em linhas de transmissão - consequentemente seu nome.

Proteção de sub-alcance é uma forma de proteção na qual os relés em um dado terminal não operam para faltas em locais remotos no equipamento protegido. Essa definição especifica que o relé é configurado de forma a não ver a falta além de uma dada distância. O relé de distância é adaptado para sub-alcance o terminal remoto (HOROWITZ; PHADKE, 1995).

Proteção de sobre-alcance é uma forma de proteção na qual os relés em um terminal operam para faltas além do próximo terminal. Eles podem ser impedidos de atuarem até que um sinal que chega de um terminal remoto tenha indicado se a falta está além da seção de linha protegida. Esta restrição adicional estabelecida em proteção de sobre-alcance evita perda de coordenação entre os relés (HOROWITZ; PHADKE, 1995).

A zona de relés de distância é aberta no terminal distante. Em outras palavras, o ponto remoto de alcance de um relé de distância não pode ser precisamente determinado, e alguma incerteza sobre seu alcance exato deve ser aceita. Essa incerteza de alcance é tipicamente em torno de 5% da configuração. De acordo com a Figura 2.2, a zona de proteção desejada é mostrada através de uma linha pontilhada. A situação ideal seria detectar todas as faltas dentro da área pontilhada instantaneamente (HOROWITZ; PHADKE, 1995).

Entretanto, devido à incerteza no terminal distante, para ter certeza de não sobre-alcance o fim da seção de linha, deve-se aceitar uma zona-1 de sub-alcance.

É comum configurar essa zona para ter entre 85% e 90% do comprimento da linha e possuir tempo de operação instantâneo. Deve-se estar claro que a área entre o fim da zona-1 e o barramento B não está protegida. Conseqüentemente, o relé de distância é equipado com outra zona, a qual sobre-alcança além do terminal remoto da linha de transmissão. Esta é conhecida como zona-2, a qual precisa diminuir o tempo de operação para faltas na próxima seção de linha (F2 na Figura 2.2) para que a zona-1 da próxima seção possa operar antes da zona-2 do relé de distância de A. Esse atraso coordenado para a zona-2 é usualmente da ordem de 0.3 segundos.

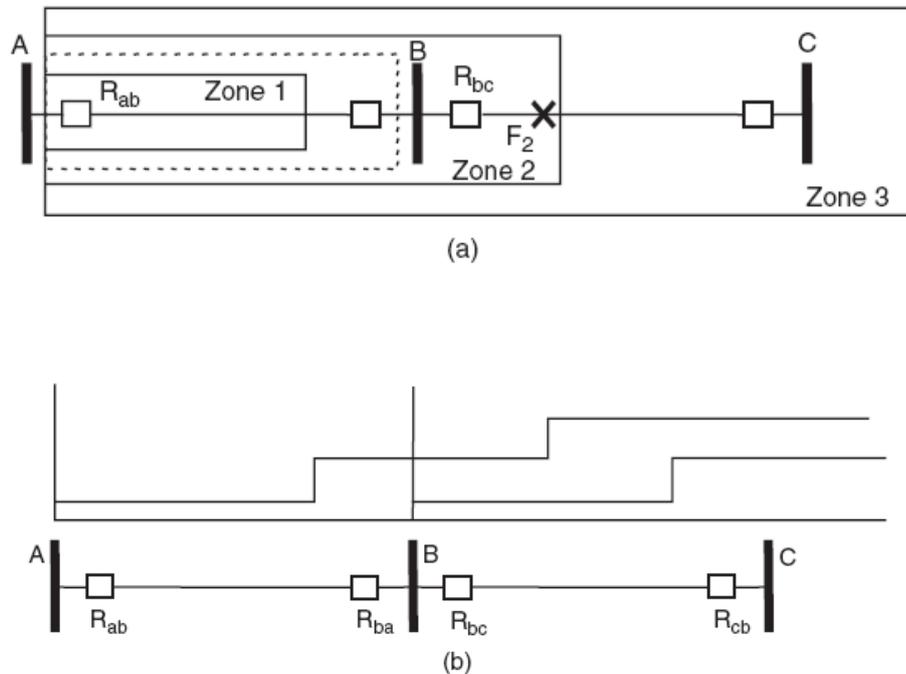


Figura 2.2 – Três Zonas de Proteção de um Relé de Distância

O alcance da segunda zona está em torno de 120% a 150% do comprimento da linha AB. Deve-se ter em mente que a zona-2 do relé de AB não pode ultrapassar o alcance da zona-1 do relé de BC, caso contrário algumas faltas podem existir simultaneamente nas segundas zonas dos relés de AB e BC, o que pode levar a aberturas desnecessárias de ambas as linhas.

Pode ser verificado que a segunda zona de um relé de distância também auxilia o relé de distância da linha vizinha. Contudo, isso é verdade para apenas parte dessa seção vizinha, dependendo do quão longe a segunda zona alcança. A fim de fornecer uma função de assistência para a linha inteira, é normal oferecer ainda outra zona de proteção para o relé em A. Ela é conhecida como a terceira zona de proteção (também representada na Figura 2.1), a qual usualmente estende-se para 120-180% da próxima seção de linha. Essa zona deve coordenar em tempo e distância com a segunda zona do circuito vizinho, e usualmente o tempo de operação da terceira zona é da ordem de 1 segundo (HOROWITZ; PHADKE, 1995).

Não é sempre possível ter configurações aceitáveis para as duas zonas de sobrealcançe de relés de distância. Primeiramente, uma complicação é causada por comprimentos desiguais das linhas adjacentes. Se o comprimento de uma linha à jusante é menor que 20% da linha que está sendo protegida, a zona-2 desta certamente sobrealcançará a primeira zona da linha menor. Similarmente, a zona-3 da primeira linha pode sobre-alcançar a zona 2 da próxima linha.

As normas para parametrização do alcance das zonas mencionadas anteriormente devem ser consideradas aproximadas, e têm de ser ajustadas de acordo com cada situação. Zona-3 era originalmente aplicada como uma assistência remota para as zonas 1 e 2 de uma linha adjacente no caso em que uma falha do relé impede a eliminação da falta local. A configuração do alcance, contudo, é um problema complexo e é assunto de muitos estudos e sugestões em progresso.

A caracterização da zona 3 deve fornecer proteção contra faltas, mas não pode operar para condições de sistema normais, embora incomuns, como cargas pesadas ou oscilações na estabilidade. Programas dos relés fazem previsões para identificar essas condições através das características de injeção de cargas no sistema. Outra consideração é o efeito das

contribuições da corrente de falta de linhas e barramentos intermediários. (HOROWITZ;PHADKE, 2006).

### **2.3 Equacionamento de um Relé de Distância Convencional**

Segundo (HOROWITZ; PHADKE, 1995), em um sistema de potência trifásico, há dez tipos distintos de possíveis faltas: falta trifásica, três faltas fase-fase, três faltas fase-terra e três faltas fase-fase-terra.

As equações que governam as relações entre tensões e correntes no local do relé são diferentes para cada tipo de falta. Portanto, deve-se esperar que existam vários relés de distância, cada um monitorando um diferente par de entrada de tensão e corrente, a fim de medir a distância até a falta corretamente.

É um princípio fundamental do relé de distância que, não importando o tipo de falta envolvida, a tensão e a corrente usadas para sensibilizar o relé apropriado são tais que o relé irá medir a impedância de sequência positiva para a falta. Uma vez que isso é alcançado, a parametrização das zonas de todos os relés pode ser baseada na impedância de sequência positiva total da linha, não obstante o tipo de falta.

A seguir será apresentada a metodologia tradicional de análise para faltas entre fases, através de componentes simétricas, na qual serão determinadas as entradas de tensões e correntes apropriadas a serem usadas nos relés de distância responsáveis para cada uma dessas faltas.

### 2.3.1 Metodologia Tradicional para Falta Fase-Fase

A Figura 2.3 mostra a representação por componentes simétricas para uma falta entre as fases 'b' e 'c' de uma linha de transmissão trifásica. As tensões de sequência positiva e negativa no ponto de falta são iguais, e dadas por:

$$E_{1f} = E_{2f} = E_1 - Z_{1f} \cdot I_1 = E_2 - Z_{1f} \cdot I_2 \quad (2.5)$$

onde  $E_{1f}$ ,  $E_{2f}$ ,  $I_1$  e  $I_2$  são as componentes simétricas das tensões e correntes no local do relé, e as impedâncias de sequência positiva e negativa da linha de transmissão são iguais.

Segue de (2.5) que:

$$\frac{E_1 - E_2}{I_1 - I_2} = Z_{1f} \quad (2.6)$$

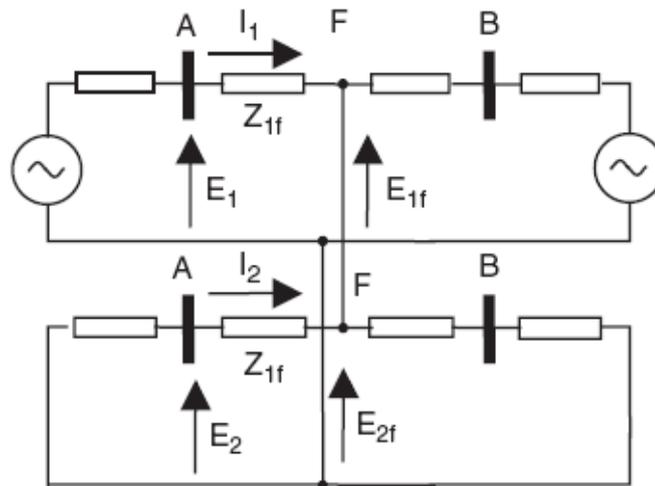


Figura 2.3 – Circuito com Componentes Simétricas para Falta B-C

Ainda, uma vez que as tensões de fase no local do relé são dadas por:

$$E_b = E_0 + a^2 \cdot E_1 + a \cdot E_2 \quad (2.7)$$

$$E_c = E_0 + a \cdot E_1 + a^2 \cdot E_2 \quad (2.8)$$

Substituindo (2.7) e (2.8) em (2.6), tem-se:

$$\frac{E_b - E_c}{I_b - I_c} = \frac{E_1 - E_2}{I_1 - I_2} = Z_{1f} \quad (2.9)$$

Portanto, um relé de distância, conectado entre as fases, e que é alimentado pela diferença entre as correntes das duas fases, irá medir a impedância de sequência positiva quando uma falta entre as fases 'b' e 'c' ocorre.

### 2.3.2 Metodologia Tradicional para Falhas Fase-Fase-Terra e Falhas Trifásicas

Análises similares à realizada para o caso de faltas fase-fase mostram que, para os outros dois tipos de falta fase-fase, quando as correspondentes diferenças das tensões e correntes são usadas para sensibilizar os relés, a correta impedância de sequência positiva para a falta será medida.

O diagrama de componentes simétricas para uma falta b-c-terra está mostrado na Figura 2.4. As equações de desempenho para as partes de sequência positiva e negativa do circuito equivalente são exatamente as mesmas que foram mostradas para faltas b-c.

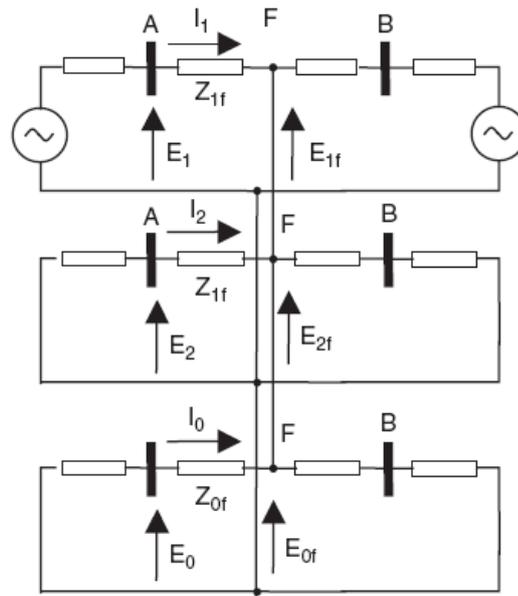


Figura 2.4: Circuito com Componentes Simétricas para Faltas B-C-g

Finalmente, para uma falta trifásica, o diagrama de componentes simétricas é como está mostrado na Figura 2.5. Para esse caso:

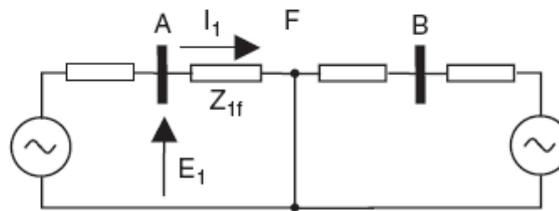


Figura 2.5: Circuito com Componentes Simétricas para Faltas Trifásicas

$$E_1 = E_a = Z_{1f} \cdot I_1 = Z_{1f} \cdot I_a \quad (2.10)$$

$$E_2 = E_0 = 0 \quad (2.11)$$

$$I_2 = I_0 = 0 \quad (2.12)$$

Ainda,  $E_a = E_1$ ,  $E_b = a^2 \cdot E_1$  e  $E_c = a \cdot E_1$ , e relações similares permanecem

para as correntes de fase. Conseqüentemente, para uma falta trifásica:

$$\frac{E_a - E_b}{I_a - I_b} = \frac{E_b - E_c}{I_b - I_c} = \frac{E_c - E_a}{I_c - I_a} = Z_{1f} \quad (2.13)$$

As diferenças das tensões e correntes de fase usadas em (2.13) são conhecidas como tensões e correntes 'delta'. Relés energizados por essas tensões e correntes 'delta' respondem pela impedância de sequência positiva para uma falta multi-fases. Uma complementação de três relés de distância trifásicos cobre as sete faltas multi-fases entre eles. Para faltas fase-fase, ou faltas fase-fase-terra, um dos três relés mede a impedância de sequência positiva para a falta, enquanto que para uma falta trifásica todos três relés medem a correta impedância. As conexões para os relés eletromecânicos tipo-fase estão mostradas esquematicamente na Figura 2.6.

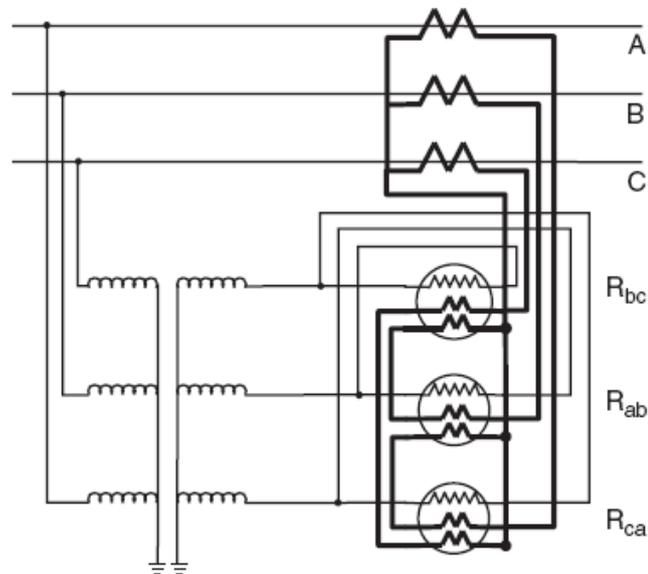


Figura 2.6: Conexões de Relés de Distância para Faltas Tipo-Fase

### 3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PROPOSTA PARA RELÉS DE DISTÂNCIA TIPO FASE

#### 3.1 Análise Matemática para Falta Fase-Fase

A Figura 3.1 representa uma falta fase-fase A-B em um sistema genérico de transmissão. Por fins de simulação e equacionamento, será apresentado o desenvolvimento matemático apenas para o caso de falta entre esse par de fases. Análises similares mostram que, para faltas entre a fase B e C, ou C e A, o equacionamento é similar ao apresentado nesse capítulo.

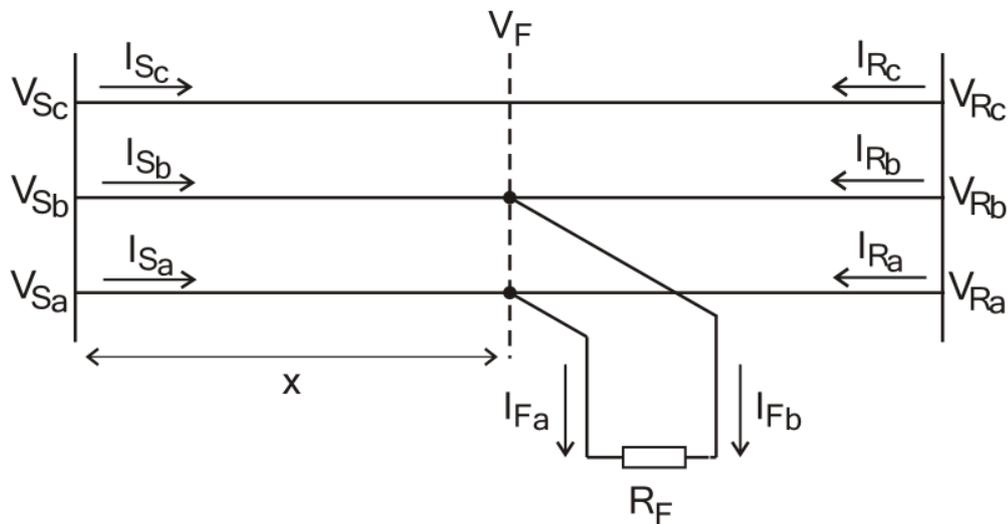


Figura 3.1: Representação da Falta Fase-Fase em Sistema Genérico de Transmissão

De acordo com a figura acima, na qual está representada uma falta do tipo fase-fase A-B, pode-se desenvolver a seguinte equação matricial para representar as tensões do terminal local:

$$\begin{bmatrix} V_{S_a} \\ V_{S_b} \\ V_{S_c} \end{bmatrix} = x \cdot \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{S_a} \\ I_{S_b} \\ I_{S_c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{F_a} \\ V_{F_b} \\ V_{F_c} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

onde:

$V_{S_m}$  Tensão na fase  $m$  no ponto do relé [V]

$x$  Distância entre o relé e o ponto da falta [m]

$Z_{mm}$  Impedância própria da fase  $m$  [ $\Omega/m$ ]

$Z_{mn}$  Impedância mútua entre as fases  $m$  e  $n$  [ $\Omega/m$ ]

$I_{S_m}$  Corrente da fase local  $m$  no ponto do relé [A]

$V_{F_m}$  Tensão no ponto da falta da fase  $m$  [V]

$m, n$  Fases  $a, b$  ou  $c$

Desenvolvendo a equação 3.1, tem-se que a tensão da fase A no ponto de falta é dada

por:

$$V_{F_a} = V_{S_a} - x \cdot [Z_a] \cdot [I_S] \quad (3.2)$$

onde  $[Z_a]$  é o vetor de impedâncias da fase A e  $[I_S]$  é o vetor de correntes no local do relé.

Expandindo a equação 3.2, a equação 3.3 é obtida:

$$\begin{aligned} V_{Fa} &= V_{Sa} - x \cdot [Z_{aa} \cdot I_{Sa} + Z_{ab} \cdot I_{Sb} + Z_{ac} \cdot I_{Sc}] \\ &= R_F \cdot I_{Fa} + V_{Fb} \end{aligned} \quad (3.3)$$

onde  $V_{Fb}$  é a tensão da fase B no ponto onde ocorre a falta,  $R_F$  é a resistência de falta e  $I_{Fa}$  é a corrente de falta, dada pela relação entre as correntes do terminal local ( $I_{Sa}$ ) e do terminal remoto ( $I_{Ra}$ ):

$$I_{Fa} = I_{Sa} + I_{Ra} \quad (3.4)$$

Similarmente,  $V_{Fb}$  é dada por (3.5):

$$\begin{aligned} V_{Fb} &= V_{Sb} - x \cdot [Z_{ba} \cdot I_{Sa} + Z_{bb} \cdot I_{Sb} + Z_{bc} \cdot I_{Sc}] \\ &= R_F \cdot I_{Fb} + V_{Fa} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Utilizando as equações (3.3) a (3.5), é possível obter (3.6):

$$\begin{aligned} V_{Sa} &= R_F \cdot (I_{Ra} + I_{Sa}) \\ &+ x_a \cdot (Z_{aa} \cdot I_{Sa} + Z_{ab} \cdot I_{Sb} + Z_{ac} \cdot I_{Sc}) \\ &+ V_{Sb} - x_b \cdot (Z_{ba} \cdot I_{Sa} + Z_{bb} \cdot I_{Sb} + Z_{bc} \cdot I_{Sc}) \end{aligned} \quad (3.6)$$

A impedância aparente da linha da fase A vista pelo relé, localizado no terminal local da linha, é dada por:

$$Z_{map} = \frac{V_{Sa}}{I_{Sa}} \quad (3.7)$$

Utilizando as equações (3.6) e (3.7), a impedância aparente medida,  $Z_{map}$ , pode ser reformulada para:

$$Z_{map} = R_F \cdot \left[ 1 + \frac{I_{Ra}}{I_{Sa}} \right] + \frac{V_{Sb}}{I_{Sa}} + x_a \cdot \left[ Z_{aa} + Z_{ab} \frac{I_{Sb}}{I_{Sa}} + Z_{ac} \frac{I_{Sc}}{I_{Sa}} \right] - x_b \cdot \left[ Z_{ba} + Z_{bb} \frac{I_{Sb}}{I_{Sa}} + Z_{bc} \frac{I_{Sc}}{I_{Sa}} \right] \quad (3.8)$$

Analisando a equação (3.8), a impedância aparente medida é dada pela adição de quatro componentes distintas. O primeiro termo representa o efeito da resistência de falta. Claramente, esse efeito não é somente determinado pelo seu valor, mas também pela relação das correntes do terminal remoto e local durante a falta, similar ao que pode ser observado no comportamento dos relés tradicionais (ANDERSON, 1999). Esse termo causa o chamado fenômeno de subalcance, no qual o relé deixa de atuar para faltas dentro de sua zona de proteção.

O segundo termo do lado direito da equação,  $V_{Sb}/I_{Sa}$ , aparece devido à formulação proposta nesse trabalho, e sua influência será discutida com mais detalhes no Apêndice A.

O terceiro termo representa a impedância da seção de linha entre o relé e o ponto da falta, considerando a fase A. A aproximação por coordenadas de fase mostra que essa impedância depende das correntes trifásicas, devido ao acoplamento mútuo existente entre as fases. Similarmente, o quarto termo também representa uma impedância, entretanto considerando a influência da fase B. Esse último termo, que apresenta sinal negativo, se não for considerado, torna-se responsável pelo fenômeno de sobrealcance, no qual o relé atua para faltas fora de sua zona de proteção.

Conforme visto na Figura 3.1, a distância  $x$  entre o local do relé e o ponto faltoso é considerada a mesma para as fases A e B. Porém, a equação (3.8) considera separadamente  $x_a$  e  $x_b$  para fins de melhor interpretação física da fórmula. Na prática, essas duas variáveis têm valores muito próximos, portanto, no algoritmo desenvolvido essas duas variáveis serão consideradas iguais, isto é,  $x_a = x_b = x$ .

Baseado em (3.8) e nas suposições discutidas, as configurações do relé de fase proposto são definidas como:

- $l$  Comprimento total da linha;
- $p$  Percentagem do comprimento de linha a ser protegido;
- $[Z]$  Matriz de Impedância da Linha.

Durante a ocorrência da falta, as correntes trifásicas são medidas online e o critério de atuação do relé é determinado pelo comprimento de linha a ser protegido. Através dessa configuração, a impedância medida pelo relé poderá ser comparada a fim de determinar a decisão de abertura.

Rearranjando a equação (3.8), a equação final para o relé de distância tipo fase proposto é então obtida:

$$Z_{map} - R_F \cdot \left[ 1 + \frac{I_{Ra}}{I_{Sa}} \right] - \frac{V_{Sb}}{I_{Sa}} = l \cdot p \cdot \left[ (Z_{aa} - Z_{ba}) + (Z_{ab} - Z_{bb}) \frac{I_{Sb}}{I_{Sa}} + (Z_{ac} - Z_{bc}) \frac{I_{Sc}}{I_{Sa}} \right] \quad (3.9)$$

Durante a ocorrência da falta, o termo direito em (3.9) é determinado através das correntes medidas *online* e das configurações de proteção do relé. Além disso, a impedância medida  $Z_{map}$  é diretamente compensada por  $V_{Sb}/I_{Sa}$  e pela estimativa da resistência de falta, cujo algoritmo será estudado na seção 3.3. Finalmente, o relé determina sua decisão final de abertura comparando o critério de atuação e a impedância compensada medida. Nota-se que o relé também é adaptativo, pois sua decisão se baseará em compensar a impedância medida, que varia na medida em que os valores medidos *online* variam.

A equação (3.9) foi desenvolvida para faltas fase-fase A-B. Expandindo a formulação para qualquer par de fases faltosas, o resultado torna-se:

$$Z_{mst} - R_F \cdot \left[ 1 + \frac{I_{Rs}}{I_{Ss}} \right] - \frac{V_{St}}{I_{Ss}} = l \cdot p \cdot \left[ (Z_{ss} - Z_{ts}) + (Z_{st} - Z_{tt}) \frac{I_{St}}{I_{Ss}} + (Z_{su} - Z_{tu}) \frac{I_{Su}}{I_{Ss}} \right] \quad (3.10)$$

onde  $s$  e  $t$  são o par de fases faltosas (AB, BC ou CA),  $u$  é a fase não-faltosa e  $Z_{mst} = V_{Ss}/I_{Ss}$  é a impedância medida no local do relé. A partir de (3.10) fica claro que três algoritmos são necessários para cobrir os três tipos de falta fase-fase.

### 3.2 Análise Numérica da Estimativa da Resistência de Falta Usando Coordenadas de Fase para Faltas Fase-Fase

Conforme explicado na seção anterior, a compensação da resistência de falta também depende da corrente do barramento remoto. Essa seção apresenta o algoritmo proposto para a compensação da resistência de falta sob faltas fase-fase, utilizando as variáveis medidas online e a estimativa dos valores das variáveis do terminal remoto, para assim obter o valor da corrente de falta. A estimativa é apresentada para faltas fase-fase A-B, entretanto, pode ser estendida para qualquer tipo de falta fase-fase que possa vir a ocorrer no Sistema Elétrico de Potência.

Recorrendo à Figura 3.1, a qual mostra uma falta A-B, tem-se que as tensões medidas no terminal local da fase A e no ponto da falta são dadas por:

$$V_{Sa} = V_{Fa} + x \cdot (Z_{aa} \cdot I_{Sa} + Z_{ab} \cdot I_{Sb} + Z_{ac} \cdot I_{Sc}) \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} V_{Fa} &= V_{Fb} + R_F \cdot I_{Fa} \\ &= [V_{Sb} - x \cdot (Z_{ba} \cdot I_{Sa} + Z_{bb} \cdot I_{Sb} + Z_{bc} \cdot I_{Sc})] + R_F \cdot I_{Fa} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Assumindo que a impedância de falta é estritamente resistiva e constante durante o período analisado, é possível substituir (3.12) em (3.11) e obter uma nova equação:

$$V_{Sa} - V_{Sb} = R_F \cdot I_{Fa} + x \cdot [(Z_{aa} - Z_{ba}) \cdot I_{Sa} + (Z_{ab} - Z_{bb}) \cdot I_{Sb} + (Z_{ac} - Z_{bc}) \cdot I_{Sc}] \quad (3.13)$$

Rearranjando (3.13) em suas partes real e imaginária, resultando respectivamente em (3.14) e (3.15):

$$V_{Sa(r)} - V_{Sb(r)} = x \cdot M_1 + R_F \cdot I_{Fa(r)} \quad (3.14)$$

$$V_{Sa(i)} - V_{Sb(i)} = x \cdot M_2 + R_F \cdot I_{Fa(i)} \quad (3.15)$$

onde os índices  $r$  e  $i$  representam, respectivamente, as partes real e imaginária dos termos e:

$$M_1 = \sum_{k=\{a,b,c\}} [(Z_{ak(r)} - Z_{bk(r)}) \cdot I_{Sk(r)} - (Z_{ak(i)} - Z_{bk(i)}) \cdot I_{Sk(i)}] \quad (3.16)$$

$$M_2 = \sum_{k=\{a,b,c\}} [(Z_{ak(r)} - Z_{bk(r)}) \cdot I_{Sk(i)} + (Z_{ak(i)} - Z_{bk(i)}) \cdot I_{Sk(r)}] \quad (3.17)$$

É possível rearranjar (3.14) e (3.15) em forma matricial, obtendo a equação (3.18):

$$\begin{bmatrix} V_{Sa(r)} - V_{Sb(r)} \\ V_{Sa(i)} - V_{Sb(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & I_{Fa(r)} \\ M_2 & I_{Fa(i)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ R_F \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

A partir de (3.18), nota-se que as diferenças entre as tensões do terminal local  $V_{Sa}$  e  $V_{Sb}$  são funções da distância de falta e da resistência de falta. É possível de obter (3.19), onde a distância e a resistência de falta dependem das correntes de falta e da diferença entre as tensões do terminal local, além dos parâmetros da linha,  $M_1$  e  $M_2$ :

$$\begin{bmatrix} x \\ R_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & I_{Fa(r)} \\ M_2 & I_{Fa(i)} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{Sa(r)} - V_{Sb(r)} \\ V_{Sa(i)} - V_{Sb(i)} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Como pode ser visto em (3.19), a resistência de falta e a distância de falta são independentes e suas expressões são dadas por (3.20) e (3.21):

$$x = \frac{I_{Fa(i)} \cdot (V_{Sa(r)} - V_{Sb(r)}) - I_{Fa(r)} \cdot (V_{Sa(i)} - V_{Sb(i)})}{M_1 \cdot I_{Fa(i)} - M_2 \cdot I_{Fa(r)}} \quad (3.20)$$

$$R_F = \frac{-M_2 \cdot (V_{Sa(r)} - V_{Sb(r)}) + M_1 \cdot (V_{Sa(i)} - V_{Sb(i)})}{M_1 \cdot I_{Fa(i)} - M_2 \cdot I_{Fa(r)}} \quad (3.21)$$

A partir de (3.20) e (3.21), é possível obter a distância de falta e a resistência de falta através dos parâmetros do sistema e da diferença entre as tensões do terminal local (variáveis medidas *online*, portanto previamente conhecidas), além da corrente de falta. Como o valor da corrente de falta não é conhecido, lança-se mão de um procedimento iterativo, similar ao que foi desenvolvido para relés de distância tipo terra (FILOMENA et al., 2008), trabalho que marcou o início do desenvolvimento de algoritmos com compensação da resistência de falta no LASEP. A distância de falta, entretanto, é significativamente mais afetada por um erro aditivo na corrente de falta do que a resistência de falta estimada, como demonstrado no Apêndice B. Como a corrente de falta é estimada por um processo numérico, o qual pode resultar em erros de estimação, a estimativa da distância de falta não é usada para finalidades de comparação ou convergência.

### 3.3 Procedimento Iterativo de Estimativa da Corrente de Falta

A partir da seção anterior, para encontrar o valor de  $x$  e  $R_F$  tem-se uma única variável desconhecida: o fasor da corrente de falta  $I_{Fa(r,i)}$ . Todas as outras variáveis são parâmetros do sistema ou variáveis medidas *online*.

Recorrendo à Figura 3.1, a corrente de falta pode ser obtida por:

$$I_{Fa} = I_{Sa} + I_{Ra} \quad (3.22)$$

onde  $I_{Ra}$  é a corrente do terminal remoto da fase A, variável também desconhecida durante a ocorrência da falta.

O valor da corrente do terminal remoto durante o período de falta é diferente do valor da mesma corrente no período pré-falta, devido à ocorrência de queda de tensão e à variação da dinâmica do sistema durante a ocorrência da falta. Por essa razão, uma técnica iterativa, descrita a seguir, é utilizada para estimar a corrente remota durante a falta, baseada no método iterativo desenvolvido por Lee e seus colaboradores (2004).

A corrente de falta é calculada pela estimativa do circuito equivalente de Thévenin a jusante da falta, ou seja, utiliza a tensão pré-falta da barra remota no procedimento de estimativa da corrente de falta. Esta tensão pré-falta do terminal remoto, por sua vez, deve ser estimada, pela corrente no terminal local e os valores da linha.

Segue o novo algoritmo proposto, que descreve os passos a serem executados para a realização do procedimento apresentado anteriormente.

1. Durante o período de falta, as tensões remotas e a corrente do terminal remoto,  $I_{Ra}$ , são assumidas inicialmente como tendo os mesmos valores do período pré-falta. Para inicializar o algoritmo, o contador de iterações (n) e o valor inicial da resistência de falta são zerados;
2. A corrente de falta é então calculada usando a equação  $I_{Fa} = I_{Sa} + I_{Ra}$ ;
3. A localização da falta ( $x$ ) e a Resistência de Falta ( $R_F$ ) são estimadas utilizando as equações (3.20) e (3.21) e, a partir da segunda iteração, a tensão do terminal remoto é

atualizada por:  $[V_R] = [V_F] + [Z_{rr}] \cdot [I_R]$ , onde  $[Z_{rr}]$  é a matriz de impedância da fonte trifásica do terminal remoto.

4. As tensões no ponto da falta são estimadas usando (3.23):

$$\begin{bmatrix} V_{F_a} \\ V_{F_b} \\ V_{F_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{S_a} \\ V_{S_b} \\ V_{S_c} \end{bmatrix} - x \cdot \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{S_a} \\ I_{S_b} \\ I_{S_c} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

5. A corrente do terminal remoto  $I_{R_a}$  tem seu valor atualizado através dos valores das tensões no ponto de falta, conforme as equações (3.24) e (3.25):

$$I_{R_a} = [Y_{aa} \ Y_{ab} \ Y_{ac}] [(V_{R_a} - V_{F_a}) \ (V_{R_b} - V_{F_b}) \ (V_{R_c} - V_{F_c})]^T \quad (3.24)$$

sendo que:

$$Y_{mn} = [(L - x) \cdot Z_{mn}]^{-1} \quad (3.25)$$

6. Checar se a resistência de falta  $R_F$  converge utilizando (3.26):

$$|R_F(n) - R_F(n-1)| < \delta \quad (3.26)$$

onde  $\delta$  é o parâmetro de convergência configurado de acordo com a precisão e o tempo de simulação desejados.

7. Caso  $R_F$  tenha convergido parar o procedimento, caso contrário, voltar ao passo número 2.

Na Figura 3.2 apresenta-se o diagrama de blocos do algoritmo proposto nesse trabalho para faltas fase-fase.

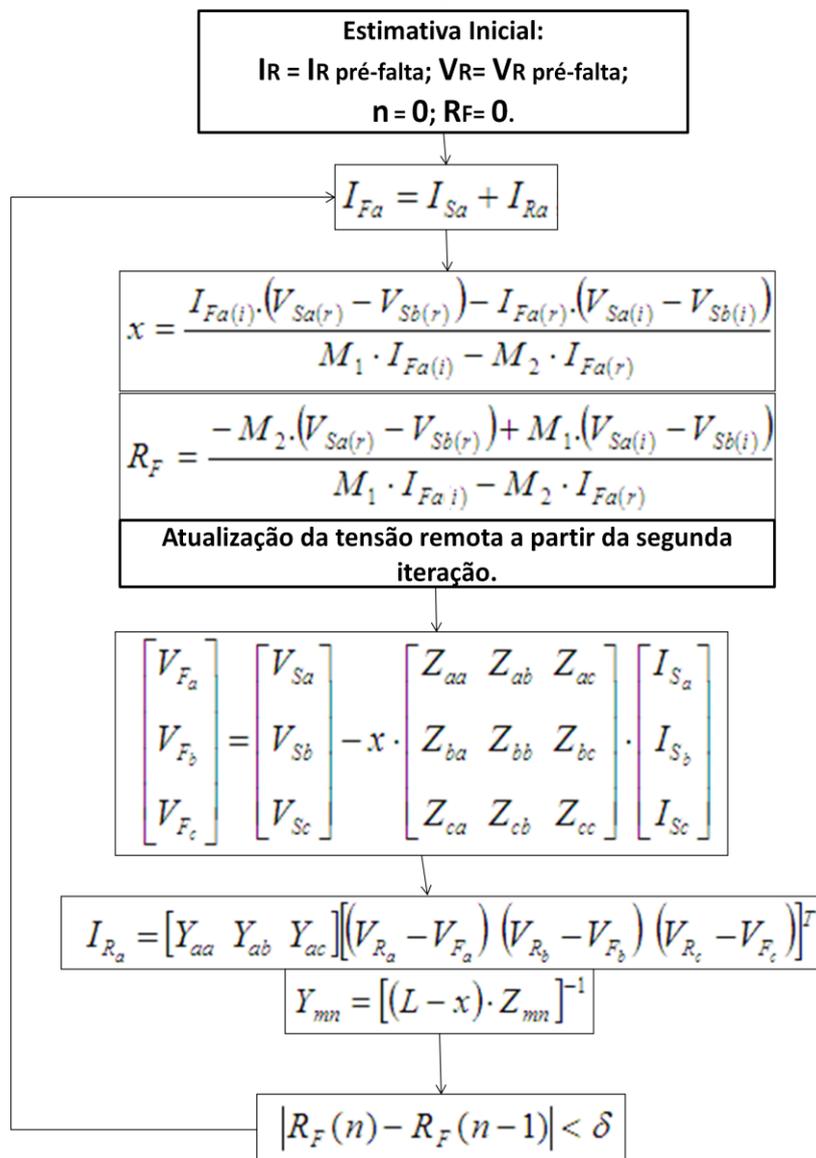


Figura 3.2: Diagrama de blocos com passo-a-passo matemático do método iterativo para faltas fase-fase

### 3.4 Formulação Matemática para Faltas Fase-Fase-Terra

A Figura 3.3 representa uma falta fase-fase-terra A-B-g em um sistema genérico de transmissão. Por fins de simulação e equacionamento, será apresentado o desenvolvimento matemático apenas para o caso de falta entre esse par de fases e a terra.

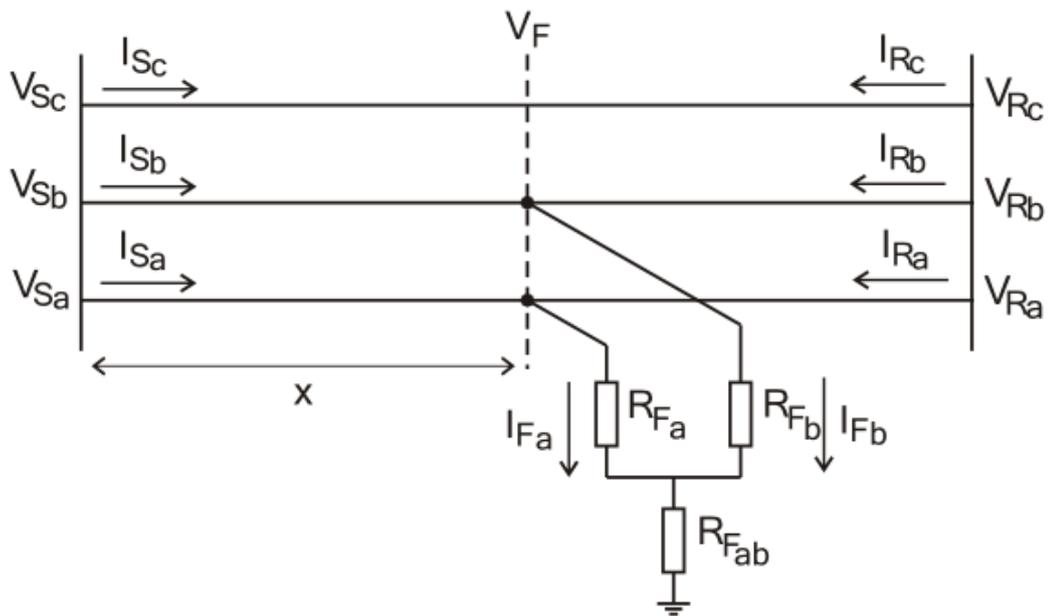


Figura 3.3: Representação da Falta Fase-Fase-Terra em Sistema Genérico de Transmissão

De acordo com a figura acima, na qual está representada uma falta do tipo fase-fase-terra A-B-g, novamente pode-se desenvolver a seguinte equação matricial para representar as tensões do terminal local:

$$\begin{bmatrix} V_{S_a} \\ V_{S_b} \\ V_{S_c} \end{bmatrix} = x \cdot \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{S_a} \\ I_{S_b} \\ I_{S_c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{F_a} \\ V_{F_b} \\ V_{F_c} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Desenvolvendo a equação 3.27, tem-se que a tensão da fase A no ponto de falta é dada por:

$$V_{Fa} = V_{Sa} - x \cdot [Z_a] \cdot [I_S] \quad (3.28)$$

onde  $[Z_a]$  é o vetor de impedância da fase A e  $[I_S]$  é o vetor de correntes no local do relé.

Expandindo a equação 3.28, a equação 3.29 é obtida:

$$\begin{aligned} V_{Fa} &= V_{Sa} - x \cdot [Z_{aa} \cdot I_{Sa} + Z_{ab} \cdot I_{Sb} + Z_{ac} \cdot I_{Sc}] \\ &= R_{Fa} \cdot I_{Fa} + R_{Fab} \cdot (I_{Fa} + I_{Fb}) \end{aligned} \quad (3.29)$$

onde  $R_{Fab}$  é a resistência de falta do terra,  $R_{Fa}$  é a resistência de falta da fase A,  $I_{Fa}$  é a corrente de falta da fase A e  $I_{Fb}$  é a corrente de falta da fase B.  $I_{Fa}$  e  $I_{Fb}$  são dadas pelas relações entre as correntes do terminal local e do terminal remoto, conforme (3.30) e (3.31):

$$I_{Fa} = I_{Sa} + I_{Ra} \quad (3.30)$$

$$I_{Fb} = I_{Sb} + I_{Rb} \quad (3.31)$$

Similarmente,  $V_{Fb}$  é dada por (3.32):

$$\begin{aligned} V_{Fb} &= V_{Sb} - x \cdot [Z_{ba} \cdot I_{Sa} + Z_{bb} \cdot I_{Sb} + Z_{bc} \cdot I_{Sc}] \\ &= R_{Fb} \cdot I_{Fb} + R_{Fab} \cdot (I_{Fa} + I_{Fb}) \end{aligned} \quad (3.32)$$

Utilizando as equações (3.29) a (3.32), é possível obter (3.33):

$$\begin{aligned}
V_{Sa} &= R_{Fa} \cdot (I_{Ra} + I_{Sa}) \\
&+ x_a \cdot (Z_{aa} \cdot I_{Sa} + Z_{ab} \cdot I_{Sb} + Z_{ac} \cdot I_{Sc}) \\
&+ V_{Sb} - x_b \cdot (Z_{ba} \cdot I_{Sa} + Z_{bb} \cdot I_{Sb} + Z_{bc} \cdot I_{Sc}) \\
&- R_{Fb} \cdot (I_{Rb} + I_{Sb})
\end{aligned} \tag{3.33}$$

Novamente, a impedância aparente da linha da fase A vista pelo relé, localizado no terminal local da linha, é dada por (3.34):

$$Z_{map} = \frac{V_{Sa}}{I_{Sa}} \tag{3.34}$$

Utilizando as equações (3.33) e (3.34), a impedância aparente medida,  $Z_{map}$ , pode ser reformulada para (3.35):

$$\begin{aligned}
Z_{map} &= R_{Fa} \cdot \left[ 1 + \frac{I_{Ra}}{I_{Sa}} \right] + \frac{V_{Sb}}{I_{Sa}} \\
&+ x_a \cdot \left[ Z_{aa} + Z_{ab} \frac{I_{Sb}}{I_{Sa}} + Z_{ac} \frac{I_{Sc}}{I_{Sa}} \right] \\
&- x_b \cdot \left[ Z_{ba} + Z_{bb} \frac{I_{Sb}}{I_{Sa}} + Z_{bc} \frac{I_{Sc}}{I_{Sa}} \right] \\
&- R_{Fb} \cdot \left[ \frac{I_{Sb} + I_{Rb}}{I_{Sa}} \right]
\end{aligned} \tag{3.35}$$

Analisando a equação (3.35), observa-se que neste caso a impedância aparente medida é dada pela adição de cinco componentes distintas. O primeiro termo representa o efeito da resistência de falta da fase A. Claramente, esse efeito não é somente determinado pelo seu valor, mas também pela relação das correntes do terminal remoto e local durante a

falta, similar ao que pode ser observado no comportamento dos relés tradicionais (ANDERSON, 1999).

Mais uma vez, o segundo termo do lado direito da equação,  $V_{Sb}/I_{Sa}$ , aparece devido à formulação proposta nesse trabalho.

O terceiro termo representa a impedância da seção de linha entre o ponto de relé e a falta, considerando a fase A. Similarmente, o quarto termo também representa uma impedância, entretanto considerando a influência da fase B.

Finalmente, o quinto termo representa o efeito da resistência de falta da fase B na impedância aparente medida. Mais uma vez o efeito da resistência de falta não é somente determinado pelo seu valor, como também pela relação das correntes do terminal local e do terminal remoto durante a falta.

Baseado em (3.35) e nas suposições discutidas, as configurações do esquema do relé de fase proposto são as mesmas definidas para o caso anterior:

- $l$  Comprimento total da linha;
- $p$  Percentagem do comprimento de linha a ser protegido;
- $[Z]$  Matriz de Impedância da Linha.

Rearranjando a equação (3.35), a equação final para o relé de distância tipo fase proposto é então obtida:

$$Z_{map} - R_{Fa} \cdot \left[ 1 + \frac{I_{Ra}}{I_{Sa}} \right] - \frac{V_{Sb}}{I_{Sa}} + R_{Fb} \cdot \left[ \frac{I_{Sb} + I_{Rb}}{I_{Sa}} \right] =$$

$$l \cdot p \cdot \left[ (Z_{aa} - Z_{ba}) + (Z_{ab} - Z_{bb}) \frac{I_{Sb}}{I_{Sa}} + (Z_{ac} - Z_{bc}) \frac{I_{Sc}}{I_{Sa}} \right] \quad (3.36)$$

Durante a ocorrência da falta, o termo direito em (3.36) é determinado através das correntes medidas online e das configurações de proteção do relé. Além disso, a impedância medida  $Z_{map}$  é diretamente compensada por  $V_{sb}/I_{sa}$  e pela estimativa das resistências de falta. Finalmente, o relé determina sua decisão final de abertura comparando o critério de atuação e a impedância compensada medida. Nota-se que o relé também é adaptativo, pois sua decisão se baseará em compensar a impedância medida, que varia na medida em que os valores medidos online variam.

A equação (3.36) foi desenvolvida para faltas fase-fase A-B-g. Expandindo a formulação para qualquer par de fases faltosas, o resultado torna-se:

$$Z_{map} - R_{Fs} \cdot \left[ 1 + \frac{I_{Rs}}{I_{Ss}} \right] - \frac{V_{St}}{I_{Ss}} + R_{Ft} \cdot \left[ \frac{I_{St} + I_{Rt}}{I_{Ss}} \right] =$$

$$l \cdot p \cdot \left[ (Z_{ss} - Z_{ts}) + (Z_{st} - Z_{tt}) \frac{I_{St}}{I_{Ss}} + (Z_{su} - Z_{tu}) \frac{I_{Su}}{I_{Ss}} \right] \quad (3.37)$$

onde  $s$  e  $t$  são o par de fases faltosas (AB, BC ou CA),  $u$  é a fase não-faltosa e

$Z_{mst} = V_{Ss}/I_{Ss}$  é a impedância medida no local do relé.

### 3.5 Análise Numérica da Estimativa da Resistência de Falta Usando Coordenadas de Fase para Faltas Fase-Fase-Terra

Recorrendo à Figura 3.2, a qual mostra uma falta A-B-g, tem-se que as tensões medidas no terminal local da linha da fase A e no ponto da falta são dadas por:

$$V_{Sa} = V_{Fa} + x \cdot (Z_{aa} \cdot I_{Sa} + Z_{ab} \cdot I_{Sb} + Z_{ac} \cdot I_{Sc}) \quad (3.38)$$

$$V_{Fa} = R_{Fa} \cdot I_{Fa} + R_{Fab} \cdot (I_{Fa} + I_{Fb}) \quad (3.39)$$

Ainda:

$$V_{Sa} = R_{Fa} \cdot I_{Fa} + R_{Fab} \cdot (I_{Fa} + I_{Fb}) + x \cdot (Z_{aa} \cdot I_{Sa} + Z_{ab} \cdot I_{Sb} + Z_{ac} \cdot I_{Sc}) \quad (3.40)$$

$$V_{Sb} = R_{Fb} \cdot I_{Fb} + R_{Fab} \cdot (I_{Fa} + I_{Fb}) + x \cdot (Z_{ba} \cdot I_{Sa} + Z_{bb} \cdot I_{Sb} + Z_{bc} \cdot I_{Sc}) \quad (3.41)$$

Assumindo que as impedâncias de falta são estritamente resistivas e constantes durante o período analisado, é possível substituir (3.40) e (3.41) em suas partes real e imaginária, resultando respectivamente em (3.42), (3.43), (3.44) e (3.45):

$$V_{Sa(r)} = x \cdot M_{1a} + R_{Fa} \cdot I_{Fa(r)} + R_{Fab} \cdot (I_{Fa(r)} + I_{Fb(r)}) \quad (3.42)$$

$$V_{Sa(i)} = x \cdot M_{2a} + R_{Fa} \cdot I_{Fa(i)} + R_{Fab} \cdot (I_{Fa(i)} + I_{Fb(i)}) \quad (3.43)$$

$$V_{Sb(r)} = x \cdot M_{1b} + R_{Fb} \cdot I_{Fb(r)} + R_{Fab} \cdot (I_{Fa(r)} + I_{Fb(r)}) \quad (3.44)$$

$$V_{Sb(i)} = x \cdot M_{2b} + R_{Fb} \cdot I_{Fb(i)} + R_{Fab} \cdot (I_{Fa(i)} + I_{Fb(i)}) \quad (3.45)$$

onde os índices  $r$  e  $i$  representam, respectivamente, as partes real e imaginária dos componentes e:

$$M_{1m} = \sum_{k=\{a,b,c\}} [Z_{mk(r)} \cdot I_{Sk(r)} - Z_{mk(i)} \cdot I_{Sk(i)}] \quad (3.46)$$

$$M_{2m} = \sum_{k=\{a,b,c\}} [Z_{mk(r)} \cdot I_{Sk(i)} + Z_{mk(i)} \cdot I_{Sk(r)}] \quad (3.47)$$

onde  $Z_{mk}$  representa a impedância entre as fases  $m$  e  $k$ , e  $I_{Sk}$  é a corrente do terminal local na fase  $k$ .

É possível rearranjar (3.42), (3.43), (3.44) e (3.45) em forma matricial, obtendo a equação (3.48):

$$\begin{bmatrix} V_{Sa(r)} \\ V_{Sa(i)} \\ V_{Sb(r)} \\ V_{Sb(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{1a} & I_{Fa(r)} & 0 & I_{Fa(r)} + I_{Fb(r)} \\ M_{2a} & I_{Fa(i)} & 0 & I_{Fa(i)} + I_{Fb(i)} \\ M_{1b} & 0 & I_{Fb(r)} & I_{Fa(r)} + I_{Fb(r)} \\ M_{2b} & 0 & I_{Fb(i)} & I_{Fa(i)} + I_{Fb(i)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ R_{Fa} \\ R_{Fb} \\ R_{Fab} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

A partir de (3.48), nota-se que as tensões do terminal local  $V_{Sa}$  e  $V_{Sb}$  são funções da distância de falta e da resistência de falta. É possível de obter (3.49), onde a distância e a resistência de falta dependem das correntes de falta e da diferença entre as tensões do terminal local, além dos parâmetros da linha,  $M_1$  e  $M_2$ :

$$\begin{bmatrix} x \\ R_{Fa} \\ R_{Fb} \\ R_{Fab} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{1a} & I_{Fa(r)} & 0 & I_{Fa(r)} + I_{Fb(r)} \\ M_{2a} & I_{Fa(i)} & 0 & I_{Fa(i)} + I_{Fb(i)} \\ M_{1b} & 0 & I_{Fb(r)} & I_{Fa(r)} + I_{Fb(r)} \\ M_{2b} & 0 & I_{Fb(i)} & I_{Fa(i)} + I_{Fb(i)} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{Sa(r)} \\ V_{Sa(i)} \\ V_{Sb(r)} \\ V_{Sb(i)} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

Como novamente pode ser visto em (3.49), a resistência de falta e a distância de falta são independentes. O método iterativo utilizado é o mesmo explicado anteriormente para faltas fase-fase. Conforme mostra a figura 3.4, a única diferença é no passo 3, em que a fórmula utilizada para estimar a localização da falta ( $x$ ) e a resistência de falta ( $R_F$ ) passa a ser a equação (3.49).

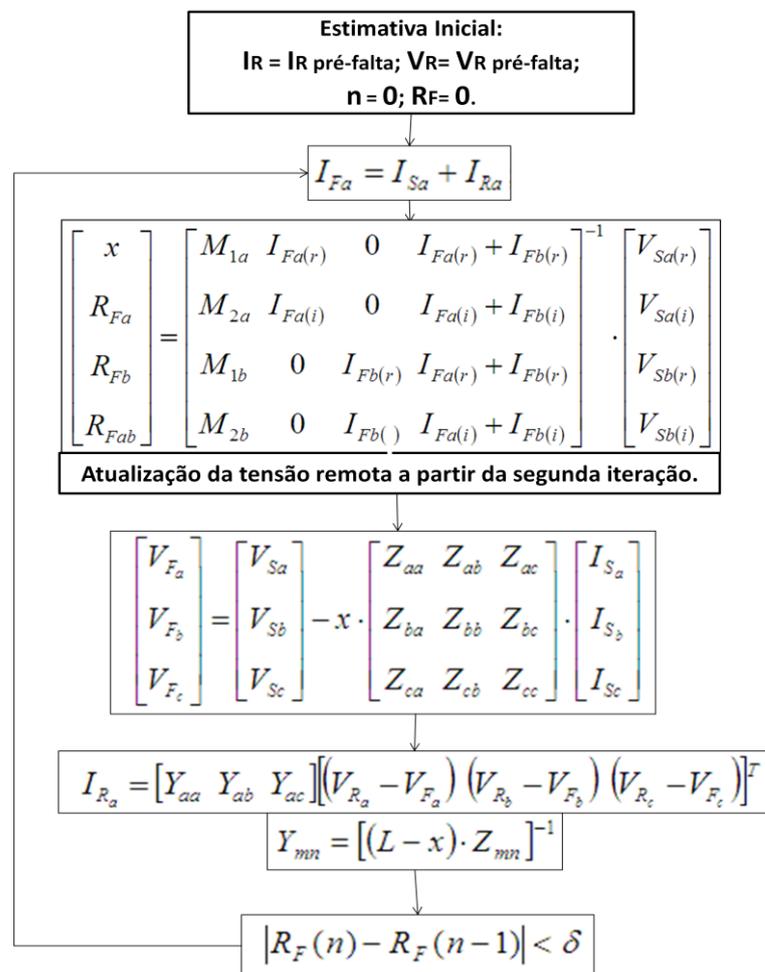


Figura 3.4: Diagrama de blocos com passo-a-passo matemático do método iterativo para faltas fase-fase-terra

### 3.6 Formulação Matemática para Falta Trifásica-Terra

A figura 3.5 representa uma falta fase-fase A-B-C-g num sistema genérico de transmissão.

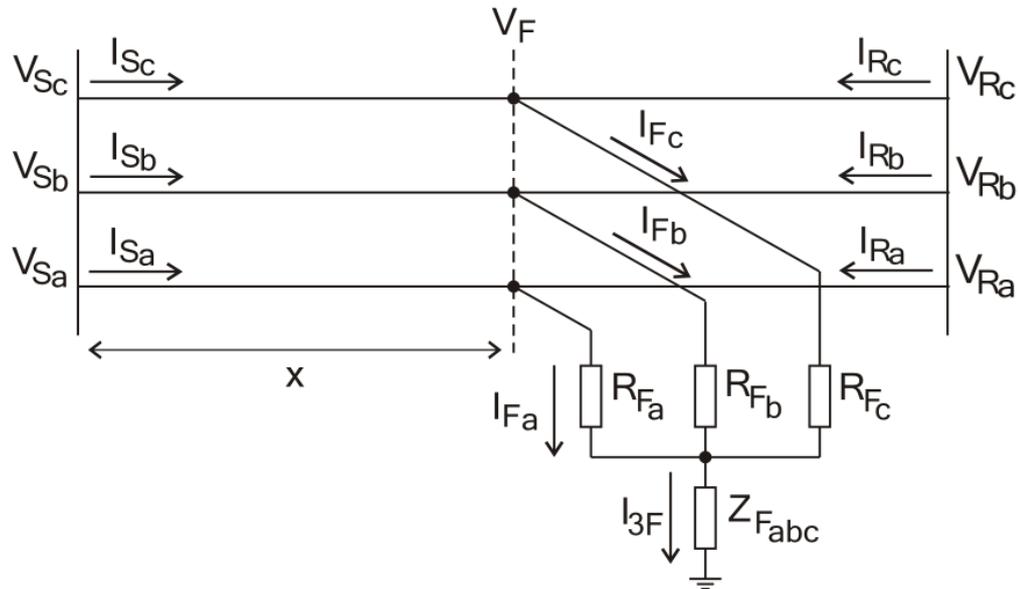


Figura 3.5: Representação da Falta Trifásica-Terra em Sistema Genérico de Transmissão

De acordo com a figura acima, na qual está representada uma falta do tipo fase-fase A-B-C-g, novamente pode-se desenvolver a seguinte equação matricial para representar as tensões do terminal local:

$$\begin{bmatrix} V_{S_a} \\ V_{S_b} \\ V_{S_c} \end{bmatrix} = x \cdot \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{S_a} \\ I_{S_b} \\ I_{S_c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{F_a} \\ V_{F_b} \\ V_{F_c} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Desenvolvendo a equação 3.50, tem-se que a tensão da fase A no ponto de falta é dada por:

$$V_{Fa} = V_{Sa} - x \cdot [Z_a] \cdot [I_S] \quad (3.51)$$

onde  $[Z_a]$  é o vetor de impedância da fase A e  $[I_S]$  é o vetor de correntes no local do relé.

Expandindo a equação 3.51, a equação 3.52 é obtida:

$$\begin{aligned} V_{Fa} &= V_{Sa} - x \cdot [Z_{aa} \cdot I_{Sa} + Z_{ab} \cdot I_{Sb} + Z_{ac} \cdot I_{Sc}] \\ &= R_{Fa} \cdot I_{Fa} + Z_{Fabc} \cdot I_{3F} \end{aligned} \quad (3.52)$$

onde  $I_{3F} = I_{Fa} + I_{Fb} + I_{Fc}$  é a corrente de falta trifásica,  $Z_{Fabc}$  é a impedância de falta trifásica,  $R_{Fab}$  é a resistência de falta da fase A e  $I_{Fa}$  é a corrente de falta da fase A.

Novamente,  $I_{Fa}$  é dada pela relação entre as correntes do terminal local e do terminal remoto:

$$I_{Fa} = I_{Sa} + I_{Ra} \quad (3.53)$$

Similarmente,  $V_{Fb}$  e  $V_{Fc}$  são dados por (3.54) e (3.55):

$$V_{Fb} = V_{Sb} - x \cdot [Z_{ba} \cdot I_{Sa} + Z_{bb} \cdot I_{Sb} + Z_{bc} \cdot I_{Sc}] \quad (3.54)$$

$$V_{Fc} = V_{Sc} - x \cdot [Z_{ca} \cdot I_{Sa} + Z_{cb} \cdot I_{Sb} + Z_{cc} \cdot I_{Sc}] \quad (3.55)$$

Utilizando as equações (3.52) a (3.55), é possível obter (3.56):

$$\begin{aligned}
V_{Sa} &= R_{Fa} \cdot (I_{Ra} + I_{Sa}) \\
&+ x_a \cdot (Z_{aa} \cdot I_{Sa} + Z_{ab} \cdot I_{Sb} + Z_{ac} \cdot I_{Sc}) \\
&+ V_{Sb} - x_b \cdot (Z_{ba} \cdot I_{Sa} + Z_{bb} \cdot I_{Sb} + Z_{bc} \cdot I_{Sc}) \\
&- R_{Fb} \cdot (I_{Rb} + I_{Sb})
\end{aligned} \tag{3.56}$$

Novamente, a impedância aparente da linha da fase A vista pelo relé, localizado no terminal local da linha, é dada por (3.57):

$$Z_{map} = \frac{V_{Sa}}{I_{Sa}} \tag{3.57}$$

Utilizando as equações (3.56) e (3.57), a impedância aparente medida,  $Z_{map}$ , pode ser reformulada para (3.58):

$$\begin{aligned}
Z_{map} &= R_{Fa} \cdot \left[ 1 + \frac{I_{Ra}}{I_{Sa}} \right] + \frac{V_{Sb}}{I_{Sa}} \\
&+ x_a \cdot \left[ Z_{aa} + Z_{ab} \frac{I_{Sb}}{I_{Sa}} + Z_{ac} \frac{I_{Sc}}{I_{Sa}} \right] \\
&- x_b \cdot \left[ Z_{ba} + Z_{bb} \frac{I_{Sb}}{I_{Sa}} + Z_{bc} \frac{I_{Sc}}{I_{Sa}} \right] \\
&- R_{Fb} \cdot \left[ \frac{I_{Sb} + I_{Rb}}{I_{Sa}} \right]
\end{aligned} \tag{3.58}$$

Analisando a equação (3.58), nota-se que é semelhante à equação encontrada para faltas fase-fase-terra. Logo, a explicação física de cada termo é a mesma escrita anteriormente.

Novamente, baseado em (3.58) e nas suposições discutidas, as configurações do esquema do relé de fase proposto são as mesmas definidas para o caso anterior:

- $l$  Comprimento total da linha;
- $p$  Percentagem do comprimento de linha a ser protegido;
- $[Z]$  Matriz de Impedância da Linha.

Rearranjando a equação (3.58), a equação final para o relé de distância tipo fase proposto é então obtida:

$$Z_{map} - R_{Fa} \cdot \left[ 1 + \frac{I_{Ra}}{I_{Sa}} \right] - \frac{V_{Sb}}{I_{Sa}} + R_{Fb} \cdot \left[ \frac{I_{Sb} + I_{Rb}}{I_{Sa}} \right] =$$

$$l \cdot p \cdot \left[ (Z_{aa} - Z_{ba}) + (Z_{ab} - Z_{bb}) \frac{I_{Sb}}{I_{Sa}} + (Z_{ac} - Z_{bc}) \frac{I_{Sc}}{I_{Sa}} \right] \quad (3.59)$$

Durante a ocorrência da falta, o termo direito em (3.59) é determinado através das correntes medidas online e das configurações de proteção do relé. Além disso, a impedância medida  $Z_{map}$  é diretamente compensada por  $V_{Sb}/I_{Sa}$  e pela estimativa das resistências de falta, cujo algoritmo será estudado no próximo capítulo. Finalmente, o relé determina sua decisão final de abertura comparando o critério de atuação e a impedância compensada medida. Nota-se que o relé também é adaptativo, pois sua decisão se baseará em compensar a impedância medida, que varia na medida em que os valores medidos online variam.

A equação (3.59) foi desenvolvida para faltas trifásicas-terra A-B-C-g. Expandindo a formulação para qualquer par de fases faltosas, o resultado torna-se:

$$Z_{map} - R_{Fs} \cdot \left[ 1 + \frac{I_{Rs}}{I_{Ss}} \right] - \frac{V_{St}}{I_{Ss}} + R_{Ft} \cdot \left[ \frac{I_{St} + I_{Rt}}{I_{Ss}} \right] =$$

$$l \cdot p \cdot \left[ (Z_{ss} - Z_{ts}) + (Z_{st} - Z_{tu}) \frac{I_{St}}{I_{Ss}} + (Z_{su} - Z_{tu}) \frac{I_{Su}}{I_{Ss}} \right] \quad (3.60)$$

onde  $s$ ,  $t$  e  $u$  são o par de fases faltosas (AB, BC ou CA), e  $Z_{mst} = V_{Ss}/I_{Ss}$  é a impedância medida no local do relé.

### 3.7 Análise Numérica da Estimativa da Resistência de Falta Usando Coordenadas de Fase para Falta Trifásica-Terra

Recorrendo à Figura 3.3, a qual mostra uma falta A-B-C-g, tem-se que as tensões medidas no terminal local da linha da fase A e no ponto da falta são dadas por:

$$V_{Sa} = V_{Fa} + x \cdot (Z_{aa} \cdot I_{Sa} + Z_{ab} \cdot I_{Sb} + Z_{ac} \cdot I_{Sc}) \quad (3.61)$$

$$V_{Fa} = R_{Fa} \cdot I_{Fa} + Z_{Fabc} \cdot I_{3F} \quad (3.62)$$

onde  $Z_{Fabc} = R_{Fabc} + j \cdot X_{Fabc}$  é a impedância de falta trifásica e  $I_{3F} = I_{Fa} + I_{Fb} + I_{Fc}$  é a corrente de falta trifásica.

Ainda:

$$V_{Sa} = R_{Fa} \cdot I_{Fa} + R_{Fabc} \cdot I_{3F} + j \cdot R_{Fabc} \cdot I_{3F} + x \cdot (Z_{aa} \cdot I_{Sa} + Z_{ab} \cdot I_{Sb} + Z_{ac} \cdot I_{Sc}) \quad (3.63)$$

$$V_{Sb} = R_{Fb} \cdot I_{Fb} + R_{Fabc} \cdot I_{3F} + j \cdot R_{Fabc} \cdot I_{3F} + x \cdot (Z_{ba} \cdot I_{Sa} + Z_{bb} \cdot I_{Sb} + Z_{bc} \cdot I_{Sc}) \quad (3.64)$$

$$V_{Sc} = R_{Fc} \cdot I_{Fc} + R_{Fabc} \cdot I_{3F} + j \cdot R_{Fabc} \cdot I_{3F} + x \cdot (Z_{ca} \cdot I_{Sa} + Z_{cb} \cdot I_{Sb} + Z_{cc} \cdot I_{Sc}) \quad (3.65)$$

Assumindo que as impedâncias de falta são estritamente resistivas e constantes durante o período analisado, é possível rearranjar (3.63), (3.64) e (3.65) em suas partes real e imaginária, resultando respectivamente em (3.66), (3.67), (3.68), (3.69), (3.70) e (3.71):

$$V_{Sa(r)} = x \cdot M_{1a} + R_{Fa} \cdot I_{Fa(r)} + R_{Fabc} \cdot I_{3F(r)} - X_{Fabc} \cdot I_{3F(i)} \quad (3.66)$$

$$V_{Sa(i)} = x \cdot M_{2a} + R_{Fa} \cdot I_{Fa(i)} + R_{Fabc} \cdot I_{3F(i)} + X_{Fabc} \cdot I_{3F(r)} \quad (3.67)$$

$$V_{Sb(r)} = x \cdot M_{1b} + R_{Fb} \cdot I_{Fb(r)} + R_{Fabc} \cdot I_{3F(r)} - X_{Fabc} \cdot I_{3F(i)} \quad (3.68)$$

$$V_{Sb(i)} = x \cdot M_{2b} + R_{Fb} \cdot I_{Fb(i)} + R_{Fabc} \cdot I_{3F(i)} + X_{Fabc} \cdot I_{3F(r)} \quad (3.69)$$

$$V_{Sc(r)} = x \cdot M_{1c} + R_{Fc} \cdot I_{Fc(r)} + R_{Fabc} \cdot I_{3F(r)} - X_{Fabc} \cdot I_{3F(i)} \quad (3.70)$$

$$V_{Sc(i)} = x \cdot M_{2c} + R_{Fc} \cdot I_{Fc(i)} + R_{Fabc} \cdot I_{3F(i)} + X_{Fabc} \cdot I_{3F(r)} \quad (3.71)$$

onde os índices  $r$  e  $i$  representam, respectivamente, as partes real e imaginária dos componentes e:

$$M_{1m} = \sum_{k=\{a,b,c\}} [Z_{mk(r)} \cdot I_{Sk(r)} - Z_{mk(i)} \cdot I_{Sk(i)}] \quad (3.72)$$

$$M_{2m} = \sum_{k=\{a,b,c\}} [Z_{mk(r)} \cdot I_{Sk(i)} + Z_{mk(i)} \cdot I_{Sk(r)}] \quad (3.73)$$

onde  $Z_{mk}$  representa a impedância entre as fases  $m$  e  $k$ , e  $I_{Sk}$  é a corrente do terminal local na fase  $k$ .

É possível rearranjar (3.66), (3.67), (3.68), (3.69), (3.70) e (3.71) em forma matricial, obtendo a equação (3.74):

$$\begin{bmatrix} V_{Sa(r)} \\ V_{Sa(i)} \\ V_{Sb(r)} \\ V_{Sb(i)} \\ V_{Sc(r)} \\ V_{Sc(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{1a} & I_{Fa(r)} & 0 & 0 & I_{3F(r)} & -I_{3F(i)} \\ M_{2a} & I_{Fa(i)} & 0 & 0 & I_{3F(i)} & I_{3F(r)} \\ M_{1b} & 0 & I_{Fb(r)} & 0 & I_{3F(r)} & -I_{3F(i)} \\ M_{2b} & 0 & I_{Fb(i)} & 0 & I_{3F(i)} & I_{3F(r)} \\ M_{1c} & 0 & 0 & I_{Fc(r)} & I_{3F(r)} & -I_{3F(i)} \\ M_{2c} & 0 & 0 & I_{Fc(i)} & I_{3F(i)} & I_{3F(r)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ R_{Fa} \\ R_{Fb} \\ R_{Fc} \\ R_{Fabc} \\ X_{Fabc} \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

A partir de (3.74), nota-se que as tensões do terminal local  $V_{Sa}$ ,  $V_{Sb}$  e  $V_{Sc}$  são funções da distância de falta e da resistência de falta. É possível de obter (3.75), onde a distância e a resistência de falta dependem das correntes de falta e da diferença entre as tensões do terminal local, além dos parâmetros da linha,  $M_1$  e  $M_2$ :

$$\begin{bmatrix} x \\ R_{Fa} \\ R_{Fb} \\ R_{Fc} \\ R_{Fabc} \\ X_{Fabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{1a} & I_{Fa(r)} & 0 & 0 & I_{3F(r)} & -I_{3F(i)} \\ M_{2a} & I_{Fa(i)} & 0 & 0 & I_{3F(i)} & I_{3F(r)} \\ M_{1b} & 0 & I_{Fb(r)} & 0 & I_{3F(r)} & -I_{3F(i)} \\ M_{2b} & 0 & I_{Fb(i)} & 0 & I_{3F(i)} & I_{3F(r)} \\ M_{1c} & 0 & 0 & I_{Fc(r)} & I_{3F(r)} & -I_{3F(i)} \\ M_{2c} & 0 & 0 & I_{Fc(i)} & I_{3F(i)} & I_{3F(r)} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{Sa(r)} \\ V_{Sa(i)} \\ V_{Sb(r)} \\ V_{Sb(i)} \\ V_{Sc(r)} \\ V_{Sc(i)} \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

Como novamente pode ser visto em (3.75), a resistência de falta e a distância de falta são independentes. O método iterativo utilizado também é o mesmo explicado anteriormente

para faltas fase-fase. Conforme pode ser visto na figura 3.6, da mesma forma que o caso de faltas fase-fase-terra, a única diferença é no passo 3, em que a fórmula utilizada para estimar a localização da falta ( $x$ ) e a resistência de falta ( $R_F$ ) passa a ser a equação (3.75).

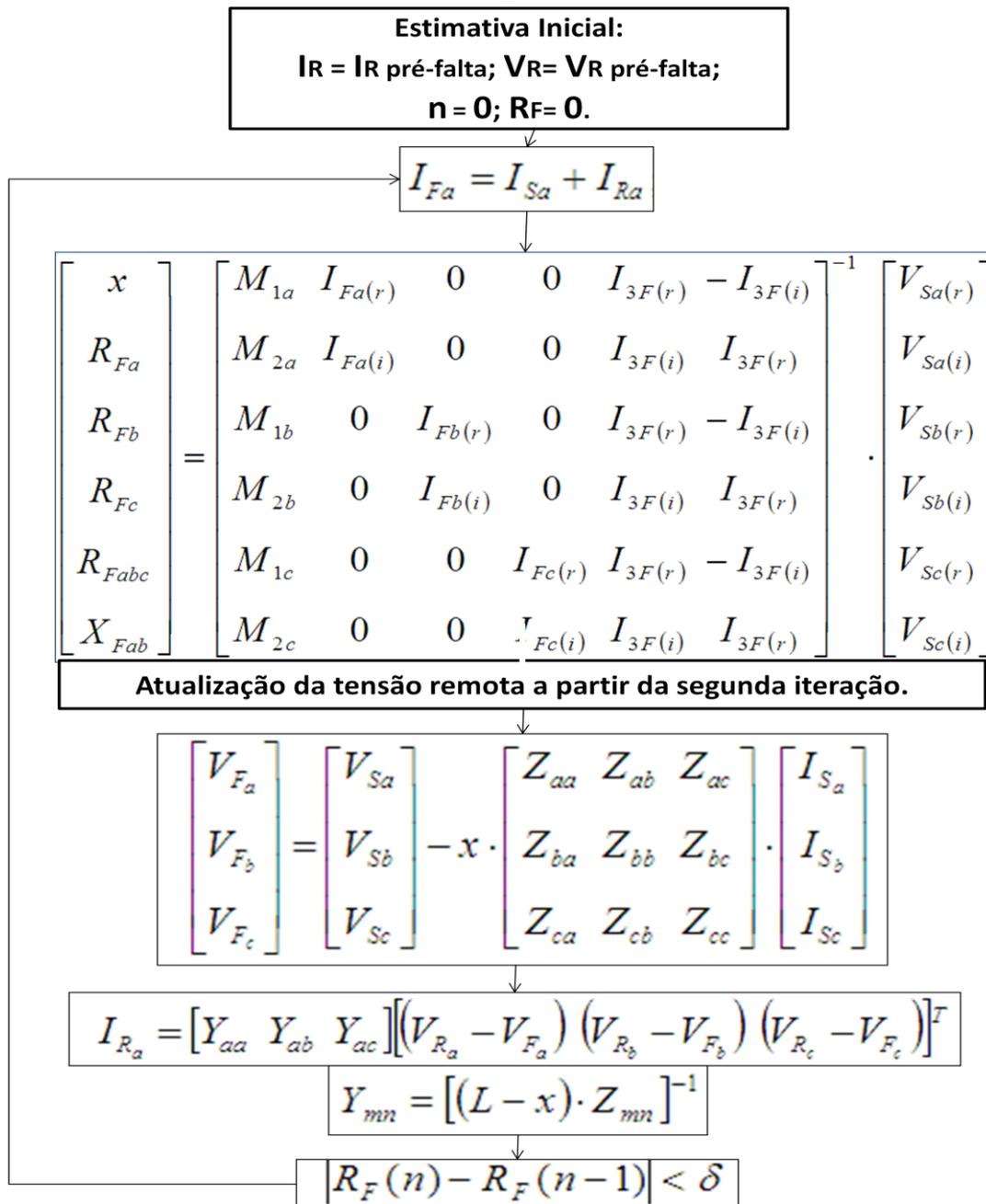


Figura 3.6: Diagrama de blocos com passo-a-passo matemático do método iterativo para faltas trifásica-terra

#### 4. METODOLOGIA

Para a validação da metodologia proposta, diversos casos de falta foram simulados usando os programas computacionais ATP/EMTP (MEYER;LIU, 2010; PRINKLER;HOIDALEN, 2002) e Matlab<sup>®</sup>. O diagrama unifilar do sistema elétrico estudado está ilustrado na Figura 4.1. O principal modelo de Sistema Elétrico Trifásico utilizado opera em 60 Hz, possui tensão de 138 kV, potência nominal de 100 MVA e tem um comprimento total de linha de 200 km, com sua matriz de impedância dada por (4.1). Para analisar os resultados dos testes, um relé de distância característico de admitância (*mho*), cuja configuração de alcance da primeira zona está em 85% da impedância da linha (em torno de 170000 metros distante do local do relé), é usado.

$$Z_{linha} = \begin{bmatrix} 0,19 + 0,48j & 0,0509 + 0,0102j & 0,03855 - 0,0379j \\ 0,0509 + 0,0102j & 0,19 + 0,48j & 0,0509 + 0,0102j \\ 0,03855 - 0,0379j & 0,0509 + 0,0102j & 0,19 + 0,48j \end{bmatrix} \Omega/km \quad (4.1)$$

Deve ser observado que características diferentes poderiam também ser usadas com a mesma formulação. A característica operacional *mho* foi escolhida por essa natureza direcional. As componentes simétricas tradicionais do relé de distância tipo fase, calculadas por Horowitz e Phadke (1995) são dadas por:

$$Z_{tradicional} = \frac{E_a - E_b}{I_a - I_b} \quad (4.2)$$

Essa equação se aplica para as faltas do tipo A-B, A-B-g e A-B-C-g. Para o caso específico de faltas A-B-C-g, a relação a seguir também é válida:

$$Z_{tradicional} = \frac{E_a - E_b}{I_a - I_b} = \frac{E_b - E_c}{I_b - I_c} = \frac{E_c - E_a}{I_c - I_a} \quad (4.3)$$

As informações de tensão e corrente são medidas no local do relé usando uma taxa de amostragem de 192 amostras por ciclo, e os fasores são estimados usando um filtro de Fourier de meio-ciclo, conforme desenvolvido por Chen, Liu e Jiang (2006).

O estudo do caso para faltas fase-terra utilizando um sistema de distribuição Fonte-Carga pode ser encontrado em (FILOMENA et al., 2008) e um estudo para relés de fase, utilizando metodologia similar pode ser encontrado em (SALIM et al., 2010). Essa parte do trabalho apresentará um estudo para faltas tipo fase em Sistemas Elétricos de Transmissão, que é o foco do estudo.

As tabelas de dados e resultados encontrados possuem características similares para os diferentes tipos de falta estudados nesse trabalho, logo, serão apresentados dados de algumas simulações, através dos quais é possível perceber essas características e expandi-las para todos os demais casos estudados.

#### 4.1 Estudo de Caso

Para o conjunto inicial de testes, a linha foi considerada equilibrada, devido ao fato de muitos sistemas de transmissão possuírem linhas transpostas (GROSS, 1986). Logo, as impedâncias mútuas da equação (4.1) foram consideradas nulas para fim de análise inicial.

Em seguida, e na maior parte das simulações, foi utilizada a matriz completa da equação (4.1), a fim de representar um sistema desequilibrado de transmissão. A Tabela 4.1, que apresenta os resultados para faltas entre as fases A e B num sistema desbalanceado, será o principal alvo de uma análise mais detalhada nesse trabalho, visto as semelhanças do comportamento do sistema para as variações das condições de falta, não importando quais fases eram afetadas.

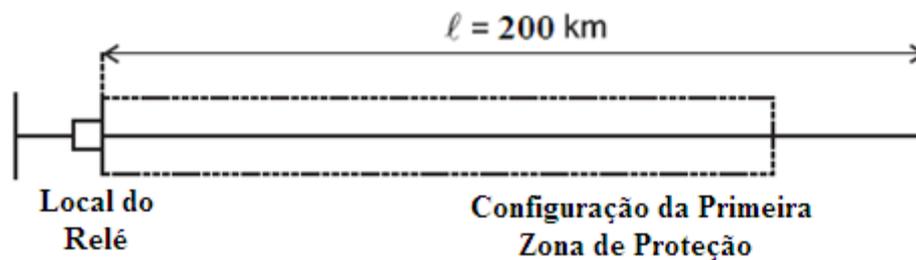


Figura 4.1: Sistema Elétrico de Potência Trifásico utilizado como principal Caso de Estudo

Diversas simulações foram realizadas, com diversos sistemas de transmissão de diferentes comprimentos e configurações de linhas. Os resultados apresentados serão focados na linha de transmissão apresentada acima, a qual serviu de modelo para centenas de simulações realizadas para as diferentes faltas estudadas nesse trabalho.

As Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 mostram uma visão geral dos resultados das simulações para sistemas equilibrados ou desequilibrados. Colunas um, dois e três mostram, respectivamente, o número do caso, a distância de falta simulada e a distância de falta estimada a partir do terminal local. Colunas quatro e cinco mostram a impedância aparente medida pelo algoritmo proposto e pelo relé tipo fase tradicional, respectivamente. As decisões de zona-1 para os relés proposto e tradicional são mostradas nas colunas seis e sete. A resistência de falta simulada e o valor estimado, tão bem como seu erro relativo, são mostrados das colunas oito a dez, para o caso de faltas fase-fase – para faltas fase-fase-terra

são ocupadas mais colunas para esse fim. Colunas onze e doze mostram, respectivamente, o número de iterações exigidas pelo algoritmo de estimação da resistência de falta para convergir, dado por  $N$ , e o tempo computacional tomado pelo algoritmo. (medido em Matlab® usando um Intel R° Core™ 2 Duo CPU E6750 @2,67GHz e 2 GB RAM).

Tabela 4.1: Visão Geral de Alguns Resultados para Faltas Fase-Fase em um SEP Desequilibrado

Faltas Fase-Fase em Sistema Desequilibrado											
Caso	Distância [km]		Impedância Aparente [ohms]		Zona 1		Resistência de Falta			N	Tempo [ms]
	Simulada	Estimada	$Z_{map}$	$Z_{tradicional}$	Proposto	Tradicional	Simulado	Estimado	Erro		
1	10	10,07	2,782 + j.9,805	4,341 + j.4,069	Interna	Interna	0	0	0,00%	4	0.2
2	160	160,3	44,288 + j.156,776	62,318 + j.31,251	Interna	Interna	0	0	0,00%	5	0.35
3	170	170,2	47,302 + j.166,688	72,164 + j.69,501	Externa	Interna	0	0	0,00%	5	0.4
4	180	180,3	50,085 + j.176,489	76,549 + j.73,505	Externa	Interna	0	0	0,00%	5	0.4
5	10	10,6	2,783 + j.9,809	9,557 + j.1,059	Interna	Interna	10	10,01	0,10%	4	0.1
6	160	159,1	44,488 + j.156,776	92,516 + j.51,183	Interna	Externa	10	9,95	-0,50%	7	0.1
7	180	177,5	49,940 + j.175,981	125,552 + j.45,052	Externa	Externa	10	10,08	0,80%	9	0.6
8	160	158,4	44,365 + j.156,342	192,137 + j.-6,459	Interna	Externa	50	50,31	0,62%	8	0.10
9	170	168,3	47,006 + j.165,647	237,519 + j.-26,288	Interna	Externa	50	51,21	2,42%	10	0.11
10	180	176,4	49,396 + j.174,062	323,546 + j.-69,912	Externa	Externa	50	53,25	6,50%	14	0,15
11	160	154,9	44,214 + j.155,811	316,663 + j.-78,512	Interna	Externa	100	101,9	1,90%	10	0.15
12	170	163,9	46,723 + j.164,649	403,205 + j.-122,270	Interna	Externa	100	105,8	5,80%	12	0.15
13	180	165,3	48,777 + j.171,882	571,037 + j.-213,616	Externa	Externa	100	110,24	10,24%	16	0.7

Tabela 4.2: Visão Geral de Alguns Resultados para Faltas Fase-Fase em um SEP Equilibrado

Faltas Fase-Fase em Sistema Equilibrado											
Caso	Distância [km]		Impedância Aparente [ohms]		Zona 1		Resistência de Falta			N	Tempo [ms]
	Simulada	Estimada	$Z_{map}$	$Z_{tradicional}$	Proposto	Tradicional	Simulado	Estimado	Erro		
1	20	20,15	7,601 + j.19,202	9,410 + j.7,407	Interna	Interna	0	0	0,00%	2	0.02
2	160	160,3	60,808 + j.153,620	74,815 + j.59,257	Interna	Interna	0	0	0,00%	4	0.03
3	170	170,4	64,609 + j.163,222	79,0488 + j.62,961	Externa	Interna	0	0	0,00%	4	0.03
4	180	178,9	68,409 + j.172,823	84,161 + j.66,663	Externa	Interna	0	0	0,00%	4	0.04
5	20	20,3	7,603 + j.19,208	20,533 + j.0,990	Interna	Interna	20	20,01	0,05%	5	0.02
6	160	159,7	60,695 + j.153,335	124,622 + j.30,418	Interna	Externa	20	20,01	0,05%	8	0.03
7	170	169,3	64,390 + j.162,670	145,756 + j.24,530	Interna	Externa	20	20,18	0,90%	9	0.04
8	180	179,5	67,883 + j.171,493	183,145 + j.9,081	Externa	Externa	20	21,05	5,25%	12	0.16
9	20	20,3	7,607 + j.19,217	37,219 + j.-8,636	Interna	Interna	50	50,03	0,06%	5	0.16
10	160	158,3	60,525 + j.152,905	199,335 + j.-12,843	Interna	Externa	50	50,59	1,18%	9	0.16
11	170	168,1	64,066 + j.161,850	245,163 + j.-33,120	Interna	Externa	50	51,88	3,76%	11	0.17
12	180	177,5	67,157 + j.169,659	331,628 + j.-77,296	Externa	Externa	50	52,39	4,78%	14	0.18
13	20	20,6	7,611 + j.19,227	53,904 + j.-18,262	Interna	Interna	80	80,04	0,05%	5	0.19
14	160	155,2	60,359 + j.152,486	274,048 + j.-56,104	Interna	Externa	80	81,12	1,40%	10	0.2
15	170	162,3	63,755 + j.161,064	344,571 + j.-90,769	Interna	Externa	80	81,19	1,49%	12	0.2
16	180	171,5	66,485 + j.167,963	480,112 + j.-163,674	Externa	Externa	80	82	2,50%	16	0.21

Tabela 4.3: Visão Geral de Alguns Resultados para Falhas Fase-Fase-Terra em um SEP Desequilibrado

Faltas Fase-Fase-Terra em Sistema Desequilibrado															
Caso	Distância		Impedância Aparente [ohms]		Zona 1		Resistência de Falta						N	Tempo [ms]	
	Simulada	Estimada	Z <sub>map</sub>	Z <sub>tradicional</sub>	Proposto	Tradicional	Simulado			Estimado		Erro Máximo			
1	20	20,03	2,772 + j.9,705	4,341 + j.4,069	Interna	Interna	2	2	1	2	2	1	0,00%	4	0.2
2	80	79,06	7,960 + j.106,688	8,164 + j.9,501	Interna	Interna	2	2	1	2	1,99	1	0,00%	5	0.3
3	160	159,4	17,336 + j.140,534	71,257 + j.76,391	Interna	Interna	2	2	1	1,98	1,99	1	-0,50%	6	0.4
4	180	178,9	23,925 + j.163,735	124.171 + j*88.002	Externa	Externa	2	2	1	1,99	2	1	0,00%	8	0.5
5	20	20,4	2,682 + j.18,658	13,903 + j.9,808	Interna	Interna	10	10	20	10,01	10	20	0,05%	5	0.2
6	80	79,1	8,050 + j.86,934	33,909 + j.49,025	Interna	Externa	10	10	20	9,98	9,99	20	-0,05%	6	0.3
7	160	159,2	17,524 + j.143,546	72,090 + j.78,394	Interna	Externa	10	10	20	9,96	10,03	20,1	0,25%	8	0.4
8	180	178,4	24,017 + j.166,735	124,171 + j.88,002	Externa	Externa	10	10	20	10,06	10,09	20,2	0,80%	11	1.6
9	20	20,9	2,471 + j.20,245	41,643 + j.8,956	Interna	Externa	30	40	50	30,01	40,03	50	0,04%	5	2
10	80	77,6	10,961 + j.96,783	84,225 + j.47,320	Interna	Externa	30	40	50	29,99	39,97	50	-0,04%	6	2.5
11	160	154,4	18,787 + j.157,699	196,889 + j.74,273	Interna	Externa	30	40	50	30,19	40,15	50,1	0,16%	10	4.1
12	180	171,5	27,792 + j.178,203	371,414 + j.79,740	Externa	Externa	30	40	50	30,2	40,17	50,6	1,20%	15	6.5

A seguir são ilustrados alguns gráficos nos quais estão representadas as zonas de proteção do relé em Sistemas Desbalanceados. As linhas tracejadas representam a trajetória da impedância medida pelo relé tradicional e as contínuas representam a trajetória da impedância medida e compensada pelo relé proposto nesse trabalho.

Conforme pode ser observado nas Figuras 4.2 e 4.3, a metodologia proposta é muito eficaz mesmo nas condições do limite da zona de atuação do relé. Em compensação o relé tradicional não opera corretamente para faltas em 180 km, pois considera a falta interna, o que o faz atuar desnecessariamente.

Os demais gráficos mostram situações mais críticas, com resistências de falta elevadas e distâncias de falta perto da zona limite de proteção primária dos relés. Mais uma vez, a metodologia proposta se destaca atuando corretamente nas diversas simulações realizadas para os três tipos de falta tipo fase estudados nesse trabalho.

Deve-se observar que os gráficos ilustrados nesse capítulo apresentam uma visão ampliada na região que ilustra a zona de proteção primária da linha, com o objetivo de visualizar se o relé estudado atuou corretamente nas condições limite de operação. Uma vez que o caminho percorrido pela trajetória da impedância medida termina dentro da área circular que representa essa zona de atuação, pode-se concluir que o relé irá atuar, pois a falta detectada será interna.

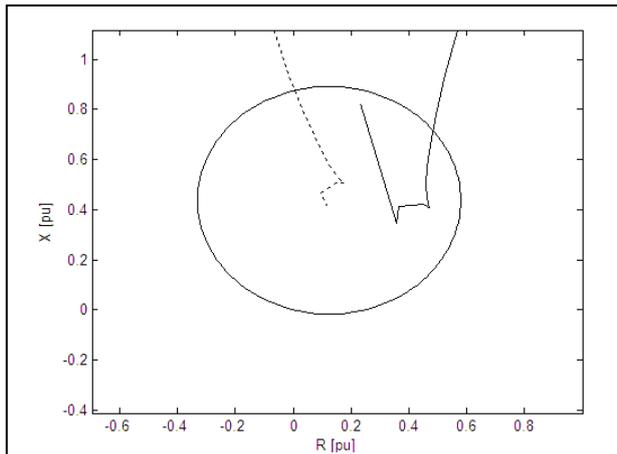


Figura 4.3: Representação da zona de atuação do relé para falta fase-fase com resistência de falta de 0 ohms e distância de falta de 160 km

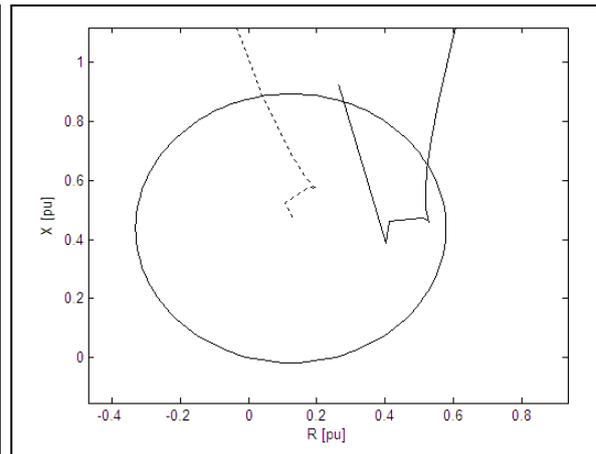


Figura 4.2: Representação da zona de atuação do relé para falta fase-fase com resistência de falta de 0 ohms e distância de falta de 180 km

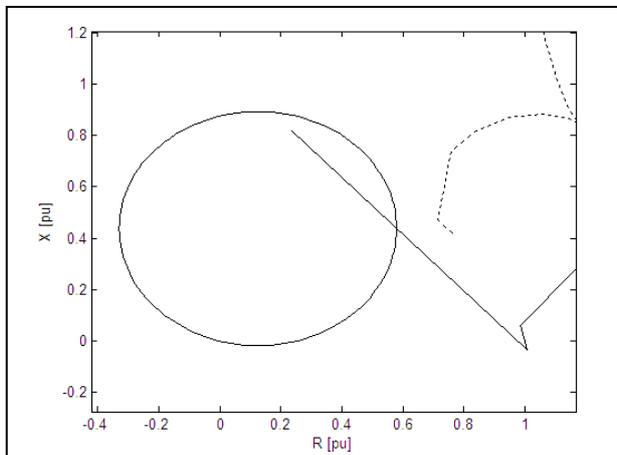


Figura 4.5: Representação da zona de atuação do relé para falta fase-fase com resistência de falta de 50 ohms e distância de falta de 160 km

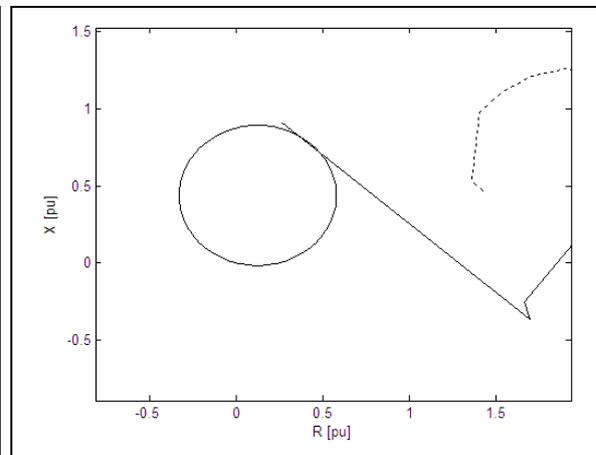


Figura 4.4: Representação da zona de atuação do relé para falta fase-fase com resistência de falta de 50 ohms e distância de falta de 180 km

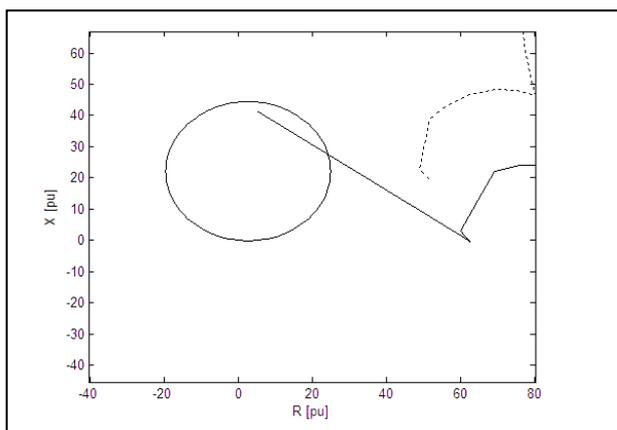


Figura 4.7: Representação da zona de atuação do relé para falta fase-fase-terra com resistências de falta de 30, 40 e 50 ohms e distância de falta de 160 km

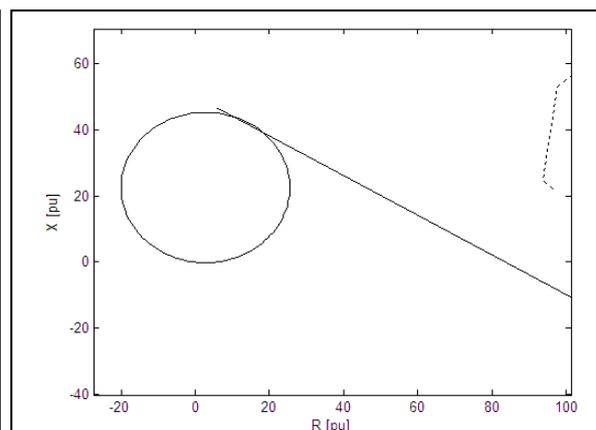


Figura 4.6: Representação da zona de atuação do relé para falta fase-fase-terra com resistências de falta de 30, 40 e 50 ohms e distância de falta de 180 km

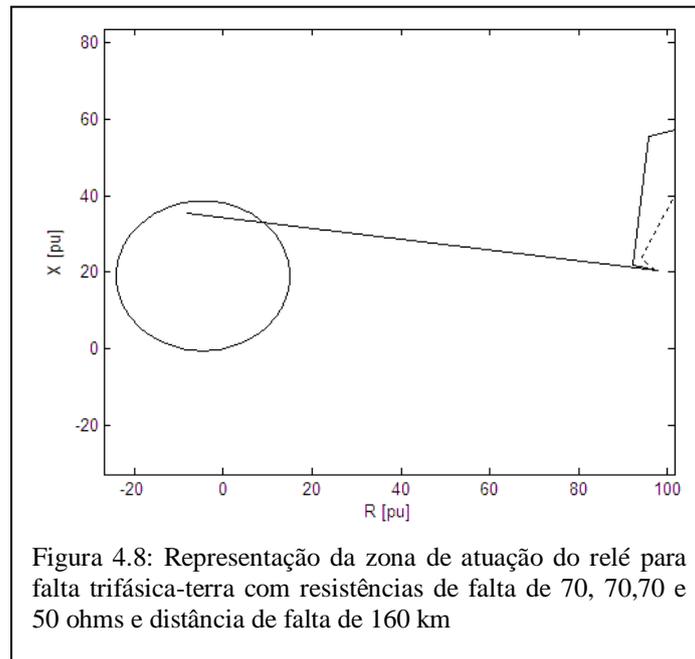


Figura 4.8: Representação da zona de atuação do relé para falta trifásica-terra com resistências de falta de 70, 70,70 e 50 ohms e distância de falta de 160 km

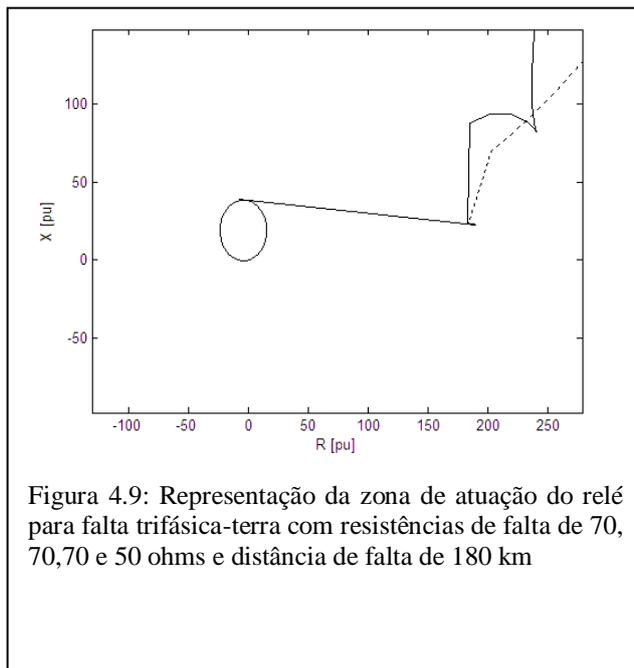


Figura 4.9: Representação da zona de atuação do relé para falta trifásica-terra com resistências de falta de 70, 70,70 e 50 ohms e distância de falta de 180 km

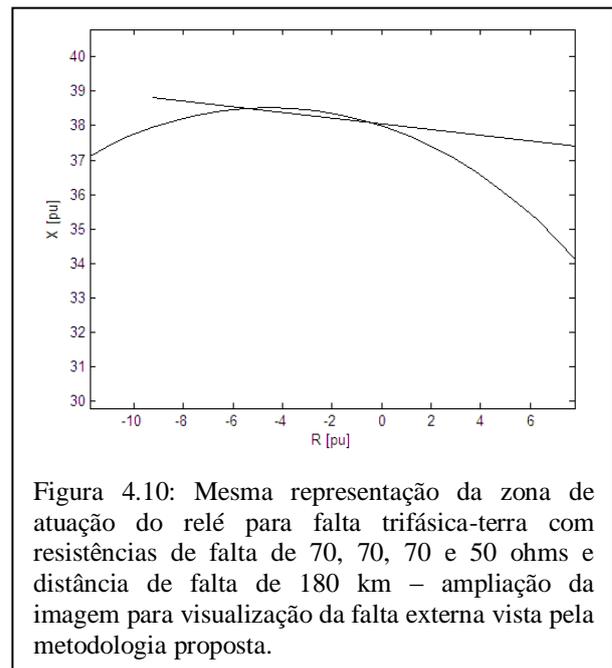


Figura 4.10: Mesma representação da zona de atuação do relé para falta trifásica-terra com resistências de falta de 70, 70, 70 e 50 ohms e distância de falta de 180 km – ampliação da imagem para visualização da falta externa vista pela metodologia proposta.

## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo, os resultados da metodologia proposta são analisados em diferentes aspectos: resistência de falta, distância de falta e efeito do desbalanceamento do sistema, bem como o tempo computacional requerido pela metodologia proposta.

Essa análise mais detalhada será apresentada na Tabela 4.1, que apresenta os resultados da metodologia proposta para faltas fase-fase em um sistema desequilibrado. Conforme pode ser visto nas Tabelas 4.2 e 4.3, à medida que são variados os valores de resistência ou distância de falta, os resultados são similares, uma vez que o comportamento do sistema se mantém praticamente o mesmo independente do tipo de falta entre fases estudado.

### 5.1 Efeito da Resistência de Falta

Recorrendo à Tabela 4.1 e comparando o erro de estimativa da resistência de falta, para os casos dos grupos 3-9-12 e 4-7-10 (cada trio tem as mesmas condições do sistema e distâncias da falta, ao passo que a resistência de falta varia), é possível verificar que os erros de estimativa da resistência de falta não foram significativamente afetados pelo valor da resistência em si. Conforme a resistência de falta aumenta, o erro também aumenta, conforme pode ser explicado no Apêndice B. O efeito, porém, não é significativo para interferir na decisão de abertura do relé. À medida que a resistência de falta atinge valores muito superiores a 50 ohms, erros da ordem de 10% são observados na estimativa do valor correto da resistência de falta para as distâncias muito próximas ao fim da linha. Porém, foram realizadas simulações com valores próximos a 300 ohms, e percebe-se que essa taxa de erro se mantém perto desse valor percentual, sem que haja interferência na correta decisão de

abertura do relé. Tais valores de resistência são muito elevados considerando a realidade da Proteção Digital, logo, tal erro não interfere na confiabilidade da metodologia proposta.

Recorrendo a (FILOMENA et al., 2008) e (SALIM et al., 2010), também pode ser concluído que o algoritmo proposto não é afetado quanto ao número de iterações necessárias para convergência variando o tipo de falta, conforme havia sido observado nas simulações para Sistemas de Distribuição Fonte-Carga.

## **5.2 Efeito da Distância de Falta**

Utilizando novamente a tabela 4.1, o efeito da distância da falta pode ser analisado pelos resultados dos casos dos grupos 1–2–3-4, 5-6-7, 8-9-10 e 11-12-13 (cada grupo tem as mesmas condições do sistema e resistência de falta, ao passo que a localização da falta varia).

Analisando os casos desses grupos, é verificado que conforme a resistência de falta aumenta, a distância da falta começa a afetar a sua correta estimativa, mas não a ponto de atrapalhar a decisão de abertura do relé. A diferença no número de iterações aumenta conforme aumenta a distância de falta, apesar da conclusão de que distância da falta tem um efeito muito pequeno no processo computacional do algoritmo numérico proposto, conforme também verificado em (SALIM et al., 2010).

O gráfico abaixo mostra o efeito da distância de falta na correta estimativa da resistência de falta para faltas fase-fase. Nota-se que, conforme a distância de falta aumenta – condição mais crítica de operação do relé – aumenta o erro na estimativa da resistência. Porém, esse erro não interferiu na correta decisão do relé perto da sua zona limite de atuação. Esse comportamento foi similar para na análise dos demais tipos de falta.

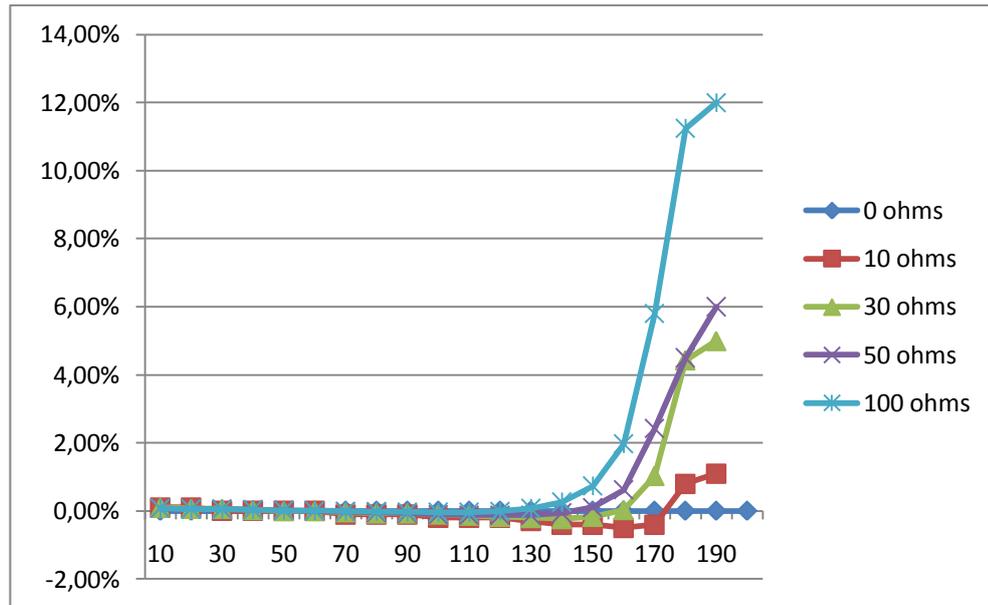


Figura 5.1: Efeito da distância de falta no erro da estimativa da resistência de falta para faltas fase-fase. Eixo x: distancia de falta [km]; Eixo y: erro percentual na estimativa da resistência de falta.

### 5.3 Efeito do Desbalanceamento do Sistema

Fica claro pela Tabela 4.1 e pelos outros aspectos analisados, que o desbalanceamento do sistema não afeta o desempenho do algoritmo proposto para executar a função de relé de distância. Numericamente, nem a estimativa da resistência de falta, nem o esforço computacional são afetados pelo desequilíbrio do sistema em questão.

### 5.4 Efeito do Tempo Computacional

Como pode ser visto na Tabela 4.1, o tempo de processamento exigido é aceitável para aplicações práticas. O tempo exigido nos casos estudados nunca ultrapassou 10 ms, apesar de alguns casos possuírem maior número de iterações. Isso representa aproximadamente meio ciclo para a frequência de 60 Hz. O tempo de processamento total exigido para alcançar a decisão final de atuação é o tempo mostrado na Tabela 4.1, somado ao

tempo de aquisição dos dados. O tempo de aquisição dos dados é dependente do algoritmo de Fourier. Nesse trabalho foi utilizado um algoritmo de Fourier de meio-ciclo (CHEN; LIU; JIANG, 2006). Consequentemente, o tempo de processamento total máximo foi 19 ms. Aplicações mais rápidas poderiam usar um algoritmo de Fourier de um quarto de ciclo ou outras técnicas de processamento digital de sinais (CHEN; LIU; JIANG, 2006).

Além disso, a metodologia proposta foi implementada em um computador convencional, o qual executa diversas tarefas ao mesmo tempo, aumentando o tempo de processamento total exigido pelo algoritmo. Em situações práticas, um hardware e um software específicos executariam essa tarefa, melhorando o desempenho do algoritmo digital nesse aspecto. É importante observar que o número de iterações provavelmente não seria afetado pelo hardware específico, somente o tempo de processamento.

## 6. CONCLUSÃO

No estudo apresentado ao longo desse trabalho, foi desenvolvida uma metodologia estendida de trabalhos anteriores realizados no Laboratório de Sistemas Elétricos de Potência, porém adaptada a uma nova necessidade dos Sistemas Elétricos de Potência: os chamados Sistemas Genéricos, que possuem componentes ativos nos dois terminais da linha. A representação do terminal remoto também pode ser vista como sendo uma representação de Thévenin para o sistema à Jusante do terminal remoto. Essa visão simplificada do sistema possui profunda importância no que diz respeito à Proteção de Sistemas de Transmissão, os quais exigem maior investimento em instrumentos que visem evitar grandes desligamentos e instabilidade na rede elétrica, pois, uma vez que ocorrem falhas no Sistema, há chances de ocorrer situações como o Blecaute que ocorreu no Brasil em 2009.

O método proposto se mostrou adequado para sistemas equilibrados e desequilibrados, incluindo sistemas com linhas transpostas, bem como sistemas com linhas de alta assimetria. Conforme pode ser visualizado nas figuras 4.2 a 4.10, é visível a melhora do desempenho do relé proposto em relação ao método tradicional, uma vez que os fenômenos de subalcance ou sobrealcance são eliminados pela correta utilização da compensação da resistência de falta.

Os resultados foram mostrados seguindo a linha de raciocínio de (SALIM et al., 2010), uma vez que a metodologia utilizada foi uma extensão dos trabalhos já realizados com relés tipo terra (FILOMENA et al., 2008) e tipo fase. Conforme já explicado, a metodologia proposta não é significativamente afetada pela resistência de falta ou pela localização da falta, estando o sistema desequilibrado ou não. Logo, o relé atuou corretamente em todos os casos analisados e simulados computacionalmente.

Há uma correta operação mesmo em situações extremas: faltas com alta resistência perto de zonas limites e considerando a assimetria da linha, como no caso das tabelas 4.1 e 4.3. Os resultados também mostram que a metodologia é robusta nesses aspectos com uma precisa definição da zona limite, devido a compensação da resistência de falta. Além disso, o tempo de computação exigido é adequado para a implementação prática, mesmo em projetos de sistemas de proteção rápidos.

A metodologia proposta também mostrou que o relé em questão, além de compensado, é adaptativo, pois sua impedância medida varia de acordo com os valores de tensão e corrente medidos no terminal local. Logo, os 85% da linha variam de acordo com a condição a que o sistema está submetido. Isso explica o fato de, na distância de 170 km da Tabela 4.1, por exemplo, o relé proposto ter acusado falta externa para uma resistência de falta de zero ohms, porém ter acusado uma falta interna para valores de resistência de falta maiores na mesma distância de falta. Ambas as decisões do relé, portanto, estão corretas.

Em (SALIM et al., 2010), simulações para relés de distância em um Sistema de Distribuição foram implementadas com a presença de uma carga constante no fim da linha, o que possibilitava uma ótima convergência para o valor da corrente de falta. Logo, o relé atuava com elevada precisão para resistências da ordem de 700 ohms. Nessa dissertação, foi desenvolvido um algoritmo com o mesmo objetivo, porém acrescido da dificuldade que envolve a presença de um componente ativo no terminal remoto. Esse novo procedimento aumenta o erro na estimativa da corrente de falta, uma vez que essa depende das correntes do terminal local e do terminal remoto (variável desconhecida). Para as diversas simulações realizadas em Sistemas de Transmissão, o algoritmo convergiu perfeitamente, mesmo com condições distintas de carregamento.

A área de Proteção Digital exige sempre estudos qualitativos e quantitativos, buscando sempre aprimorar metodologias já propostas, a fim de que sempre seja mantida a qualidade e confiabilidade na transmissão de energia elétrica.

## **8.1 Trabalhos Futuros**

Não obstante este trabalho tenha apresentado contribuições satisfatórias para sistemas de transmissão genéricos, inúmeras contribuições podem ser incorporadas a esse estudo. Logo, são propostos os seguintes tópicos para dar continuidade ao trabalho:

- Validação da metodologia proposta a partir de dados de faltas reais;
- Considerar o efeito capacitivo na metodologia proposta, trabalho já iniciado no Laboratório de Sistemas Elétricos de Potência;
- Desenvolver metodologia de proteção à distância para linhas paralelas;
- Considerar equipamentos compensadores na formulação proposta;
- Avaliação do desempenho da formulação proposta em faltas de alta impedância (não lineares);
- Desenvolver metodologia de proteção à distância para linhas com derivações

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P. M. **Power System Protection**. New York: Wiley-IEEE Press, 1999. 1330 p. (IEEE Press Power Engineering Series).
- BRASIL. **Código de Defesa do Consumidor**. Lei nº 8.078, de 11 de setembro de 1990. Brasília: Imprensa Nacional, 11 set. 1990. p.1-24.
- CHEN, C. S.; LIU, C. W.; JIANG, J. A. Application of combined adaptive fourier filtering technique and fault detector to fast distance protection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York: v. 21, n. 2, p.619-626, Apr. 2006.
- COMASSETTO, L. **Sistema de Energia: proteção de sistemas e aplicação de proteção**. São Leopoldo: AES Sul, 2010. 104 p. Material didático fornecido em curso de capacitação profissional em Sistemas de Energia.
- EISSA, M. Ground distance relay compensation based on fault resistance calculation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York: v. 21, n. 4, p.1830-1835, Oct. 2006.
- EREZZAGHI, M.; CROSSLEY, P. The effect of high resistance faults on a distance relay. *In: POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2003. Toronto. Proceedings...* New York: Wiley-IEEE Press, 2003. p. 13 - 17.
- FILOMENA, A. D. et al. Ground distance relaying with fault resistance compensation for unbalanced systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York: v. 23, n. 3, p.1319-1326, July 2008.
- GRAINGER, J. J.; STEVENSON JUNIOR, W. D. **Power System Analysis**. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- GROSS, C. A. **Power System Analysis**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1986. 593 p.
- HOROWITZ, S.; PHADKE, A. **Power System Relaying**. New York: Research Studies Press, 1995.

HOROWITZ, S.; PHADKE, A. Third zone revisited. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York: v.21, n.1, p.23-29, Jan. 2006.

LEE, S. J. et al. An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York: v.19, n.2, p.524–532, Apr. 2004.

LI, K. K.; LAI, L. L. Ideal operating region of digital distance relay under high resistance earth fault. **Electric Power Systems Research**, London: v. 43, p.215-219, May 1997. doi:10.1016/S0378-7796(97)01183-8.

LIU, Q. K. et al. Adaptive impedance relay with composite polarizing voltage against fault resistance. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York: v. 23, n. 2, p.586-592, Apr. 2008.

MEYER, W. S.; LIU, T. **Alternative Transient Program: ATP/EMTP**. Bonneville Power Administration. Disponível em: <<http://www.emtp.org/>>. Acesso em: 21 dez. 2010.

PANSINI, A. J. **Guide to Electrical Power Distribution Systems**. Boca Raton: CRC, 2005. 264 p.

PHADKE, A.; THORP, J. **Computer Relaying for Power Systems**. New York: Research Studies Press Limited, 2009.

PHADKE, A. G. et al. A Microcomputer based ultra-high-speed distance relay: field tests. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. New York: IEEE, v. PAS-100, n. 4, p. 2026-2036, 1981. DOI: 10.1109/TPAS.1981.316480.

PHADKE, A. G. et al. A Microcomputer based symmetrical component distance relay. *In: POWER INDUSTRY COMPUTER APPLICATIONS CONFERENCE*, 1979, New York. **Proceedings...** New York: IEEE, 1979. v. 1, p. 47 - 55.

PHADKE, A. G.; IBRAHIM, M.; HLIBKA, T. Fundamental basis for distance relaying with symmetrical components. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. New York: IEEE, v. PAS-96, n. 2, p. 2026-2036, Mar.-Apr. 1977. DOI: 10.1109/T-PAS.1977.32375.

PRINKLER, L.; HOIDALEN, H. K. **Atpdraw Version 3.5 Users Manual**: preliminary release no. 1.0. [S.l.]: [S.n.], 2002.

SALIM, R. H.; MARZEC, D. P.; BRETAS, A. S. Phase distance relaying with fault resistance compensation for unbalanced systems. **IEEE Transactions On Power Delivery**. New York: v. 26, n. 2, p.1282-1283, July 2010.

STEVENSON JUNIOR, W. D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. São Paulo: Mcgraw – Hill, 1974. 347 p.

WAIKAR, D. L.; CHIN, P. S. M. Fast and accurate parameter estimation algorithm for digital distance relaying. **Electric Power Systems Research**. London: v.44, p.53-60, Jan. 1998.

WAIKAR, D. L.; LIEW, A.; ELANGO VAN, S. Further enhancements in the symmetrical components based improved fault impedance estimation method - part II. performance evaluation. **Electric Power Systems Research**. London: v.40, p.189–194, 1997. DOI:10.1016/S0378-7796(96)01156-X.

WAIKAR, D. L.; ELANGO VAN, S.; LIEW, A. Further enhancements in the symmetrical components based improved fault impedance estimation method – Part I: mathematical modelling. **Electric Power Systems Research**. London: v. 40, p.189-194, Mar. 1997. DOI:10.1016/S0378-7796(96)01155-8.

\_\_\_\_\_. Further enhancements in the symmetrical components based improved fault impedance estimation method – Part II: Performance evaluation. **Electric Power Systems Research**. London: v. 40, n. 3, p.195-201, Mar. 1997. DOI:10.1016/S0378-7796(96)01156-X.

\_\_\_\_\_. A. Fault impedance estimation algorithm for digital distance relaying. **IEEE Transactions On Power Delivery**. New York: v. 9, n. 3, p.1375-1383, July 1994.

XIA, Y.; DAVID, A.; LI, K. High-resistance faults on a multi-terminal line: analysis, simulated studies and an adaptive distance relaying scheme. **IEEE Transactions On Power Delivery**. New York: v. 9, n. 1, p.492-500, Jan. 1994.

ZIEGLER, G. **Numerical Distance Protection**. Erlang: Publicis Corporate Publishing, 2006.

## APÊNDICE A: DISCUSSÃO SOBRE O TERMO $V_{Sb}/I_{Sa}$

Conforme estudado para faltas do tipo fase-fase, a impedância aparente medida no local do relé, vista na fase A, é dada por:

$$Z_{map} = \frac{V_{Sa}}{I_{Sa}} \quad (\text{A.1})$$

Entretanto, há outra forma de definir a impedância aparente medida, que pode ser definida como:

$$Z_{map} = \frac{V_{Sa} - V_{Sb}}{I_{Sa}} \quad (\text{A.2})$$

a qual revela:

$$\begin{aligned} Z_{map} = & R_F \cdot \left[ 1 + \frac{I_{Ra}}{I_{Sa}} \right] \\ & + x_a \cdot \left[ Z_{aa} + Z_{ab} \frac{I_{Sb}}{I_{Sa}} + Z_{ac} \frac{I_{Sc}}{I_{Sa}} \right] \\ & - x_b \cdot \left[ Z_{ba} + Z_{bb} \frac{I_{Sb}}{I_{Sa}} + Z_{bc} \frac{I_{Sc}}{I_{Sa}} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

Analisando (A.3), fica claro que a impedância medida não depende do termo  $V_{Sb}/I_{Sa}$ .

Em ambos os casos, entretanto, o cálculo de  $Z_{map}$  depende do valor medido de  $V_{Sb}$ . A

diferença é que em (A.1)  $V_{Sb}$  é usado como um fator de compensação, ao passo que em (A.2)

$V_{sb}$  é usado para calcular  $Z_{map}$ . Consequentemente, ambas as definições produzem as mesmas respostas. Os autores escolheram a definição dada por (A.1) a fim de explicitar esse termo, que aparece no programa computacional desenvolvido como sendo um dos termos de compensação do relé de distância. A performance do relé não é afetada por essa escolha.

## APÊNDICE B: EFEITO DO ERRO DE ESTIMAÇÃO DA CORRENTE DE FALTA

As equações de distância até o ponto faltoso ( $x$ ) e da resistência de falta ( $R_F$ ), definidas respectivamente por (3.20) e (3.21), dependem dos valores da corrente de falta, da diferença das tensões do terminal local, e dos parâmetros do sistema, definidos por  $M_1$  e  $M_2$ . Portanto, o único valor desconhecido é o da corrente de falta, e um erro em sua estimativa acarreta em uma multiplicação de erros para a estimação dos valores da distância e resistência de falta.

Conforme será demonstrado a seguir, a distância de falta é significativamente mais afetada por um erro aditivo na corrente de falta do que a resistência de falta estimada. Como a corrente de falta é estimada por um processo numérico, o qual pode resultar em erros de estimação, a estimativa da distância de falta não é usada para finalidades de comparação ou convergência. Conforme demonstrado em (FILOMENA et al., 2008), o algoritmo proposto funciona muito bem, tanto em relação à decisão de abertura do relé, como na estimativa correta do valor da resistência de falta. Esse trabalho apresenta uma dificuldade a mais, que é a introdução de um terminal remoto, cujo comportamento no período de falta é desconhecido, o que aumenta a incerteza na estimativa da corrente de falta, que é dada pela soma das correntes do terminal local e do terminal remoto. Logo, tornou-se ainda mais imprescindível a utilização da resistência de falta para fins de convergência.

Supondo que a corrente de falta apresente um erro de estimação, sua nova representação matemática pode ser dada por:

$$I_{Fa(r)} = I_{Fa(r)} + \varepsilon_1 \quad (\text{B.1})$$

$$I_{Fa(i)} = I_{Fa(i)} + \varepsilon_2 \quad (\text{B.2})$$

onde  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$  são os erros de estimação das correntes de falta real e imaginária, respectivamente. Consequentemente, (3.20) e (3.21) são dadas respectivamente por:

$$x = \frac{I_{Fa(i)} \cdot (V_{Sa(r)} - V_{Sb(r)}) - I_{Fa(r)} \cdot (V_{Sa(i)} - V_{Sb(i)})}{\beta} + \frac{\alpha}{\beta} \quad (\text{B.3})$$

$$R_F = \frac{-M_2 \cdot (V_{Sa(r)} - V_{Sb(r)}) + M_1 \cdot (V_{Sa(i)} - V_{Sb(i)})}{\beta} \quad (\text{B.4})$$

onde:

$$\alpha = \varepsilon_2 \cdot (V_{Sa(r)} - V_{Sb(r)}) - \varepsilon_1 \cdot (V_{Sa(i)} - V_{Sb(i)}) \quad (\text{B.5})$$

$$\beta = M_1 \cdot I_{Fa(i)} - M_2 \cdot I_{Fa(r)} + (\varepsilon_2 \cdot M_1 - \varepsilon_1 \cdot M_2) \quad (\text{B.6})$$

De (B.3) a (B.6) é possível concluir que o erro na estimativa da corrente de falta causa igual porcentagem de erro no cálculo de ambas variáveis, dada por  $1/\beta$ . Contudo, na equação da distância de falta, há um termo a mais fornecido pelo erro de estimação da corrente de falta, dado por  $\alpha/\beta$ .

Portanto, um erro adicional afeta mais significativamente a estimativa da distância de falta em comparação a da resistência de falta. Desse modo, o uso da resistência de falta no algoritmo, e não diretamente a localização da falta, para a estimação da distância, pode proporcionar melhor performance para o algoritmo.