



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Helen Barboza da Silva

Avaliação do desempenho da proteção de distância
do *software* ADDEP

Campina Grande, Paraíba
Agosto de 2015

Helen Barboza da Silva

Avaliação do desempenho da proteção de distância do *software* ADDEP

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Orientadora:
Prof^a. Núbia Silva Dantas Brito

Campina Grande, Paraíba
Agosto de 2015

Helen Barboza da Silva

Avaliação do desempenho da proteção de distância do *software* ADDEP

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Aprovado em _____ / _____ / _____

Prof^o. Francisco das Chagas Fernandes Guerra
Prof. Avaliador

Prof^a. Núbia Silva Dantas Brito
Orientadora

Dedico este trabalho às pessoas mais importantes da minha vida: minha mãe, Maria Istra Ferreira Rodrigues da Silva e meu pai, Wilson Barboza da Silva (in memoriam).

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, por todos os propósitos que tem reservado para minha vida e por ter me colocado e recolocado em Seu caminho por tantas vezes.

Agradeço aos meus pais, Wilson e Istra, por todos os esforços que fizeram para me criar, dando boa educação, tanto em termos acadêmicos como em termos de caráter. Por terem me dado todo o suporte, compreensão e dedicação que precisei durante minha vida e por todo o amor que me deram.

Agradeço às minhas irmãs, Saskia, Ingrid, Schirley e Suelen, e à toda minha família, pelo apoio e carinho que me deram.

Agradeço aos amigos que fiz na universidade, que comigo compartilharam tantas horas e noites de estudo, e tantos aborrecimentos e alegrias.

Agradeço à professora Núbia, minha orientadora, pela confiança e supervisão, assim como a oportunidade de trabalhar com ela.

Agradeço à Daphne, minha co-orientadora, pelo apoio e orientações a cerca do tema abordado e à Cecília, por estar sempre presente para sanar alguma dúvida.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma passaram em minha vida contribuindo em minha formação.

Resumo

Análise do desempenho da proteção de distância utilizando as características mhos (auto-polarizada e polarizada) e quadrilateral é o foco deste trabalho. Nele são apresentados os resultados de análise das diferentes formas de polarização que caracterizam a operação dos vários relés de proteção, com ênfase na proteção de distância aplicada a linhas de transmissão. Para isso utilizou-se uma base de dados contendo diversos cenários de falta e o ADDEP (Análise de Distúrbios e do DEsempenho da Proteção), que é um *software* de diagnóstico automático de distúrbios e análise de desempenho de sistemas de controle e proteção, o qual está sendo desenvolvido em um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) suportado pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf) e executado pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Palavras Chaves: proteção de distância, mho auto-polarizada, mho polarizada, quadrilateral, ADDEP, Chesf.

Abstract

This work will be evaluated the performance of distance protection using the mhos features self-polarized, polarized and quadrilateral. We present analysis results of different forms of bias that characterize the operation of various protective relays with emphasis on the distance protection applied to transmission lines. For that use a database to generate all possible cases of simultaneous and lack the ADDEP (Analysis Disorders and Protection Performance), which is an automated diagnostic software disorder and control system performance analysis and protection, which is being developed in a Research and Development Project (R & D) supported by the Hydroelectric Company of São Francisco (Chesf) and executed by the Federal University of Campina Grande (UFCG).

Key Words: distance protection, self-polarized, polarized, quadrilateral, ADDEP, Chesf.

Sumário

Lista de Ilustrações.....	10
Lista de Tabelas	11
1. Introdução.....	11
2.Fundamentação Teórica.....	12
2.1. Proteção de Distância.....	14
2.2. Relés de Distância	15
2.2.1.Diagrama R-X	15
2.2.2 Zonas de Proteção de Distância.....	15
2.2.3. Característica mho auto-polarizada.....	17
2.2.4. Característica mho Polarizada.....	20
2.2.5. Quadrilateral	21
3.0. O <i>Software</i> ADDEP	22
4.0. O TCC	28
5.0. Conclusão	35
6.0. Bibliografia.....	36

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Diagrama unifilar do sistema de proteção.....	13
Figura 2.2. – Diagrama R-X	15
Figura 2.3. - Tipos de características de operação do relé de distância.....	16
Figura 2.4 - Representação das zonas de proteção.....	17
Figura 2.5 - Representação das zonas de proteção de distância no diagrama R-X.....	17
Figura 2.6 - Característica de um relé tipo mho.....	18
Figura 2.7 - Representação da característica mho no plano R-X.....	19
Figura 2.8 - Relação entre as fases de Z_{op} e Z_{pol} para o caso de ZR.....	19
Figura 2.9 - Relação entre os módulos de Z_{op} e Z_{pol} para o caso de ZR.....	20
Figura 3.1 – Procedimentos adotados após uma ocorrência.....	22
Figura 3.2 – Diagrama de blocos do ADDEP.....	22
Figura 4.1 – Sistema do IEEE	28
Figura 4.2 - SEP de 230 kV modelado.....	29
Figura 4.3 - Modelo para simulação de faltas.....	30
Figura 4.4 - Fluxograma da metodologia proposta.....	31
Figura 4.5 - Desempenho do ADDEP.....	32
Figura 4.6 - Impedância aparente vista pelo relé em uma falta AT.....	33
Figura 4.7 - Impedância aparente vista pelo relé em uma falta AB.....	34
Figura 4.8 - Impedância aparente vista pelo relé em uma falta ABC.....	34

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Classificação de faltas pelo método de sobrecorrente.....	25
Tabela 3.2 - Fasores de operação e polarização para o elemento reativo.....	26
Tabela 3.3 - Fasores de operação e polarização para os elementos resistivos.....	26
Tabela 3.4 - Fasores de operação e polarização para o elemento direcional.....	27
Tabela 4.1 – Parâmetro das linhas modeladas.....	29
Tabela 4.2 – Parâmetros dos equivalentes utilizados.....	29
Tabela 4.3 - Características das faltas simuladas	31

1. Introdução

O sistema de energia elétrica pode ser afetado por diversos distúrbios tais como: curtos-circuitos, sobretensões, subtensões, sobrecarga, etc., os quais devem ser minimizados para evitar interrupção do serviço de fornecimento e/ou danos aos equipamentos do sistema. Visando proteger o sistema elétrico desses distúrbios, se tem o sistema de proteção, que de forma sucinta, tem como objetivo detectar as anomalias e assegurar e que a parte sob defeito seja isolada do restante do sistema, o mais rápido possível.

Dentre as diversas funções de proteção, a função de proteção de distância é uma das mais importantes, sendo atualmente considerada a função mais confiável para proteger linhas de transmissão de energia elétrica. Dentre as suas principais características destacam-se sua alta velocidade e boa coordenação. Apesar das suas muitas vantagens, ela é considerada uma das mais complexas, dadas as distâncias envolvidas, a quantidade de interligações e as diferentes configurações possíveis do sistema de transmissão.

Além do seu uso em sistemas de transmissão, a função de proteção de distância é também muito utilizada em sistemas de distribuição aéreos de alta tensão. Nesses casos, a proteção de distância é usada tanto como proteção principal da linha de distribuição, quanto como proteção retaguarda de outros componentes do sistema, como transformadores e barramentos.

Segundo a literatura especializada, esse tipo de proteção pode ser implementada de diversas formas. Neste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) deu-se enfoque ao estudo da proteção de distância com características mho e quadrilateral. O objetivo principal deste trabalho é o estudo da arte da proteção de distância e avaliar seu desempenho para diversos cenários de falta. Para realizar os estudos de casos, foram utilizados uma Base de Dados e o *software* ADDEP (Análise de Distúrbios e do **D**esempenho da **P**roteção), que está sendo desenvolvido em um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), conjuntamente com a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf) e o Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

2. Fundamentação Teórica

O sistema de proteção (SP) é definido como o conjunto de equipamentos e acessórios destinados a realizar a proteção para curtos-circuitos e para outras condições de operação anormais em componentes do sistema (ONS, 2008). Em outras palavras, o SP tem como objetivo salvaguardar os equipamentos e manter a integridade de fornecimento contínuo e econômico da energia elétrica.

O princípio de funcionamento dos sistemas de proteção baseia-se na **filosofia da proteção**, que corresponde a todas as ações realizadas para produzir um sistema que seja capaz de oferecer um serviço contínuo, confiável, seguro e com custos cada vez menores, ou seja: selecionar, coordenar, ajustar e aplicar os vários equipamentos e dispositivos protetores a um sistema elétrico, de forma a guardar entre si uma determinada relação, tal que uma anormalidade no sistema possa ser isolada e removida, sem que as outras partes do mesmo sejam afetadas (GIGUER, 1988).

Com base na filosofia de proteção, os órgãos regulamentadores determinam que um SP bem projetado deve atender aos seguintes requisitos (GUERRA, 2011):

- **Confiabilidade:** o SP deve atuar em caso de defeito e apenas neste caso.
- **Sensibilidade:** a faixa de incerteza entre as condições de operação e de não-operação do SP deve ser a menor possível.
- **Velocidade:** o SP deve atuar da forma mais rápida possível, de modo a evitar danos aos componentes do sistema elétrico (efeitos térmicos e eletrodinâmicos) ou perda de estabilidade do sistema.
- **Seletividade:** o defeito deve ser eliminado desligando-se a menor parte possível do sistema, de modo a ser mantido o máximo índice de continuidade de serviço.
- **Economia:** o custo do SP deve ser compatível com o custo do equipamento protegido e com a importância deste último em relação ao funcionamento do resto do sistema.
- **Coordenação:** os ajustes do SP devem ser realizados visando obter sensibilidade de coordenação adequada entre os dispositivos de proteção, de forma que as proteções adjacentes só atuem no caso de falha das proteções responsáveis por prover proteção à zona específica.
- **Simplicidade:** o SP deve utilizar a quantidade mínima de equipamentos e circuitos na execução da proteção.
- **Mantenabilidade:** a manutenção do SP deve ser rápida e precisa, reduzindo-se ao mínimo o seu custo e o tempo durante o qual o sistema fica fora de serviço.

Um SP deve detectar uma condição anormal de operação do sistema elétrico e iniciar uma ação corretiva tão rapidamente quanto possível, de modo a restringir ao mínimo a região afetada (Figura 2.1). A rapidez de resposta é um elemento essencial de um SP, que deve ser da ordem de uns poucos milissegundos.

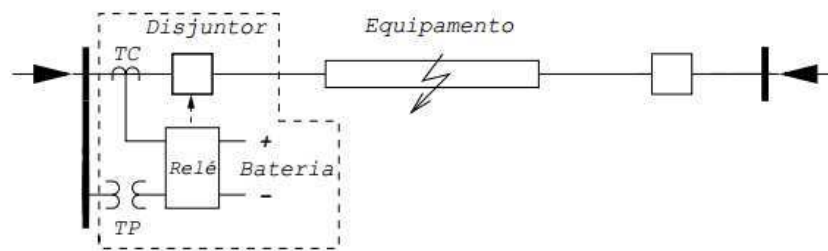


Figura 2.1 - Diagrama unifilar do SP.

De forma sucinta, o funcionamento de um SP típico pode ser descrito como:

“As condições do sistema elétrico (tensões e correntes) são constantemente monitoradas e transformadas em grandezas secundárias, que devem ser compatíveis com as entradas dos dispositivos proteção. Caso a(s) grandeza(s) monitorada(s) ultrapassem o(s) valor(es) de referência, o relé envia um sinal de *trip*, que comandará a abertura dos contatos do disjuntor associado ao relé”.

Um resumo das principais características dos equipamentos que compõem um SP é apresentado a seguir (KINDERMANN, 2009).

- **Transformador de corrente (TC):** sensor que realiza a transdução de **corrente** do sistema elétrico para níveis apropriados de funcionamento dos relés, medidores e dispositivos de controle e supervisão. O TC é na realidade, um transformador e tem como finalidades:
 - Isolar os relés, medidores e dispositivos de controle e supervisão do circuito de alta tensão.
 - Fornecer no seu secundário uma corrente proporcional à do primário (normalmente de valor 5 A).
 - Fornecer no seu secundário uma corrente de amplitude adequada para ser usada pelos relés, medidores e dispositivos de controle e supervisão.
- **Transformador de potencial (TP):** sensor que realiza a transdução de **tensão** do sistema elétrico para níveis apropriados de funcionamento dos relés, medidores e dispositivos de controle e supervisão. O TP é na realidade, um transformador e tem como finalidades:
 - Isolar os relés, medidores e dispositivos de controle e supervisão do circuito de alta tensão.
 - Fornecer no seu secundário uma tensão proporcional à do primário.
 - Fornecer no seu secundário uma tensão de amplitude adequada para ser usada pelos relés, medidores e dispositivos de controle e supervisão.
- **Relés:** são os principais componentes do SP. São responsáveis por receber as informações dos TC e TP e processá-las de maneira correta, tomando as devidas providências (abertura de um disjuntor ou envio de um alarme para o operador). No mercado, existem diferentes tipos de relés de proteção, em que cada um utiliza parâmetros diferentes para comparação com valores pré-ajustados.

- **Disjuntores:** são dispositivos de seccionamento de circuitos dos sistemas elétricos, podendo operar em condições normais ou anormais de operação. O disjuntor possui duas bobinas: uma de abertura e outra de fechamento que, quando energizadas, promovem respectivamente a abertura e o fechamento dos contatos principais, interrompendo a passagem da corrente. Os disjuntores possuem também contatos auxiliares que informam a posição dos contatos principais e o estado do disjuntor para os operadores de subestações, para os despachantes dos centros de operação de sistema e para os relés de proteção.

Além desses equipamentos, o SP necessita de uma fonte de corrente contínua, fornecida por uma bateria, que deve ser bem projetada, pois ela supre o SP, os sistemas de controle e sinalização e muitas vezes, a iluminação de emergência da subestação ou da usina.

2.1 Proteção de Distância

Segundo a literatura especializada, a proteção de distância é o tipo de proteção mais utilizado atualmente para proteger linhas de transmissão. A proteção de distância baseia-se na determinação da **impedância** do defeito a partir das medidas de tensão e corrente de curto-circuito no ponto de localização do relé, conforme Equação (2.1) (DELGADO, 2011):

$$Z_{sec} = \frac{U_{sec}}{U_{prim}} \times \frac{I_{prim}}{I_{sec}} \times Z_{prim}, \quad (2.1)$$

sendo:

Z_{sec} = impedância secundária [Ω]

Z_{prim} = impedância primário (impedância da linha de Alta Tensão) [Ω];

U_{sec} = tensão no secundário do TP [V];

U_{prim} = tensão no primário do TP [V];

I_{sec} = corrente no lado do secundário do TC [A];

I_{prim} = corrente no lado do primário do TC [A].

A partir do monitoramento dos sinais de tensão e corrente no terminal da linha onde o dispositivo de proteção está instalado, é possível determinar se a falta localiza-se dentro ou fora da zona protegida. A proteção de distância opera não somente para os defeitos dentro da zona protegida, mas também para os que ocorrem nas extremidades da linha. Devido a esta característica, assegura-se uma proteção de reserva para os defeitos que atingem as duas partes do sistema: a linha ou o cabo no seu todo, adicionado do barramento da outra extremidade e as ligações que partem deste último. (DELGADO, 2011).

2.2 Relé de Distância

Os relés de distância são representados pelo número **21** na norma ANSI. O princípio de funcionamento baseia-se na medição da impedância, admitância ou da reatância entre o ponto onde está instalado e o ponto de defeito, o que resulta em vários tipos de relés, como: relé de impedância (ohm), relé de admitância (mho) e relé de reatância.

Neste TCC, o enfoque foi dado aos relés com características mho auto-polarizada, polarizada e característica quadrilateral. A característica mho é a mais tradicional e pode ser implementada a partir de um único comparador. Ela tem alcance bem definido, é inerentemente direcional e pode tolerar a resistência de falta sem sofrer erros sérios de sobrealcançe devido ao carregamento. Sua principal vantagem é a alta velocidade e boa coordenação, além de ser uma ferramenta útil contra a perda de sincronismo entre sistemas.

2.2.1 Diagrama R-X

Esse diagrama é um recurso poderoso na análise das proteções de distância e tem como principais características:

- Visualizar as características do relé de distância de modo mais conveniente.
- Visualizar as várias impedâncias das malhas de falta, diferenciando as impedâncias de carga das de falta.
- Analisar tanto os valores de impedância estáticos quanto dinâmicos, esses últimos importantes para que não ocorram operações indevidas da proteção.
- Facilitar os ajustes das zonas de maior alcance, de maneira a não operar para impedâncias de sobrecarga.

Em um diagrama R-X, o eixo das abscissas representa a resistência **R** e o eixo das ordenadas a reatância **X**. A partir da razão entre os fasores tensão \hat{V}_R e corrente \hat{I}_R medidos pelo relé, obtém-se a impedância aparente Z_R vista pelo relé, cujas coordenadas no diagrama R-X são: $r_R = |Z_R| \cos \theta_R$ e $x_R = |Z_R| \sin \theta_R$ (Figura 2.2).

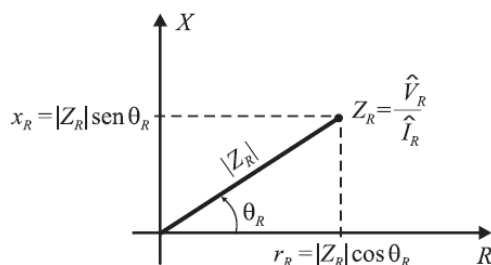


Figura 2.2. – Diagrama R-X.

O relé deve operar caso Z_R esteja dentro de sua característica de operação, que consiste de uma figura geométrica no plano R-X. Diversas figuras geométricas são utilizadas, como: círculos, retângulos, elipses, bem como a combinação delas (Figura 2.3). A

escolha da característica a ser usada depende do sistema a ser protegido e das características disponíveis nos relés.

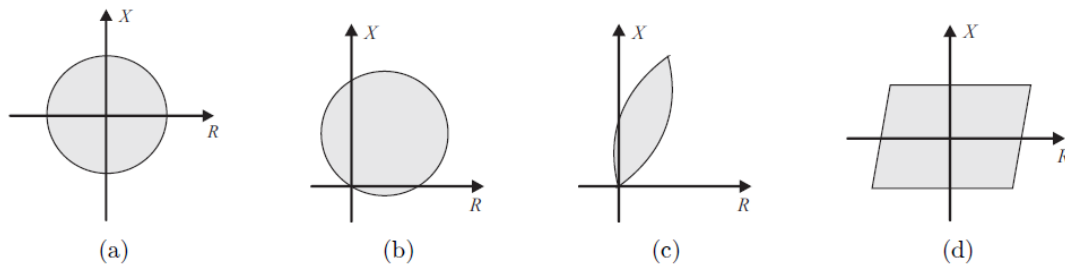


Figura 2.3. - Tipos de características de operação do relé de distância:
 (a) Impedância; (b) Mho; (c) Lenticular; (d) Retângulo.
 (Fonte: ANDERSON, 1999)

2.2.2 Zonas de Proteção

Devido à grande extensão e complexidade dos sistemas elétricos de potência, a proteção é dividida em zonas de proteção. As características de seletividade e coordenação de um relé de distância estão diretamente ligadas ao ajuste de suas zonas de proteção, que consistem de diferentes alcances, associados a diferentes tempos de atraso. Usualmente, são utilizadas três zonas de proteção, entretanto, algumas vezes podem ser utilizadas zonas adicionais (ZIEGLER, 2006). Um resumo das três zonas de proteção mais utilizadas é apresentado a seguir (SILVA, 2009).

- **Primeira Zona:** a impedância de alcance deve apresentar valor na faixa compreendida entre 80% a 85% da impedância da linha que está sendo protegida e possuir margem de segurança entre 15% a 20%, devido às imprecisões provenientes das diversas fontes de erro, como por exemplo, dos TC e TP, que podem tornar o relé sobrealçado ou subalçado, causando uma operação inadequada. Além disso, ela não deve apresentar tempo de atraso intencional em sua operação
- **Segunda zona:** a proteção deve cobrir 100% da linha protegida pela primeira zona, adicionada de cerca de 50% da menor linha que emane da menor linha adjacente ao seu terminal remoto. O tempo de atuação compreende o tempo de atuação da primeira zona das linhas adjacentes adicionado do tempo de abertura dos disjuntores do barramento adjacente e de uma margem de segurança. Tipicamente, a sua operação é retardada de um tempo T_2 da ordem de 200 ms a 500 ms.
- **Terceira Zona:** a principal função é promover proteção de retaguarda para defeitos ocorridos em linhas adjacentes à linha protegida pela primeira zona. Geralmente, o seu alcance é ajustado para proteger 100% da menor linha que emana do terminal remoto da linha protegida pela primeira zona, adicionado de 20% da menor linha à sua jusante. Sua operação tem um retardo de tempo T_3 da ordem de 800 ms. Ela também é utilizada para cobrir até o final da linha adjacente mais curta em 1s, funcionando como proteção de retaguarda. Nessa condição é denominada de zona de inversão da zona 3 e pode reduzir o risco de operação da zona 3 em carga ou com oscilações de potência.

Devido à importância do sistema elétrico a ser protegido, geralmente as zonas de proteção são sobrepostas para prevenir que algum elemento fique desprotegido. Os principais elementos devem ser incluídos em pelo menos duas zonas de proteção. Um esquema típico da divisão de zonas e distâncias cobertas pelos relés e um diagrama R-X da característica de operação do relé são apresentados nas Figuras 2.4 e 2.5, respectivamente.

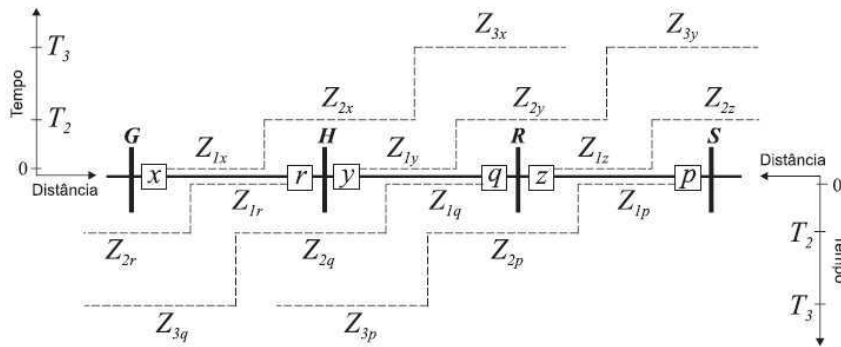


Figura 2.4 - Representação das zonas de proteção de distância.
(Fonte: ANDERSON, 1999)

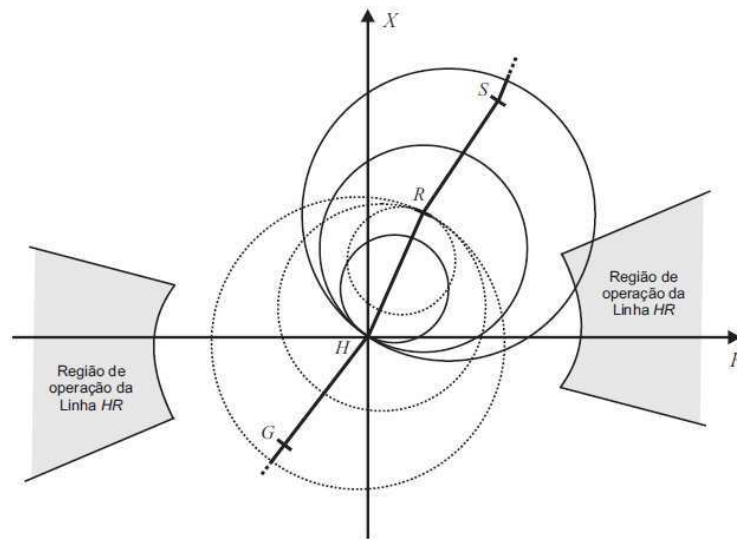


Figura 2.5 - Representação das zonas de proteção de distância no diagrama R-X.
(Fonte: ZIEGLER, 2006)

2.2.3 Característica Mho Auto-Polarizada

Na era dos relés eletromecânicos a característica **mho** foi a mais utilizada. Quando desenhada em um diagrama de impedâncias R-X resulta em um círculo, cuja circunferência passa pela origem, o que transmite a sua direcionalidade conforme mostrado na Figura 2.6.

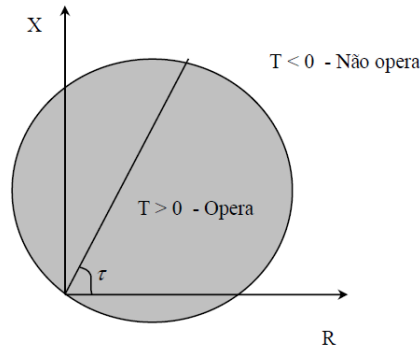


Figura 2.6 - Característica de um relé tipo mho.
(Fonte: SIQUEIRA, 2007)

Dentre as diversas características de um relé mho, o tipo **auto-polarizado** foi sem dúvida o mais estudado e utilizado, de modo que ainda hoje muitos relés digitais comerciais a implementam (ZIEGLER, 2006).

O conceito de **autopolarização** baseia-se no fato de que, nessa característica, a grandeza de polarização utilizada nos comparadores é a própria tensão de entrada do relé. Para entender o princípio de funcionamento dessa característica, apresentam-se a seguir alguns conceitos (PAITHANKAR & BHIDE, 2007).

Comparador de Fase

Os valores das tensões de operação \hat{V}_{op} e de polarização \hat{V}_{pol} do comparador de fase para a característica mho autopolarizada são definidos como:

$$\hat{V}_{op} = -\hat{V}_r + \hat{I}_r Z_A \quad (2.2)$$

$$\hat{V}_{pol} = \hat{V}_r. \quad (2.3)$$

Sendo: \hat{V}_r e \hat{I}_r os fasores da tensão e corrente medidos pelo relé, respectivamente; Z_A a impedância de alcance do relé, calculado da seguinte forma:

$$Z_A = \frac{h Z_{L1}}{\cos(\theta_{L1} - \tau)}. \quad (2.4)$$

Sendo: h a porcentagem do comprimento total da linha de transmissão a ser protegida; τ o ângulo de projeto da característica mho, ou ângulo de torque máximo do relé. O valor desse ângulo nos relés eletromecânicos é ajustado para ser igual ao ângulo θ_{L1} da linha, o que se deve a utilização de uma impedância réplica. Contudo, a fim de melhorar a cobertura da resistência de falta, não raro o ângulo τ é ajustado para um valor menor que θ_{L1} , conforme ilustrado na Figura 2.7.

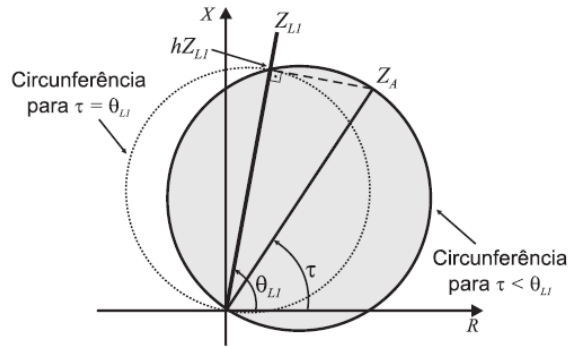


Figura 2.7 - Representação da característica mho no plano R-X.
(Fonte: SILVA, 2008)

O relé detecta o defeito em sua zona de proteção caso a diferença entre as fases da tensão de polarização e operação satisfaçam a seguinte condição: $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$, em que ϕ é a diferença das fases dos fasores \hat{V}_{pol} e \hat{V}_{op} .

As impedâncias de polarização e operação, respectivamente \hat{Z}_{op} e \hat{Z}_{pol} , serão representadas no plano R-X como mostrado na Figura 2.8, onde é possível verificar três situações para a detecção de \hat{Z}_r : dentro da característica mho (Figura 2.8 (a)); sobre a característica mho (Figura 2.8 (b)); fora da característica mho (Figura 2.8 (c)).

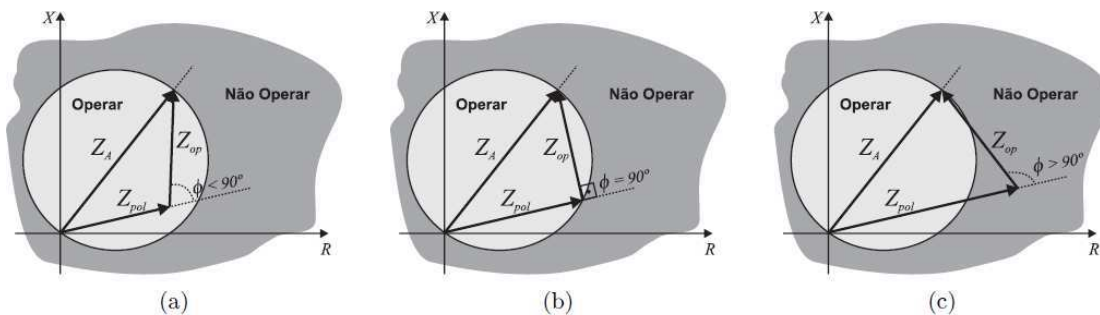


Figura 2.8 - Relação entre as fases de Z_{op} e Z_{pol} para o caso de Z_R : (a) dentro da característica mho; (b) sobre a característica mho; (c) fora da característica mho.
(Fonte: SILVA, 2008)

Comparador de Módulo

Os fasores das tensões de operação \hat{V}_{op} e de polarização \hat{V}_{pol} do comparador de módulo para a característica mho autopolarizada são definidos conforme a seguir.

$$\hat{V}_{op} = \frac{Z_A}{2} \hat{I}_r. \quad (2.5)$$

$$\hat{V}_{pol} = -\hat{V}_r + \frac{Z_A}{2} \hat{I}_r. \quad (2.6)$$

A detecção do defeito pelo relé em sua zona de proteção é realizada caso se tenha:

$$|\hat{V}_{op}| \geq |\hat{V}_{pol}|. \quad (2.7)$$

Essas variáveis de operação e polarização do comparador de módulo também podem ser interpretadas como impedâncias. Para isso, realizamos a divisão das Equações (2.5) e (2.6) por $\hat{I}r$, e assim são obtidos os valores das impedâncias Z_{op} e Z_{pol} :

$$Z_{op} = \frac{Z_A}{2} \quad (2.8)$$

$$Z_{pol} = -Z_r + \frac{Z_A}{2} \quad (2.9)$$

Essas equações podem ser representadas no plano R-X conforme mostrado na Figura 2.9, onde observam-se três situações possíveis para a localização de Z_r : dentro da característica mho (Figura 2.9 (a)); sobre a característica mho (Figura 2.9 (b)); fora da característica mho (Figura 2.9(c)).

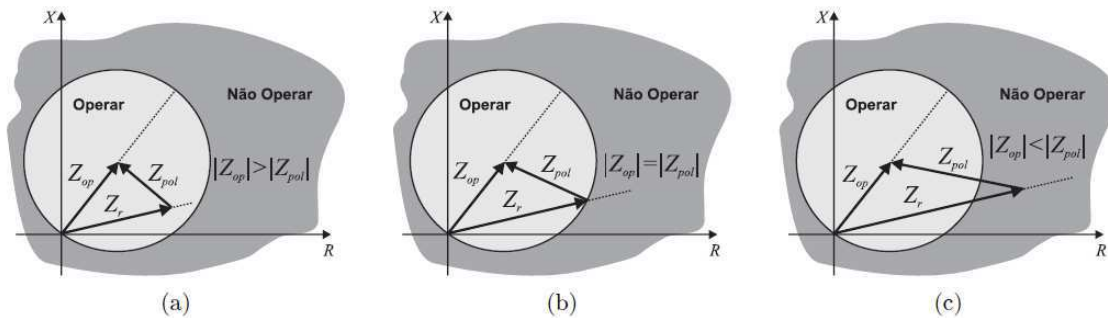


Figura 2.9 - Relação entre os módulos de Z_{op} e Z_{pol} para o caso de Z_r : (a) dentro da característica mho; (b) sobre a característica mho; (c) fora da característica mho. (Fonte: SILVA, 2008).

2.2.4 Característica Mho Polarizada

A característica mho **polarizada** é utilizada quando a resistência de falta é baixa e a falta se encontra próximo do ponto de instalação do relé, o que faz com que a tensão V_R caia a zero. Neste caso, a tensão de polarização será a soma da tensão V_R com uma parcela suplementar, que depende do tipo de polarização utilizada: cruzada ou por memória de tensão.

A polarização por memória de tensão é mais utilizada na proteção de linhas de transmissão compensadas, com capacitores série protegidos por varistores de óxido de zinco. A polarização cruzada é usada principalmente em faltas muito próximas dos relés. No caso de faltas trifásicas, pode-se utilizar uma memória de tensão pré-existente ao defeito (MARTTILA, 1992).

2.2.5 Característica Mho Quadrilateral

Os relés de distância também podem ser implementados considerando uma forma **poligonal**. Este tipo de relé reúne no elemento de medida a característica de reatância, a decisão da direção e a limitação ao longo do eixo da resistência (R). Desta forma, é possível regular os alcances resistivo e reativo de forma independente entre eles. Nesta

classe, destacam-se os relés que utilizam um **quadrilátero**, que segundo a literatura especializada, proporciona uma melhor cobertura resistiva dos defeitos, o que é importante no caso de linhas muito curtas, uma vez que nos defeitos à terra, a resistência de defeito pode assumir valores elevados (DELGADO, 2011).

Em um relé digital numérico uma característica quadrilateral pode ser definida conforme mostrado na Figura 2.10. A reta que liga z_1 a z_2 define a direcionalidade, ou seja, nesta situação o relé atua para o defeito à jusante do disjuntor, na direção da linha à proteger.

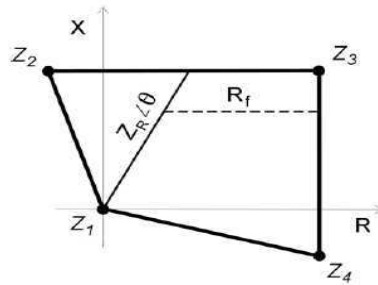


Figura 2.10 - Característica quadrilateral.
(Fonte: ZIEGLER, 2006)

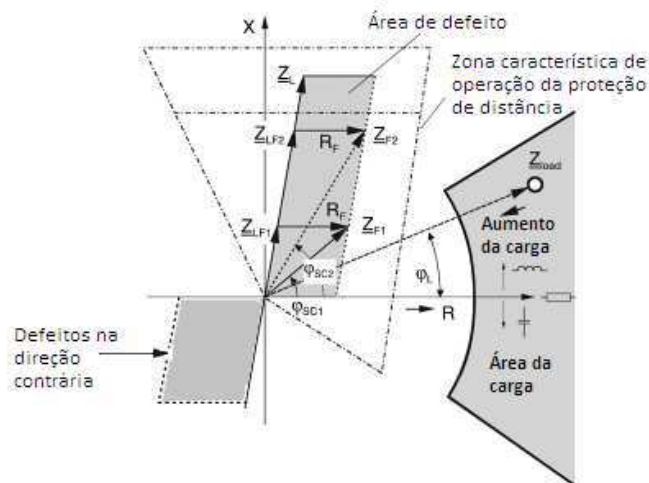


Figura 2.11 - Impedância da carga e de curto-circuito.
(Fonte: POWER SYSTEM RELAY COMMITTEE WORKING GROUP, 2006)

3. O Software ADDEP

O ADDEP é um *software* que está sendo desenvolvido em um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), conjuntamente com a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf) e o Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O objetivo do ADDEP é auxiliar os engenheiros da Chesf no processo de confecção de Relatórios de Análise de Desempenho da Proteção (RADP), os quais são encaminhados ao ONS, quando da ocorrência de um distúrbio no sistema. Ao final, o ADDEP deverá fornecer dados referentes ao diagnóstico do distúrbio e à análise do desempenho do SP.

Segundo a Chesf, os procedimentos adotados após uma ocorrência se dão conforme mostrado na Figura 3.1. O ADDEP deverá auxiliar na etapa de confecção dos RADP.

1. Coleta de Dados	Dados da Operação (RDO) ou de Órgãos de manutenção Oscilografia (interna e externa) e qualimetria Dados do SAGE - Alarmes e Sequencial de Eventos (SOE) Histórico de perturbações anteriores, bem como, recomendações emitidas
2. Análise	Ferramentas computacionais (oscilografia, dados digitais, e demais informações) Elaboração do RADP (Relatório de Análise do Desempenho da Proteção)
3. Resultados e Ações	Emissão de recomendação; registro de casos especiais; comunicação com divisões de manutenção com o objetivo de solucionar os problemas encontrados

Figura 3.1 – Procedimentos adotados na Chesf após uma ocorrência.
(Fonte: COSTA, 2014)

O *status* atual do ADDEP é apresentado de forma sucinta na Figura 3.2 e mais detalhadamente a seguir (COSTA, 2014).

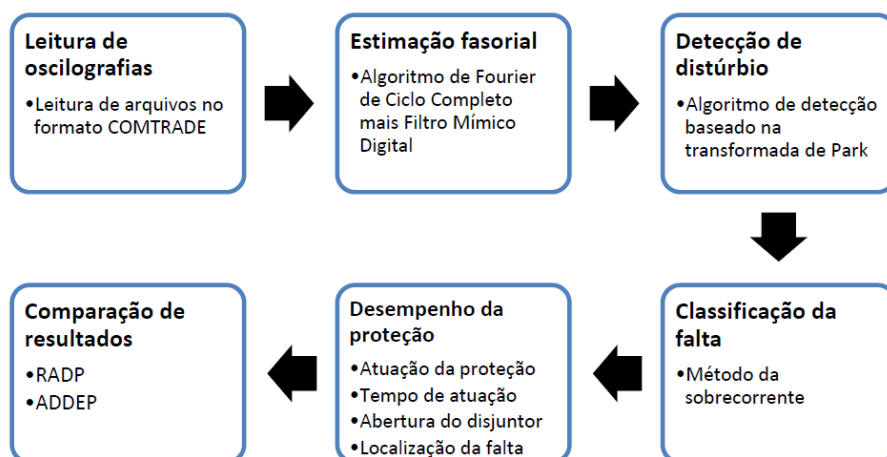


Figura 3.2 – Arquitetura do *software* ADDEP.
(Fonte: COSTA, 2014)

- **Leitura das Oscilografias**

A oscilografia é um registro das grandezas elétricas analógicas e digitais do sistema elétrico, armazenados de forma automática ou manual nos relés digitais de proteção. O registro manual é feito por intermédio do usuário e normalmente, serve para analisar condições operativas do sistema elétrico no instante de interesse do usuário. O processo de gravação automática é feito via programação efetuada pelo usuário e inicia no instante em que ocorrem mudanças de valores analógicos ou estados digitais em consequência de disparos de proteção ou variações de grandezas elétricas.

Durante a ocorrência de um distúrbio no sistema, os relés digitais gravam os registros das variações ocorridas em memórias internas não voláteis (ou seja, em arquivos), o que permite análise da operação do relé, identificação do tipo de defeito, das fases envolvidas, dos tempos da ocorrência de mudanças de estado ou valores analógicos, localização do ponto de ocorrência da falta, análise da coordenação da proteção, etc. As oscilografias são armazenadas pelo relé nas seguintes situações: disparo da proteção (*trip*), partida de registro programado e partida de registro manual.

- **Estimação dos Fasores**

O processo de estimação fasorial consiste na representação do módulo e ângulo de fase dos sinais de corrente e tensão, provenientes dos TP e TC. Os algoritmos de cálculo de fasores empregados na proteção de distância podem ser interpretados como algoritmos de filtragem digital, onde o sinal amostrado passa por filtros digitais visando filtragem da componente fundamental dos sinais de tensão e corrente.

O maior desafio com a filtragem digital está relacionado à rejeição da componente CC de decaimento exponencial, uma vez que pode levar a erros na estimação da grandeza medida. Essa componente consiste em um sinal não-periódico, cujo espectro de frequência inclui todas as frequências. Ela tem grande influência na precisão e na velocidade de convergência dos fasores estimados (DONG-GYU, 2008).

A partir da estimação desses fasores, calcula-se a impedância aparente vista pelo relé, a qual é comparada com a sua característica de operação, podendo resultar em um sinal de disparo para os disjuntores e no envio de mensagens de teleproteção para os relés nos terminais remotos das linhas de transmissão. Na literatura é possível encontrar diferentes algoritmos para estimação fasorial. No ADDEP, o processo de estimação de fasores é feito via algoritmo de Fourier de ciclo completo em conjunto com um filtro mímico digital, que foi proposto por Benmouyal em 1995. Ele se baseia no circuito mímico que é utilizado nos relés eletromecânicos e estáticos.

- **Detecção do Distúrbio**

No ADDEP, o método de detecção de distúrbios utilizado é o proposto por LOPES (2011), que baseia-se no uso da Transformada de Park ($Tdq0$). Essa transformada foi proposta por R. H. Park e associados em 1929 e seu princípio pode ser enunciado da seguinte forma: a $Tdq0$ decompõe as grandezas de armadura de uma máquina síncrona em duas componentes girantes, sendo uma delas alinhada com o eixo do enrolamento de campo (componente de eixo direto d) e a outra em quadratura com este mesmo eixo (componente de eixo em quadratura q).

Baseando-se nessa teoria, LOPES (2011) propôs o uso da Tdq0 para fins de detecção de distúrbios em linhas de transmissão. Neste caso, a transformação faz com que o sistema referencial gire na frequência do sistema elétrico em sincronismo com os fasores de fase do sistema trifásico. Na situação de regime permanente, não são identificadas variações de frequência, pois a velocidade angular relativa entre os referidos vetores e o sistema referencial será nula. Contudo, na situação de transitório, a velocidade relativa entre os fasores e a referência passa a ser diferente de zero, o que faz com que os sinais gerados possuam amplitudes não nulas e comportamento oscilatório.

No método proposto por LOPES (2011), a detecção dos distúrbios é feita via Equação (3.1).

$$[C_{dif}(t)]^2 = \left[\frac{V_d(t) - V_d(t-\Delta t)}{\Delta t} \right]^2, \quad (3.1)$$

sendo Δt , o período de amostragem dos sinais analisados.

Um exemplo da aplicação do método de detecção é apresentado na Figura 3.5 de transitórios.

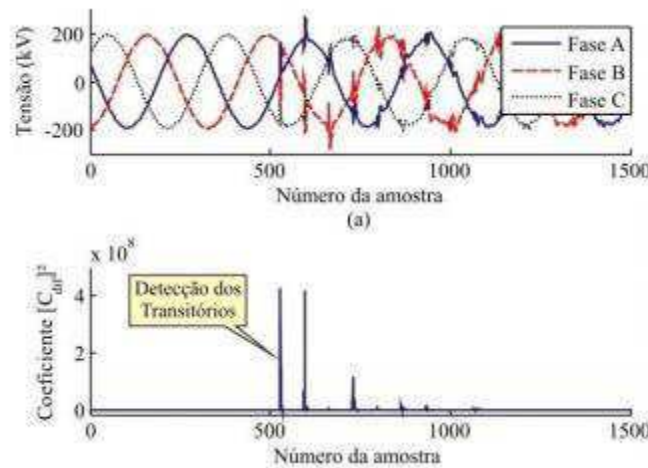


Figura 3.3 - Detecção de transitórios usando a Tdq0: (a) Tensão trifásica; (b) Coeficientes $[C_{dif}(t)]^2$.

(Fonte: Machado, Stefanello, Mariotto, 2011)

• Classificação da Falta

No ADDEP, a classificação da falta é realizada por meio do método de sobrecorrente (ADU, 2002). Inicialmente é feita a decomposição dos fasores das correntes em componentes simétricas, seguido de comparações entre os módulos das componentes de sequência zero e positiva, entre os módulos de sequência negativa e positiva e entre os ângulos das componentes de sequência positiva e negativa nos instantes de falta e pré-falta. No ADDEP também é implementado a técnica com os fasores de frequência fundamental (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Classificação de faltas pelo método de sobrecorrente.

Tipo	Condições
AT	$\Delta I_a > 0; \Delta I_b < 0; \Delta I_c < 0; I_r > I_{limiar}$
BT	$\Delta I_a < 0; \Delta I_b > 0; \Delta I_c < 0; I_r > I_{limiar}$
CT	$\Delta I_a < 0; \Delta I_b < 0; \Delta I_c > 0; I_r > I_{limiar}$
AB	$\Delta I_a > 0; \Delta I_b > 0; \Delta I_c < 0; I_r \leq I_{limiar}$
BC	$\Delta I_a < 0; \Delta I_b > 0; \Delta I_c > 0; I_r \leq I_{limiar}$
CA	$\Delta I_a > 0; \Delta I_b < 0; \Delta I_c > 0; I_r \leq I_{limiar}$
ABT	$\Delta I_a > 0; \Delta I_b > 0; \Delta I_c < 0; I_r > I_{limiar}$
BCT	$\Delta I_a < 0; \Delta I_b > 0; \Delta I_c > 0; I_r > I_{limiar}$
CAT	$\Delta I_a > 0; \Delta I_b < 0; \Delta I_c > 0; I_r > I_{limiar}$
ABC	$\Delta I_a > 0; \Delta I_b > 0; \Delta I_c > 0; I_r \leq I_{limiar}$

Os valores ΔI_a , ΔI_b e ΔI_c serão obtidos da seguinte maneira:

$$\Delta I_a = |I_a| - THV \quad (3.12)$$

$$\Delta I_b = |I_b| - THV \quad (3.13)$$

$$\Delta I_c = |I_c| - THV. \quad (3.14)$$

Sendo:

I_a : corrente na fase A;

I_b : corrente na fase B;

I_c : corrente na fase C;

I_r : módulo da soma das três correntes anteriores;

I_{limiar} : valor limiar de corrente, considerado igual a 1;

THV : valor limiar definido para ser maior do que a corrente de pré-falta (no ADDEP, considera-se 3 (três) vezes maior).

• Desempenho da Proteção

Esta etapa tem como objetivo avaliar a atuação da proteção e os tempos estimados de abertura do disjuntor em relação à detecção da falta. O tempo de isolamento de um distúrbio é computado pela soma dos tempos de comparação, decisão e ação. Este somatório de tempo é importante, pois está diretamente relacionado aos danos que a anormalidade pode causar ao SEP. Como já dito, na característica mho a proteção será ativada quando a diferença entre as fases da tensão de operação e de polarização estiverem entre -90° e 90° . Para a característica quadrilateral foram implementados no ADDEP os comparadores mais comumente utilizados:

Unidade de reatância

são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Fasores de operação e polarização para o elemento reativo.

Unidade	F_{op}	F_{pol}
AT	$I_a Z_{n1} - V_a$	I_a ou I_{a2} ou I_{a0}
BT	$I_b Z_{n1} - V_b$	I_b ou I_{b2} ou I_{b0}
CT	$I_c Z_{n1} - V_c$	I_c ou I_{c2} ou I_{c0}
AB	$I_{ab} Z_{n1} - V_{ab}$	I_{ab}
BC	$I_{bc} Z_{n1} - V_{bc}$	I_{bc}
CA	$I_{ca} Z_{n1} - V_{ca}$	I_{ca}

Sendo:

I_a, I_b, I_c : correntes de fase.

I_{a2}, I_{b2}, I_{c2} : correntes de fase de sequência negativa.

I_{a0}, I_{b0}, I_{c0} : correntes de fase de sequência zero.

I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} : correntes entre fases.

V_a, V_b, V_c : tensões de fase.

V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} : tensões entre fases.

Z_{n1} : alcance referente à unidade de reatância. Corresponde a uma porcentagem da impedância de sequência positiva da linha concernente à primeira zona de proteção. Para as demais zonas é feito de modo análogo. A atuação do equipamento de proteção irá acontecer quando a diferença entre as fases de tensão de operação e polarização estiverem entre 0° e 180° .

Unidades resistivas

Os fasores para os elementos de fase e terra das unidades resistivas são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Fasores de operação e polarização para os elementos resistivos.

Unidade	F_{op}	F_{pol}
AT	$I_{aeq} RG - V_a$	I_{aeq}
BT	$I_{beq} RG - V_b$	I_{beq}
CT	$I_{ceq} RG - V_c$	I_{ceq}
AB	$I_{ab} RP - V_c$	I_{ab}
BC	$I_{bc} RP - V_a$	I_{bc}
CA	$I_{ca} RP - V_b$	I_{ca}

Sendo:

$I_{aeq}, I_{beq}, I_{ceq}$: correntes equivalentes de fase, em função do fator de compensação de sequência zero.

RG e RP : alcances resistivos dos elementos de terra e fase em Ω /fase.

A sua atuação irá acontecer quando a diferença entre as fases de tensão de operação e polarização se encontra entre $-(180^\circ-\theta_1)$ e θ_1 , sendo θ_1 o ângulo da impedância da linha de sequência positiva.

Unidade direcional

Os fasores para os elementos de fase e terra da unidade direcional são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Fasores de operação e polarização para o elemento direcional.

Unidade	F_{op}	F_{pol}
AT	I_a	V_a
BT	I_b	V_b
CT	I_c	V_c
AB	I_{ab}	V_{ab}
BC	I_{bc}	V_{bc}
CA	I_{ca}	V_{ca}

Sendo:

I_a, I_b, I_c : correntes de fase.

I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} : correntes entre fases.

V_a, V_b, V_c : tensões de fase.

V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} : tensões entre fases.

Sua atuação irá ocorrer quando a diferença entre as fases de tensão de operação e polarização se encontra entre $-(90^\circ+\alpha)$ e $(90^\circ-\alpha)$, sendo α o ângulo característico da unidade direcional.

A maioria dos curtos-circuitos que ocorrem em linhas de transmissão são faltas à terra. Nestes casos, a precisão da proteção de distância depende, também, da compensação de sequência zero para a impedância da terra. A compensação de sequência zero com o número complexo k_0 é realizada em vários relés e é de fácil implementação.

Normalmente a impedância da linha de sequência positiva, $Z_1=R_1+jX_1$, e a impedância de sequência zero, $Z_0=R_0+jX_0$, estão disponíveis e são parâmetros para o cálculo dos fatores de compensação. Ele é calculado da seguinte maneira (ZOCHOLL, 1995):

$$k_0 = \frac{Z_0-Z_1}{3Z_1}, \quad (3.15)$$

sendo: Z_1 e Z_0 as impedâncias de sequência positiva e zero, respectivamente.

• **Comparação dos Resultados**

Ao final, um arquivo em formato .txt é gerado pelo ADDEP, a partir do qual são apresentadas informações importantes sobre os distúrbios.

4.0. O TCC

Conforme já apresentado, o objetivo principal deste TCC é estudar a arte da proteção de distância e avaliar seu desempenho para diversos cenários de falta. Para realizar tais estudos, foram utilizados os *softwares* ADDEP, ATP e o Matlab® e adotou-se a metodologia apresentada a seguir.

Seleção do sistema-teste

Para isso, selecionou-se o sistema sugerido pelo IEEE *Power System Relaying Committee* (2004), para estudo de esquemas de proteção em linhas de transmissão, o qual é composto de (Figura 4.1):

- Dois equivalentes de Thévenin (S1 e S3), simulando os geradores do sistema.
- Uma máquina síncrona (S2).
- Um transformador (T1) que liga a barra 4 à máquina síncrona S2.
- Uma linha de transmissão com circuito duplo mutuamente acopladas (Linha 1 e Linha 2), interligando as barras 1 e 2.
- Uma terceira linha (Linha 3), que pode ser adicionada ao circuito por meio da chave SW, permitindo, caso necessário, avaliações de esquemas de proteção em linhas de três terminais.
- Uma quarta linha (Linha 4), interligando as barras 2 e 4.
- Um transformador de potencial capacitivo (TPC). O modelo disponibilizado permite considerar os efeitos provenientes do TPC como, por exemplo, a atenuação de transitórios e as distorções nos registros de falta.

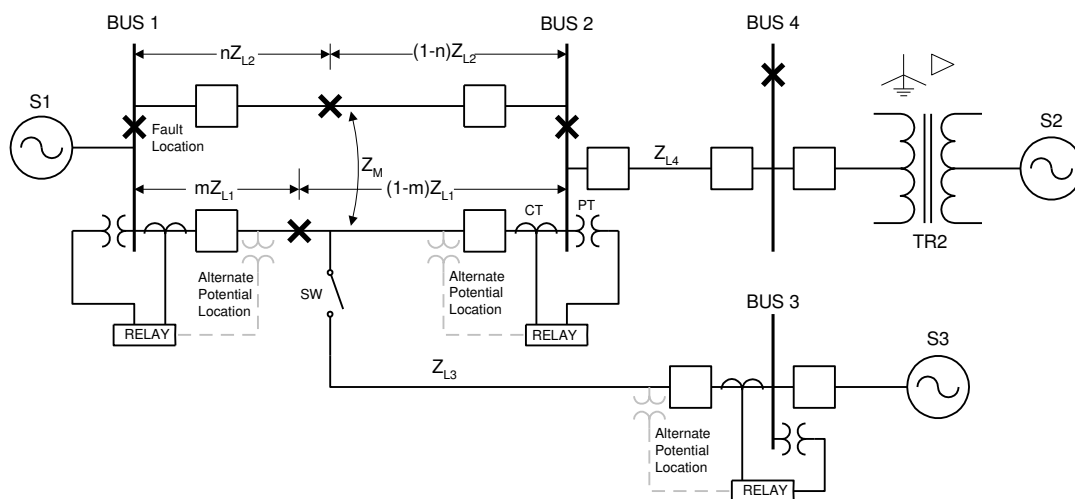


Figura 4.1 – Sistema IEEE.

Visando adequá-lo aos estudos desejados, modificações foram realizadas, o que resultou no sistema mostrado na Figura 4.2, que passou a ser denominado de **sistema-teste**. Ele é um sistema de 230 kV, constituído, basicamente, de: duas linhas paralelas (LT1 e LT2)

de 150 km que interligam as barras 1 e 2; uma terceira linha (LT3) também de 150 km, que interliga as barras 2 e 3; e dois equivalentes de Thévenin (S1 e S2), os quais representam os SEP interligados às barras 1 e 3 (FELIPE V. LOPES, 2014).

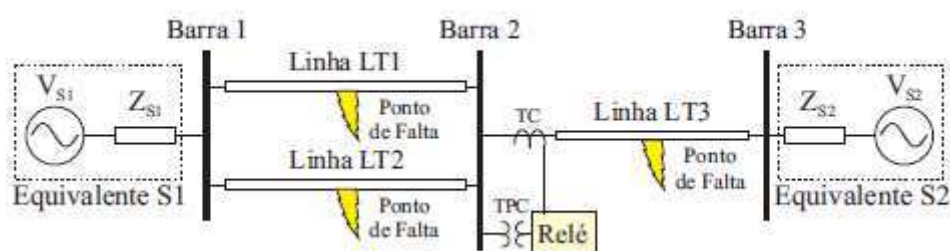


Figura 4.2 - Sistema-teste.
(Fonte: FELIPE V. LOPES, 2014).

Os parâmetros elétricos do sistema original também foram modificados visando adequá-los às estruturas das torres de transmissão tipicamente utilizadas pelo SIN (Sistema Interligado Nacional) e assegurar o uso de modelos e equipamentos elétricos que estejam disponíveis tanto no ATP quanto no CAPE. Estes parâmetros utilizados na modelagem da linha de transmissão e dos equivalentes Thévenin estão presentes nas Tabelas 4.1 e 4.2 (CBA, 2014).

Tabela 4.1 - Parâmetro das linhas modeladas.

Sequência	Resistência (Ω/km)	Reatância (Ω/km)	Suceptância ($\mu\text{S}/\text{km}$)
Zero	0,246349	1,33113	1,80723
Positiva	0,0937011	0,677849	2.422979

Tabela 4.2 - Parâmetros dos equivalentes utilizados.

Dados	Equivalentes	
	S1	S2
Tensão (p.u)	1,00	0,95
Impedância (Ω)	Seq. Zero	4,1 + j4,7
	Seq. Positiva	1,7 + j6,4

Modelo de simulação das faltas

O modelo adotado para geração dos diversos cenários de faltas é apresentado a seguir (FELIPE V. LOPES, 2014).

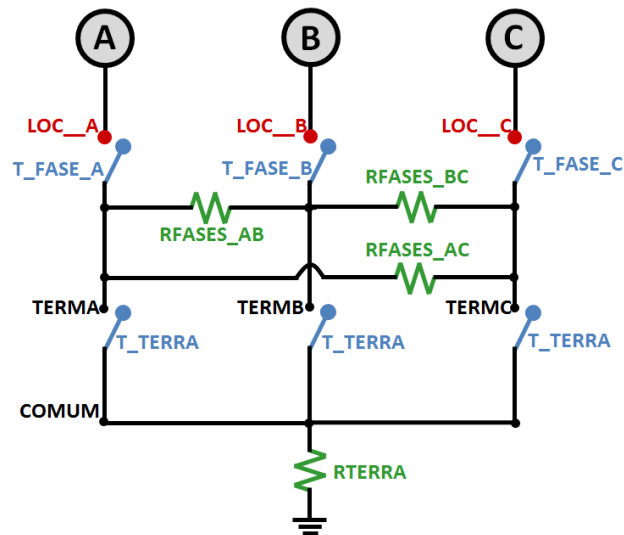


Figura 4.3 - Modelo para simulação de faltas.
(Fonte: FELIPE V. LOPES, 2014)

Conforme se vê, o modelo utiliza chaves e resistores, que permitem a simulação de todos os tipos de falta, inclusive considerando resistências de falta e ângulos de incidência. Assim, o instante de tempo no qual cada chave envolvida com a falta é fechada concorda com o ângulo de incidência escolhido, tendo como referência a fase A. Ou seja, se as chaves forem fechadas no instante em que o ângulo de fase da tensão na fase A for 90° , diz-se que o ângulo de falta é 90° . Para as fases não envolvidas, atribui-se o instante de fechamento superior ao tempo de simulação. Neste caso, as chaves permanecem abertas durante a execução do programa. A resistência de falta é definida pelas resistências RFASES_AB, RFASES_BC, RFASES_AC e RTERRA e os nós LOC_A, LOC_B e LOC_C determinam o local de ocorrência da falta (FELIPE V. LOPES, 2014).

Construção da Base de Dados

Nesta caso, foi aplicada a metodologia proposta por COSTA *et al* (2015) para gerar de forma automatizada, arquivos de dados correspondentes aos diversos cenários de falta, os quais contêm informações dos sinais analógicos e digitais durante o período simulado. O algoritmo com seu correspondente fluxograma são apresentados na Figura 4.4. Ao final desta etapa, são gerados os registros oscilográficos de tensão e corrente correspondentes às faltas geradas, nos formatos *.txt* ou *.atp*.

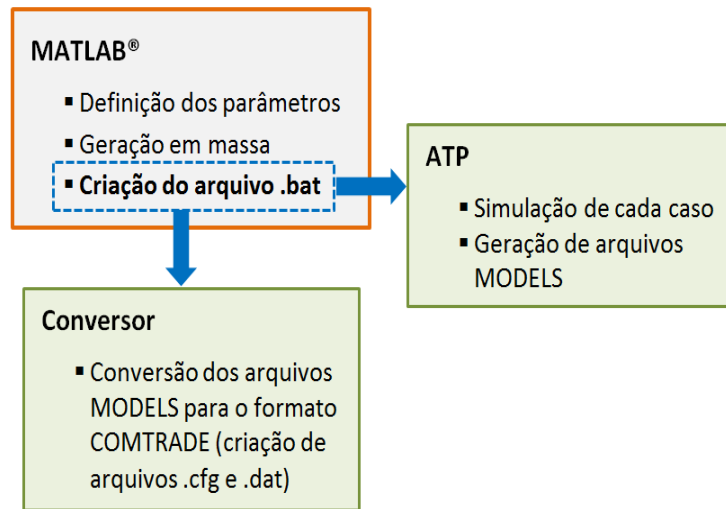


Figura 4.4. Processo de Contrução da Base de Dados.

Para avaliar o desempenho da proteção de distância do ADDEP, as informações geradas pelo *software* foram comparadas com as contidas nos registros simulados via ATP. No estudo foram consideradas:

- As informações apresentadas na Tabela 4.3.
- Simulações das faltas nas primeira e segunda zonas de proteção.
- Análise das atuações das características mho polarizada, mho autopolarizada e quadrilateral.
- Atuações corretas na primeira e segunda zona de proteção.

Tabela 4.3 - Características das faltas simuladas.

Parâmetros da Simulação	Valores
Localização de Falta (km)	25, 50, 75, 100, 125 e 150
Resistência de Falta (Ω)	1, 20 e 50
Ângulo de Incidência da Falta ($^\circ$)	0, 30 e 90
Tipo de Falta	AT, BT, CT, AB, BC,CA, ABT, BCT, CAT e ABC

Nos gráficos seguintes, apresentam-se as atuações para cada tipo de falta analisada pelo ADDEP, junto com uma análise estatística do seu desempenho. Essa análise foi feita a partir do conjunto de arquivos txt gerados durante a simulação da base de dados. Cada um desses arquivos indica a zona de atuação do software ADDEP para cada característica mho ,quadrilateral e para cada tipo de falta nos diversos cenários anteriormente descritos. De modo geral podemos dizer que a característica quadrilateral teve um desempenho satisfatório para faltas trifásicas, o que se deve ao limite resistivo desta , que de acordo com a sua configuração, permite a atuação em primeira zona, mesmo para elevada impedância de falta. Já para faltas bifásicas para valores altos de

resistência a característica mho, em muitos casos, ultrapassou os limites da segunda zona, configurando uma atuação fora da área de proteção determinada. Para faltas monofásicas e resistência de falta baixa (20Ω), a atuação das características mho foram satisfatórias, atuando em segunda zona como o esperado, assim como a quadrilateral. Com relação aos erros identificados no ADDEP, aconteceram devido ao software ainda não possuir uma implementação satisfatória para sua atuação em zonas que ultrapassem os limites da zona 2.

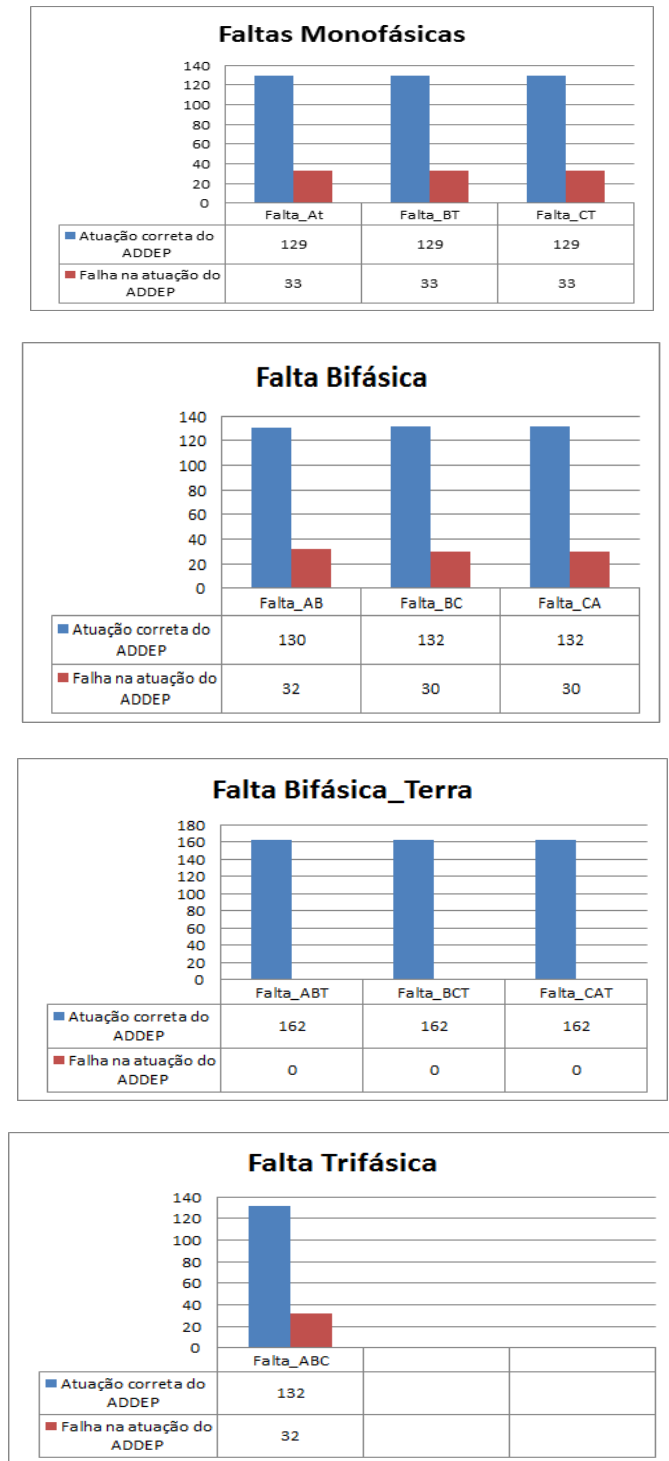


Figura 4.5 - Desempenho do ADDEP.

Dentre os cenários avaliados, são apresentados os resultados das atuações nas características implementadas para três tipos de falta, tomando como referência para análise, os valores de resistência. Os pontos A, B e C designam os valores de resistência de $1\ \Omega$, $20\ \Omega$ e $50\ \Omega$, respectivamente.

- **Falta AT (Figura 4.6)**

Característica mho: considerando resistência de falta de $50\ \Omega$ (ponto C), a impedância vista pelo relé em função das características mho autopolarizada e polarizada ultrapassaram os limites da segunda zona. Com valores de resistência de falta de $1\ \Omega$, para os mesmos valores de ângulo de incidência, a atuação das características mho auto-polarizada e polarizada se deu em primeira zona. Para as distâncias de falta de 100 km a 150 km, observou-se atuação das características auto-polarizada e polarizada em segunda zona.

Característica quadrilateral: em todos os casos ela atuou em primeira zona, como era de se esperar, isso se deve ao limite resistivo cobrir uma área maior.

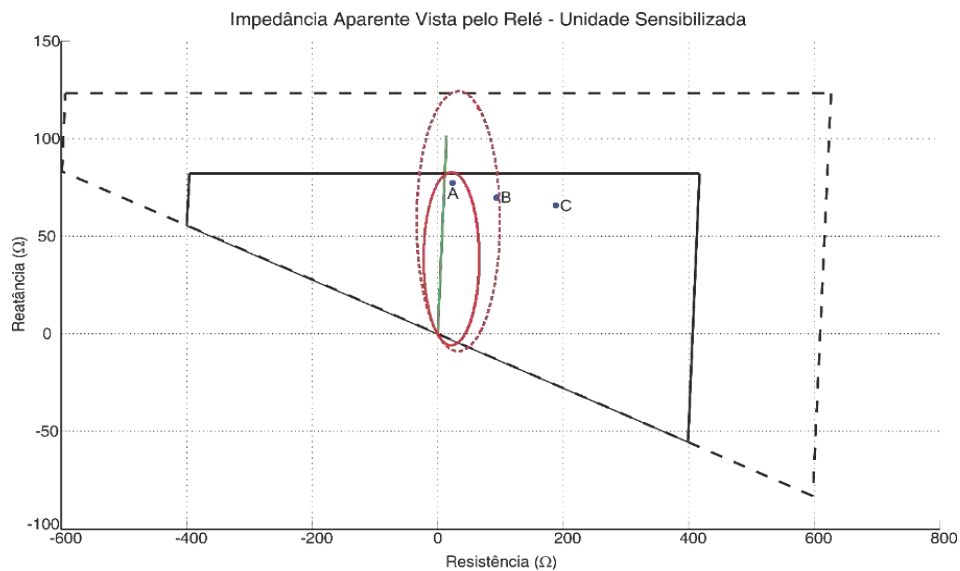


Figura 4.6 - Impedância aparente vista pelo relé em uma falta AT.

- **Falta AB (Figura 4.7)**

Característica mho: considerando resistência de falta de $1\ \Omega$ e para todos os valores do ângulo de incidência simulados, a atuação das características mho auto-polarizada e polarizada foi em primeira zona. Para valores de impedância elevada ($50\ \Omega$, ponto C), as características mho auto-polarizada e polarizada ultrapassaram os limites da segunda zona.

Característica quadrilateral: atuou na primeira zona para valores de resistência de falta de $20\ \Omega$ (ponto B). Para valores de impedância de $50\ \Omega$, ultrapassou a segunda zona.

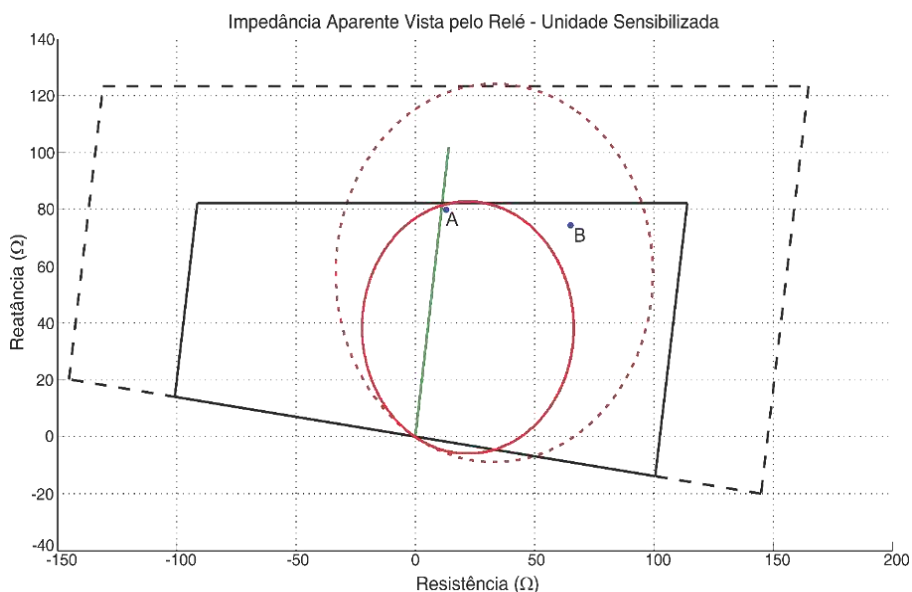


Figura 4.7 - Impedância aparente vista pelo relé em uma falta AB.

- **Falta ABC (Figura 4.8)**

Característica mho: para resistências de falta diferentes de 1Ω (ponto A), observou-se atuação em primeira zona. Com resistência de falta de 50Ω (ponto B), a atuação ultrapassou o limite de segunda zona. Contudo, para faltas aplicadas a uma distância de 75 km, com ângulo de incidência e resistência variadas, sua atuação se restringiu à zona 1.

Característica quadrilateral: em ambos os casos, atuou em primeira zona. Isso se deve ao limite resistivo da característica, que de acordo com sua configuração, permite a atuação em primeira zona, mesmo para impedância de falta elevada.

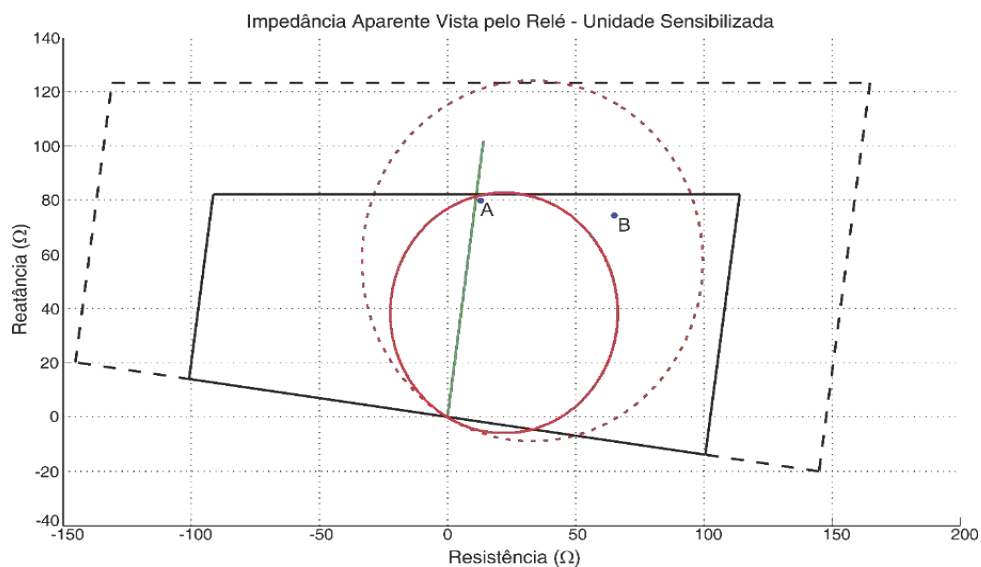


Figura 4.8 - Impedância aparente vista pelo relé em uma falta ABC.

5.0 Conclusão

Ao final deste Trabalho de Conclusão de Curso, pôde-se constatar o grande potencial do *software* ADDEP e principalmente, a sua aplicabilidade em estudos de proteção de sistemas elétricos de potência. É importante destacar também, a importância da metodologia de construção de bases de dados que permite a geração dos mais diversos cenários de faltas.

Em relação ao desempenho do ADDEP, observou-se que ele apresentou resultados muito satisfatórios, com melhor atuação da característica quadrilateral quando foram considerados valores de resistência maiores. Com relação aos insucessos de atuação do ADDEP pudemos verificar que eles aconteceram principalmente nas características mho para valores de resistência altos, isso aconteceu devido ao fato do ADDEP não atuar para valores de impedância de falta elevados que ultrapassem o limite da zona 2.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se o desenvolvimento de uma metodologia para geração automática dos registros oscilográficos provenientes de faltas em linhas de transmissão de energia elétrica, de modo genérico.

6.0 Referências Bibliográficas

ADU, T. An accurate fault classification technique for power system monitoring devices. IEEE Transactions on Power Delivery, Piscataway, v. 17, n. 3, p. 684 – 690, 2002.

ANDERSON, P. M. *Power system protection*. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Press Series on Power Engineering, 1999.

BENMOUYAL, G. *Removal of dc-offset in current waveforms using digital mimic filtering*. IEEE Transaction on Power Delivery, v. 10, n. 2, p. 621–630, Apr 1995.

CAMINHA, A. C. *Introdução à proteção dos sistemas elétricos*. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 211p.

COSTA, C. A. B. *Utilização de software para diagnóstico de distúrbios no sistema Chesf a partir da análise de registros reais*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

COTOSCK, K. R. *Proteção de sistemas elétricos – Uma abordagem técnico-pedagógica*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

POWER SYSTEM RELAY COMMITTEE WORKING GROUP. *Application of overreaching distance relay*, 2009. Disponível em: <http://www.pes-psrc.org/>.

DELGADO, M. *Proteção das redes elétricas de distribuição, transporte e interligação*. 1ª edição ed. 2011, ISBN:978-972-8953-86-7.

DISTRIBUIÇÃO, EDP. *Manual de ligações à rede elétrica do serviço pública, guia técnico e logístico de boas práticas*. 2011, Disponível em: <http://www.edpdistribuicao.pt>=>página infoCenter=>destaques 2011=>Notícias.

DONG-GYU, L., K. SANG-HEE & SOON-RYUL, N. *New modified Fourier algorithm to eliminate the effect of the DC offset on phasor estimation using DFT*. In Transmission and Distribution Conference and Exposition. 2008.

D4, Power System Relay Committee Working Group, *Application of overreaching distance relay*, 2004: Disponível em: <http://www.pes-psrc.org/>

FELIPE V. LOPES, FRANCISCO C. SOUZA JR., WELLINSÍLVIO C. SANTO, JAMILE P. NASCIMENTO, CECÍLIA. B. COSTA*, FLÁVIO B. COSTA, WASHINGTON L. A. NEVES, BENEMAR A. SOUZA*, NÚBIA S. D. BRITO, DAMÁSIO FERNANDES JR., SÉRGIO R. D. MORAES. (2014). *Uma Metodologia Baseada nos Programas ATP E CAPE para Estudo e Validação de Funções de Proteção*. Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática (CBA 2014).

GUERRA, F. C. F. *Notas de Aula*. DEE/CEEI/UFCG, 2011.

GIGUER, S. *Proteção de Sistemas de Distribuição*. Editora Sagra. 1ª edição, 1988.

HEDDING, R. A. *CCVT transient fundamentals*. In Protective Relay Engineers, 2012 65th Annual Conference. 2012.

COMTRADE. *IEEE Standard Common Format for Transient Data exchange for Power Systems*. IEEE PES (C37.111-1991), Oct. 1991.

KENNEDY, W. O., GRUELL, B. J., SHIH, C. H., et. al., “*Five years experience with a new method of a field testing cross and quadrature polarized MHO relays: Part 1 – Results and observations*”. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, Nº. 3, julho de 1988.

KINDERMANN, G. *Proteção de sistemas elétricos de potência*. Florianópolis-SC, Brasil, 1999.

LOPES, F. V. *Localização de faltas em linhas de transmissão baseada em ondas viajantes*. 2011. 76 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

MACHADO, T. M., CARDOSO, G., STEFANELLO, N., MORAIS, A. P. & MARIOTTO, L. *Análise da resposta em regime transitório e permanente de algoritmos para filtragem digital utilizados em relés numéricos: velocidade de convergência, overshoot e sensibilidade em relação a constante de tempo*. Revista SBA Controle & Automação, fevereiro de 2011.

MAMEDE, J. F.; Daniel R., *Proteção de sistemas elétricos de potência*. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MARTTILA, R. J. *Performance of distance relay MHO elements on MOV protected Series-compensated transmission lines*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, Nº. 3, Julho de 1992, pp. 1167 – 1178.

ONS. Submódulo 2.6: Requisitos Mínimos dos Sistemas de Proteção e de Telecomunicações. Brasília, Julho 2008.

PAITHANKAR, Y. G. & BHIDE, S. R. *Fundamentals of power system protection*. New Delhi, India: Prentice-Hall, 2007.

PEREZ, S. G. A. *Modeling relay for power system protection studies*. In Engenharia Elétrica 2006, Universidade de Saskatchewan: Saskatoon, Saskatchewan, Canada. p.319.

SILVA, K. M. *Estimação de fasores baseada na transformada wavelet para uso na proteção de distância de linhas de transmissão*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

SIQUEIRA, M. D. C. *Desempenho da proteção de distância sob diferentes formas de polarização*, 2007, Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro.

ZIEGLER, G. *Numerical distance protection: principles and applications*. Berlin, Germany: Siemens, AG, 2006.

ZOCHOLL, S.E. *Three-phase Circuit Analysis and the Mysterious K0 Factor*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, Washington USA, 1995.