



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

Cecília Alves Buriti da Costa

Avaliação do desempenho do *software* ADDEP

Campina Grande, Paraíba

Agosto de 2014

Cecília Alves Buriti da Costa

## Avaliação do desempenho do *software* ADDEP

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.*

Área de Concentração: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Orientadora:

Professora Núbia Silva Dantas Brito, D. Sc.

Campina Grande, Paraíba

Agosto de 2014

Cecília Alves Buriti da Costa

## Avaliação do desempenho do *software* ADDEP

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.*

Área de Concentração: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Aprovado em: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

---

**Professor Convidado**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

---

**Professora Núbia Silva Dantas Brito, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientadora, UFCG

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Elizabeth e Ricardo, por investir em minha educação e ajudar na realização desse sonho, e ao meu irmão Rodrigo pelos ensinamentos que me passou.

A Rodolfo, companheiro dessa jornada, por sempre estar ao meu lado, incentivando e acreditando em mim, me fazendo querer melhorar sempre.

À professora Núbia, minha orientadora, pela confiança e oportunidade de trabalhar com ela.

Aos meus amigos de longa data, pela paciência e compreensão.

Aos amigos que fiz ao longo do curso, pela ajuda dentro e fora da universidade, compartilhando os problemas e as alegrias da vida acadêmica.

Aos colegas do LARCA, cujo auxílio foi indispensável para a realização deste trabalho.

A Chesf, em especial o engenheiro Sérgio Ricardo, por disponibilizar os dados necessários para a realização desse trabalho.

A todos os professores e funcionários desta universidade que contribuíram na minha formação acadêmica.

# Sumário

Lista de Figuras .....	vi
Lista de Tabelas.....	viii
1. Introdução.....	1
2. Fundamentação Teórica .....	3
2.1. Relé de Distância.....	6
2.2.1. Diagrama $R-X$ .....	6
2.2.2. Zonas de Proteção de Distância .....	7
2.2.4. Características de Operação .....	9
3. O <i>Software</i> ADDEP.....	11
3.1. Leitura das Oscilografias .....	12
3.2. Estimação dos Fasores .....	13
3.3.1. Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo mais Filtro Mímico Digital.....	13
3.3. Detecção da Falta .....	16
3.4. Classificação da Falta .....	17
3.5. Desempenho da Proteção .....	19
3.5.1. Atuação da Proteção .....	19
3.5.2. Informações Adicionais .....	22
3.6. Comparação dos Resultados .....	23
4. Estudo de Caso.....	24
4.1. LT 04S3 PAF-CCD.....	24
4.2. LT 04F1GNN-MRD .....	28
5. Conclusões .....	31
6. Referências Bibliográficas.....	32

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Diagrama esquemático de um sistema de proteção .....	4
Figura 2.2 – Diagrama $R-X$ .....	6
Figura 2.3 – Três tipos de características de operação de relés de distância.....	7
Figura 2.4 – Representação da primeira e segunda zona de proteção de distância. ....	8
Figura 2.5 – Representação das zonas de proteção de distância em um diagrama $R-X$ envolvendo duas linhas de transmissão (AB e BC).....	8
Figura 2.6 – Característica quadrilateral.....	10
Figura 3.1 – Procedimentos adotados após uma ocorrência.....	12
Figura 3.2 – Diagrama de blocos do ADDEP. ....	12
Figura 3.3 – Resposta em frequência do filtro de Fourier de 1 ciclo. ....	14
Figura 3.4 – Comparação de sinal com e sem aplicação do filtro mímico.....	16
Figura 3.5 – Detecção de distúrbios baseada na identificação de desbalanceamentos...	18
Figura 3.6 – Classificação de falta pelo método de sobrecorrente. ....	19
Figura 3.7 – Informações adicionais obtidas com o comparador de fase.....	23
Figura 4.1 – Registro oscilográfico da ocorrência na linha 04S3.....	24
Figura 4.2 – Impedância aparente vista pelo relé. ....	25
Figura 4.3 – Instantes de detecção de falta, atuação da proteção e abertura do disjuntor. ....	25
Figura 4.4 – Trecho do RADP indicando a atuação da proteção em primeira zona e tempo de abertura do disjuntor. ....	26
Figura 4.5 – Comparador cosseno utilizado para localização de falta. ....	26
Figura 4.6 – Trecho retirado do RADP indicando a localização da falta. ....	26
Figura 4.7 – Trecho do RADP com a classificação da falta.....	27
Figura 4.8 – Classificação de falta exibida no documento gerado pelo ADDEP.....	27
Figura 4.9 - Registro oscilográfico da ocorrência na linha 04F1. ....	28

Figura 4.10 – Impedância aparente vista pelo relé. ....	29
Figura 4.11 – Atuação da proteção e instante de abertura do disjuntor de acordo com o RADP. ....	29
Figura 4.12 – Evolução da falta observada pelo ADDEP. ....	29

# Lista de Tabelas

Tabela I – Classificação de Faltas pelo método de Sobrecorrente .....	18
Tabela II - Fasores de operação e polarização para o elemento reativo .....	20
Tabela III - Fasores de operação e polarização para os elementos resistivos.....	21
Tabela IV - Fasores de operação e polarização para o elemento direcional.....	21
Tabela V – Comparação entre os resultados obtidos para a linha 04S3 PAF-CCD.....	28
Tabela VII – Resultados obtidos para a linha 04F1 GNN-MRD .....	30

# 1. Introdução

A criação do novo modelo do setor elétrico aliada aos novos padrões de exigência dos consumidores, que passaram a solicitar eficiência do sistema e qualidade do serviço prestado, obrigou as empresas de energia elétrica a se reestruturarem. Conforme Artigo 22 do Código de Defesa do Consumidor (BRASIL, 1990), as empresas de energia elétrica são obrigadas a fornecer serviços adequados, eficientes, seguros e quanto aos essenciais, contínuos.

Dentre esses parâmetros, a continuidade de serviço é considerada como sendo da maior relevância, visto que afeta o cotidiano das pessoas e causa grandes transtornos por comprometer serviços essenciais ao consumidor. Em termos do sistema elétrico, esse parâmetro está diretamente relacionado com a qualidade do seu Sistema de Proteção, que é definido como sendo o conjunto de equipamentos e acessórios destinados a realizar a proteção para curtos-circuitos (comumente denominados de faltas) e para outras condições de operação anormais em componentes de um sistema de energia elétrica (ONS, 2008).

O desempenho das empresas quanto à continuidade do serviço prestado de energia elétrica é avaliado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com base em indicadores coletivos e individuais. Caso a empresa viole os limites estabelecidos pela ANEEL para esses indicadores, ela será penalizada com a aplicação de multas.

Neste cenário, as empresas responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica necessitam de mecanismos que aperfeiçoem as análises das perturbações que ocorrem no sistema. Com isso, os investimentos na área de diagnóstico de perturbações vêm crescendo, estimulando tanto o ambiente empresarial quanto acadêmico.

Diante desse novo cenário, a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf) em parceria com a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) estão desenvolvendo um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) que tem como objetivo desenvolver um aplicativo de diagnóstico automático de perturbação e análise de desempenho de sistemas de controle e proteção, denominado ADDEP, com objetivo de facilitar as atividades dos profissionais da Divisão de Sistemas de Proteção e Regulação.

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) integra esse Projeto de P&D e tem como objetivos descrever o *software* que está sendo desenvolvido, denominado de ADDEP. Um resumo de cada uma de suas etapas, desde a leitura das oscilografias até a verificação do desempenho da proteção é descrito neste relatório.

## 2. Fundamentação Teórica

O princípio de funcionamento dos sistemas de proteção baseia-se nos conceitos da **filosofia da proteção**, que é o nome que se dá a todas as ações pertinentes ao sistema de proteção, 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).

No contexto da filosofia da proteção, os requisitos necessários para a operação dos sistemas elétricos exigidos pelos órgãos reguladores são (GUERRA, 2011):

- **Continuidade do serviço:** corresponde ao grau de disponibilidade de energia elétrica ao consumidor. Mediante limites para os indicadores coletivos de duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC) e frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC), a ANEEL verifica se os índices estão em limites aceitáveis. Se a concessionária não cumprir os limites, recebe uma multa.
- **Eficiência Energética:** a expressão eficiência energética refere-se às técnicas e procedimentos que visam reduzir perdas e eliminar desperdícios, sem comprometer conforto e produção.
- **Qualidade da Energia:** a expressão qualidade de energia refere-se a um conjunto de alterações de tensão, corrente ou frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos, da geração ao uso final.

De modo a atender tais requisitos, a filosofia da proteção visa alcançar os seguintes objetivos (GUERRA, 2011 e SILVA, 2009):

- **Confiabilidade:** o sistema de proteção sempre deve atuar em caso de defeito e apenas neste caso.
- **Sensibilidade:** a faixa de incerteza entre as condições de operação e de não operação deve ser a menor possível.
- **Velocidade:** o sistema de proteção deve atuar da forma mais rápida possível, de modo a evitar danos aos componentes da rede elétrica (efeitos térmicos e eletrodinâmicos) ou perda de estabilidade do sistema.

- **Seletividade:** o defeito deve ser eliminado desligando-se a menor parte possível da rede, de modo a ser mantido o índice máximo de continuidade de serviço.
- **Economia:** o custo do sistema de proteção deve ser compatível com o custo do equipamento protegido e com a importância deste último em relação ao funcionamento do resto do sistema.
- **Coordenação:** o sistema de proteção deve ser corretamente ajustado a fim de se obter seletividade em sua operação.
- **Simplicidade:** considera-se a utilização mínima de equipamentos e circuitos na execução da proteção.
- **Mantenabilidade:** a manutenção deve ser rápida e precisa, reduzindo-se ao mínimo o seu custo e o tempo durante o qual o sistema fica fora de serviço.

Em termos do sistema elétrico, a **continuidade de serviço** está diretamente relacionada com a **qualidade do seu sistema de proteção** (Figura 2.1), que é definido como sendo o conjunto de equipamentos e acessórios destinados a realizar a proteção para curtos circuitos e para outras condições de operação anormais em componentes de um sistema de energia elétrica (ONS, 2008). Em outras palavras, **o sistema de proteção tem como objetivo salvaguardar os equipamentos e manter a integridade de fornecimento contínuo e econômico da energia elétrica.**

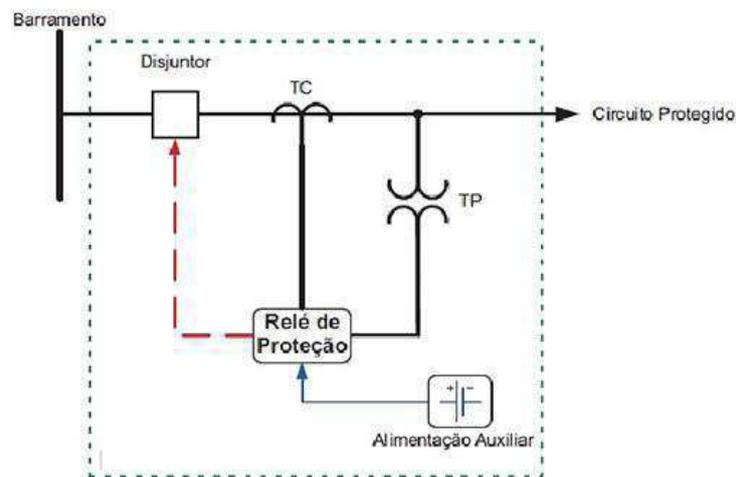


Figura 2.1 - Diagrama esquemático de um sistema de proteção (NETTO, 2008).

O princípio de funcionamento de um sistema de proteção típico pode ser descrito da seguinte forma: os transformadores para instrumentos (transformador de corrente – TC e transformador de potencial – TP) reduzem as amplitudes das grandezas necessárias à

função de proteção (tensão e/ou corrente) para níveis aceitáveis de leitura e acesso seguro. Em seguida, essas informações são disponibilizadas ao relé, que se encarrega de processá-las. Caso os valores das grandezas excedam valores pré-definidos, os contatos do relé são fechados e neste instante, a bobina de abertura do disjuntor, alimentada por uma fonte auxiliar, é energizada abrindo os contatos principais do disjuntor. Uma definição sucinta de cada elemento é apresentada seguir.

- **Disjuntor:** dispositivo de manobra (mecânico) e de proteção capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais do circuito, assim como estabelecer, conduzir por tempo especificado e interromper correntes em condições anormais especificadas do circuito, tais como as de curto-circuito. O comando de abertura desse equipamento é feito pelo relé.
- **Transformador de Corrente:** equipamento destinado a reproduzir a corrente do seu circuito primário de forma proporcional no seu circuito secundário, mantendo a mesma fase. Ele é utilizado para alimentar instrumentos de medição, controle ou proteção em sistemas elétricos, cuja corrente é muito baixa em relação à nominal do sistema. Além disso, também promove a isolação elétrica entre o instrumento e o sistema elétrico.
- **Transformador de Potencial:** equipamento utilizado para alimentar instrumentos de medição, controle ou proteção em sistemas elétricos, além de isolar eletricamente os instrumentos e o sistema. Para isso, ele reduz a tensão da rede até um valor adequado aos instrumentos, mantendo a mesma relação entre os valores instantâneos correspondentes da onda de tensão no lado de alta e de baixa, e fase fixa. Os TP podem ser do tipo capacitivo (TPC) ou indutivo (TPI).
- **Relé:** dispositivo elétrico que tem como objetivo produzir modificações súbitas e predeterminadas em um ou mais circuitos elétricos de saída, quando certas condições são satisfeitas nos circuitos de entrada que controlam os dispositivos. Na prática, existem diferentes tipos de relés de proteção, cada um utilizando parâmetros diferentes para comparação com valores pré-ajustados.

Além desses elementos, também constituem um sistema de proteção os equipamentos de teleproteção, circuitos de alimentação e circuitos de comando e sinalização.

Neste TCC, deu-se foco ao relé de distância, cujas características principais são apresentadas a seguir.

## 2.1. Relé de Distância

O relé de distância, definido pelo número **21** na norma ANSI, tem como objetivo medir a impedância, admitância ou reatância entre o ponto onde se encontra instalado e o ponto de falta ou de carga, tomando como base as grandezas medidas pelos transformadores de instrumento. Ele recebeu esse nome devido à proporcionalidade observada entre a impedância da linha de transmissão e o seu comprimento. Apesar do nome, o relé não vê a distância propriamente dita, mas sim os parâmetros da linha ou sistema. Na prática, esses são os relés mais utilizados na proteção de linhas de transmissão.

### 2.2.1. Diagrama $R$ - $X$

O diagrama  $R$ - $X$  é representado em um plano complexo cujo eixo das abscissas representa a resistência e o eixo das ordenadas, a reatância. Ele permite a representação das características de um relé de distância, como os pontos de operação e os valores de impedância estáticos e dinâmicos calculados no sistema. A impedância aparente  $Z_R$  vista pelo relé é dada pela razão entre os fasores tensão  $\hat{V}_R$  e corrente  $\hat{I}_R$  medidos pelo relé.

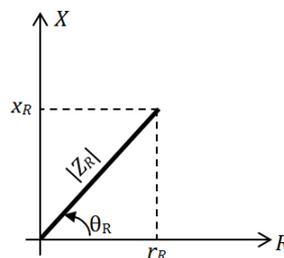


Figura 2.2 – Diagrama  $R$ - $X$ .

Normalmente, a impedância estimada é a de sequência positiva, uma vez que ela é: constante em relação à distância, comum a todos os tipos de falta e não é função da resistividade do solo (SILVA, 2009). A operação do relé depende do posicionamento de  $Z_R$  em relação à sua característica de operação, que se apresenta de diversas formas geométricas no diagrama  $R$ - $X$  (Figura 2.3).

No processo de construção do *software* ADDEP, foram consideradas as características mho e quadrilateral, apresentadas adiante.

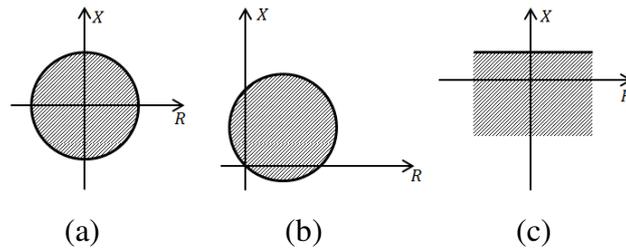


Figura 2.3 – Três tipos de características de operação de relés de distância:

a) impedância; b) mho; c) reatância.

Na Figura 2.3, a área hachurada representa a região de operação do relé. Com o apoio do diagrama  $R$ - $X$ , é possível observar os valores de resistência de falta, bem como quanto de resistência de falta pode ser acomodada para uma dada característica de operação do relé.

### 2.2.2. Zonas de Proteção de Distância

As zonas de proteção correspondem aos limites de atuação de um relé, sendo definidas por diferentes alcances associados a diferentes tempos de atraso.

A **primeira** zona é definida como unidade de subalcançe. Ela deve ser ajustada de forma a não detectar falta externa à linha protegida. Normalmente, a impedância de alcance da primeira zona de proteção corresponde a cerca de 80% ou 85% da impedância da linha protegida, e o seu tempo de atuação é instantâneo. A margem de segurança compreendida entre 20% a 15% se deve às imprecisões provocadas por fontes de erro, como os transformadores para instrumento, que podem tornar o relé sobrealcançado ou subalcançado (SILVA, 2009).

A **segunda** zona de proteção cobre toda a linha protegida pela primeira zona, mais 20% a 50% da menor linha adjacente ao seu terminal remoto. O seu tempo de atuação deve contemplar o tempo de atuação da primeira zona mais lenta das linhas adjacentes mais o tempo de abertura do seu disjuntor, bem como o tempo do esquema para falha de disjuntor do barramento adjacente e uma margem de segurança. Por isso, seu atraso é de 200 a 500 ms em relação à primeira zona.

A **terceira** zona tem como principal função a proteção de retaguarda para faltas ocorridas em linhas adjacentes à linha protegida na primeira zona. Seu alcance, normalmente, é de 100% da menor linha adjacente ao terminal remoto da linha

protegida pela primeira zona, mais 20% da menor linha a sua jusante. O atraso da sua operação é de 800 ms (SILVA, 2009). Alguns fabricantes, porém, utilizam a terceira zona como proteção reversa do terminal do relé, ou seja, o relé irá proteger parte da linha que se encontra "atrás" dele.

Para ilustrar, apresenta-se na Figura 2.4 as duas primeiras zonas de proteção de distância de um sistema de transmissão simples, evidenciando o tempo de atuação e a distância coberta pelo relé. As zonas de proteção também podem ser representadas em um diagrama  $R-X$  da característica de operação do relé. Já na Figura 2.5, ilustra-se um exemplo com três zonas diferentes considerando-se a característica  $mho$  em um sistema de transmissão que contém os barramentos A, B e C.

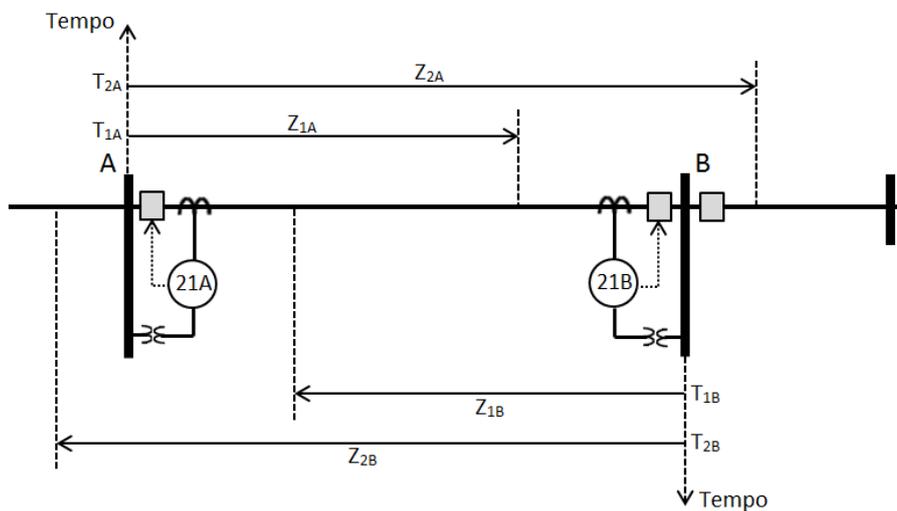


Figura 2.4 – Exemplo de representação da primeira e segunda zona de uma função de proteção de distância.

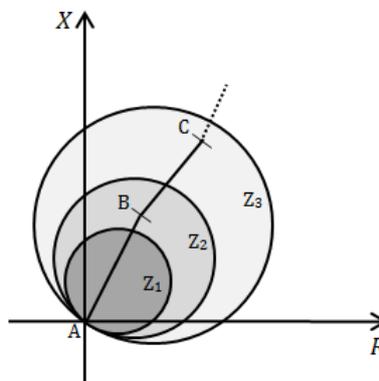


Figura 2.5 – Representação das zonas de proteção de distância em um diagrama  $R-X$  envolvendo duas linhas de transmissão (AB e BC).

## 2.2.4. Características de Operação

Dentre as diferentes características de operação do relé, a mais difundida é a mho (SILVA, 2009).

- **Característica mho**

Essa característica pode ser do tipo autopolarizada ou polarizada. A característica autopolarizada é assim denominada porque a grandeza de polarização utilizada nos comparadores é a própria tensão de entrada do relé. Os valores das tensões de operação  $\hat{V}_{op}$  e de polarização  $\hat{V}_{pol}$  para esse caso são definidos como (PAITHANKAR, BHIDE, 2007):

$$\hat{V}_{op} = -\hat{V}_R + Z_A \hat{I}_R \quad (2.1)$$

$$\hat{V}_{pol} = \hat{V}_R. \quad (2.2)$$

onde  $\hat{V}_R$  e  $\hat{I}_R$  são os fasores de tensão e corrente medidos pelo relé, respectivamente, e  $Z_A$  é a impedância de alcance do relé, calculada por:

$$Z_A = \frac{hZ_{L1}}{\cos(\theta_{L1} - \tau)}, \quad (2.3)$$

sendo  $h$  a porcentagem do comprimento da linha a ser protegida e  $\tau$  o ângulo de projeto da característica mho (ângulo de torque máximo do relé), que geralmente é ajustado para ser igual ao ângulo  $\theta_{L1}$  da linha.

A falta será detectada na zona de proteção caso a diferença entre as fases da tensão de operação e de polarização estiver entre  $-90^\circ$  e  $90^\circ$ .

A característica mho polarizada é utilizada quando a resistência de falta é baixa e o defeito se encontra próximo ao ponto de instalação do relé, o que faz a tensão  $\hat{V}_R$  tender a zero. A tensão de polarização então passa a ser a tensão  $\hat{V}_R$  mais uma parcela de suplementação, que depende do tipo de polarização utilizada: cruzada ou por memória de tensão. O *software* ADDEP baseia-se na polarização por memória de tensão. A tensão memorizada e empregada como sinal de polarização é a tensão pré-falta de sequência positiva.

Ao analisar o sistema Chesf, observou-se que os novos relés digitais inseridos no sistema de proteção não habilitam mais a característica mho, apenas a quadrilateral.

- **Característica Quadrilateral**

Diferentemente da característica mho, que pode ser implementada a partir de um único comparador, a característica quadrilateral tradicionalmente requer quatro comparadores, um para cada lado da característica (ROBERTS *et al.*, 1993). Em relação à mho, ela apresenta a vantagem de ter o alcance resistivo como parâmetro de ajuste, ao invés de ser limitado pelo círculo mho, o que a torna preferível para proteção de linhas curtas. Sua parametrização, por outro lado, é mais complexa.

Para implementação dessa característica, são necessários: um elemento direcional, um elemento de reatância e dois elementos resistivos (*blindings*). Na prática, a unidade direcional é aplicada no processo de detecção de faltas em avanço.

Uma representação dessa característica é mostrada na Figura 2.6. A unidade que determina o alcance da impedância é o elemento de reatância  $x$ . A unidade que determina a cobertura resistiva para faltas é o elemento de resistência do lado direito,  $R_{dir}$ . O elemento que limita a cobertura para fluxo de carga reverso é o elemento de resistência do lado esquerdo,  $R_{esq}$ . Os ajustes dessas unidades variam conforme o fabricante do relé.

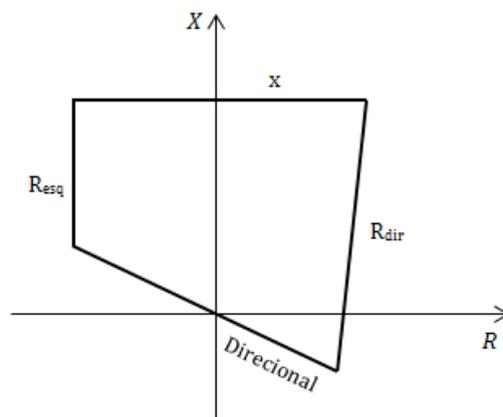


Figura 2.6 – Característica quadrilateral.

### 3. O *Software* ADDEP

Após a desregulamentação do setor elétrico, o desempenho das empresas quanto à continuidade do serviço prestado é avaliado pela ANEEL e atualmente, o ONS vem exigindo cada vez mais uma recomposição em tempo mínimo e de maneira segura após uma falta, de modo a garantir a integridade do sistema elétrico e produto dentro dos padrões de qualidade requerida pelos diversos clientes. Portanto, no cenário atual do setor elétrico brasileiro, as atividades relativas à recomposição dos sistemas elétricos após a ocorrência de uma falta constituem-se em dos principais desafios das equipes de operação, manutenção e análise.

No caso particular do sistema de transmissão de energia Chesf, qualquer perturbação que provoque desligamento de um ou mais equipamentos integrantes das instalações com tensão superior a 69 kV deve ter sua causa analisada pela Divisão de Sistemas de Proteção e Regulação (DOPR) conforme os procedimentos apresentados na Figura 3.1. Conforme se vê:

- A etapa de **coleta de dados** consiste em reunir informações provenientes do histórico de perturbações, dos Relatórios Diários de Ocorrência (RDO), da rede de oscilografia e de qualimetria, e do SAGE (Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia).
- A etapa de **análise** consiste na elaboração de um Relatório de Análise do Desempenho da Proteção (RADP) por meio de diversas ferramentas computacionais.
- Concluindo, tem-se a execução da **tomada de decisão**, que pode ser a emissão de recomendações, o registro em planilha específica de casos especiais ou a comunicação com divisões de manutenção com o objetivo de solucionar os problemas encontrados.

O *software* em desenvolvimento e avaliado nesse TCC será utilizado como suporte no processo de tomada de decisões, contribuindo na redução dos prejuízos financeiros da empresa provenientes do pagamento de multas. Ele disponibilizará *online* e automaticamente, relatórios de diagnósticos e análise do desempenho de dispositivos de controle e proteção envolvidos com uma falta.

O ADDEP está sendo desenvolvido no ambiente Matlab® e ao final, será convertido para a linguagem C#. A versão atual do ADDEP é mostrada na Figura 3.2 e cada etapa é apresentada de forma sucinta, logo em seguida.

<b>1. Coleta de Dados</b>	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
<b>2. Análise</b>	Ferramentas computacionais (oscilografia, dados digitais, e demais informações) Elaboração do RADP (Relatório de Análise do Desempenho da Proteção)
<b>3. Resultados e Ações</b>	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 após uma ocorrência.

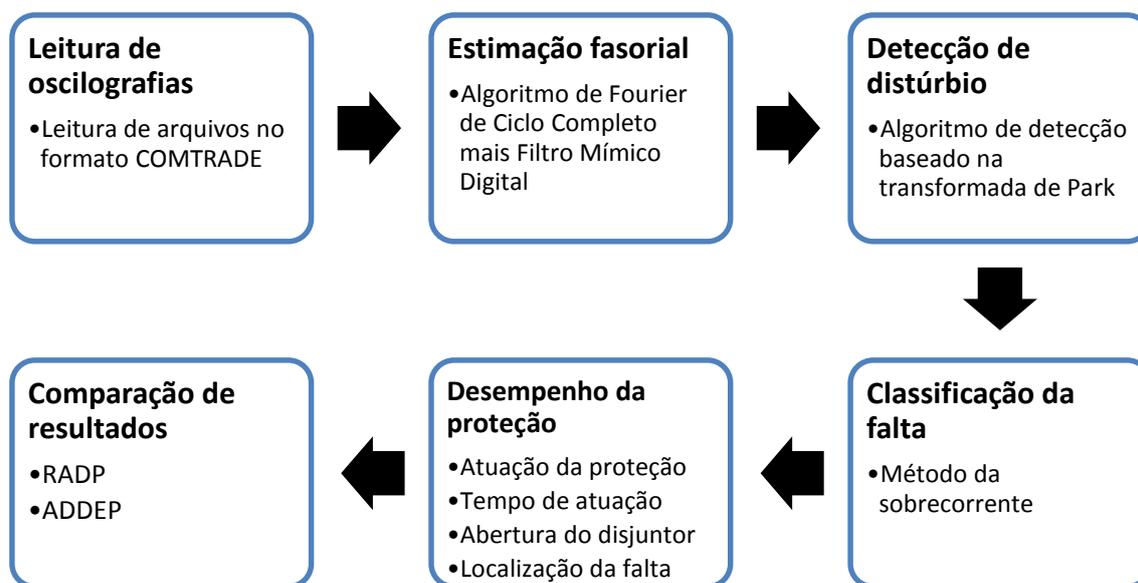


Figura 3.2 – Diagrama de blocos do ADDEP.

### 3.1. Leitura das Oscilografias

Entende-se por oscilografia, ou registro oscilográfico, como o registro das grandezas elétricas analógicas e digitais do sistema de potência armazenado em relés digitais ou

registradores digitais de perturbação (RDP). A rede de oscilografia consiste no conjunto de equipamentos interligados com a função de registrar, transmitir e disponibilizar às equipes de análise as condições do sistema elétricos, principalmente em situações de defeito. Na prática as oscilografias são disponibilizadas no formato COMTRADE.

O *software* ADDEP realiza leitura tanto dos canais analógicos (para obter os registros de tensão e corrente) quanto dos canais digitais (como por exemplo, estado do disjuntor e atuação da proteção de distância).

## **3.2. Estimação dos Fasores**

A estimação fasorial é a representação da magnitude e ângulo de fase dos sinais de tensão e corrente de um sistema, admitindo-se que os valores reais dessas grandezas não sejam conhecidos. Para as aplicações de proteção digital, no cálculo do fasor são utilizados filtros digitais nas amostras do sinal avaliado, para que a estimação seja realizada em relação à componente fundamental.

Além de rejeitar as componentes harmônicas e subharmônicas, o estimador fasorial deve ser imune à influência da componente CC de decaimento exponencial que surge na ocorrência de faltas, visto que tais componentes podem produzir erros e atrasos no processo de estimação fasorial, afetando o desempenho dos relés. Dentre os algoritmos de estimação de fasores conhecidos na literatura, foi escolhido o de Fourier de um ciclo associado a um filtro mímico digital.

### **3.3.1. Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo mais Filtro Mímico Digital**

Análise do estado da arte mostra que a Transformada Discreta de Fourier é o algoritmo mais utilizado para estimar os fasores da componente de frequência fundamental em relés digitais de proteção (MACHADO *et al.*, 2011). Dentre as diferentes formas de janelamento, o filtro de Fourier de ciclo completo, também denominado de Transformada Discreta de Fourier de Ciclo Completo (TDFCC), é o mais aplicado. Esse filtro consiste em extrair a componente de frequência fundamental de um sinal  $x(t)$  a partir do produto de um ciclo de amostras deste sinal com as funções seno e cosseno

(SILVA, 2009). Para uma janela com  $N$  amostras por ciclo,  $(N/2 - 1)$  harmônicas podem ser extraídas (MACHADO *et al.*, 2011). Portanto, as componentes fasoriais podem ser calculas por:

$$Y_s = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \text{sen} \left( k \frac{2\pi}{N} \right) \quad (3.1)$$

$$Y_c = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \text{cos} \left( k \frac{2\pi}{N} \right). \quad (3.2)$$

Sendo a amplitude e a fase do fasor na frequência fundamental calculadas como segue:

$$A_1 = \sqrt{Y_{s1}^2 + Y_{c1}^2} \quad (3.3)$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \left( \frac{Y_{s1}}{Y_{c1}} \right). \quad (3.4)$$

Análise da Figura 3.3, que apresenta a resposta em frequência de um filtro numérico baseado na TDFCC, é possível observar a rejeição precisa dos harmônicos do sinal e a filtragem do sinal de entrada.

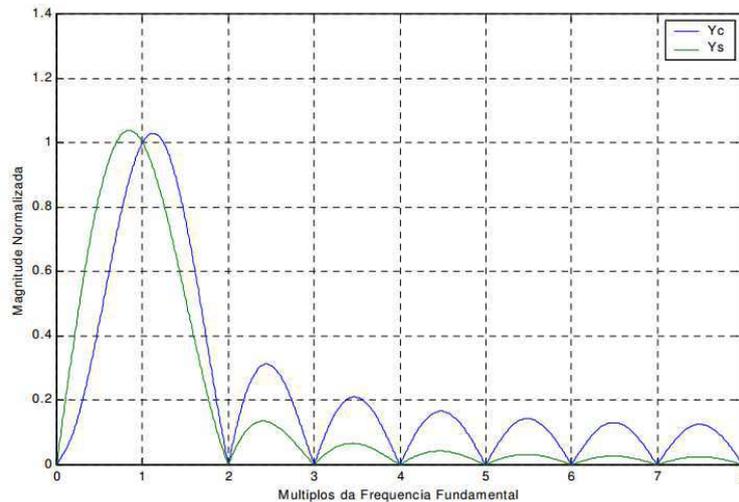


Figura 3.3 – Resposta em frequência do filtro de Fourier de 1 ciclo (SANTOS, 2006).

Para realizar o processo de estimação de fasores, o software ADDEP utiliza um filtro mímico digital, que foi proposto por Benmouyal em 1995. Esse filtro baseia-se no circuito mímico utilizado em relés eletromecânicos e estáticos. Ele remove

completamente a componente CC quando a constante de tempo do sistema é igual a constante de tempo considerada no algoritmo, o que não ocorre normalmente em um sistema de potência real, pois a constante de tempo e a amplitude da componente CC são função da resistência de falta, localização da falta e ângulo de tensão no instante de falta.

Considerando uma impedância escrita no domínio de Laplace na forma (SILVA, 2009):

$$K(1 + s\tau_d), \quad (3.5)$$

e reescrevendo no domínio da transformada Z, tem-se:

$$K[(1 + \tau_d) - \tau_d z^{-1}], \quad (3.6)$$

onde o operador  $s$  da transformada de Laplace foi substituído por  $1 - z^{-1}$ .

O processo de filtragem como filtro mímico pode ser reescrito no domínio do tempo discreto para um sinal de entrada  $x_k$  como:

$$x_k^* = K[(1 + \tau_d)x_k - \tau_d x_{k-1}]. \quad (3.7)$$

Sendo:

$x_k^*$ : amostra do sinal filtrado no instante  $k$ ;

$x_k$  e  $x_{k-1}$ : amostras do sinal original nos instantes  $k$  e  $k - 1$ , respectivamente;

$K$ : ganho do filtro (calculado para ser unitário da frequência fundamental);

$\tau_d$ : constante de tempo de projeto do filtro mímico, dada em número de amostras.

O ganho  $K$  é dado por:

$$K = \frac{1}{\sqrt{\left[ (1 + \tau_d) - \tau_d \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) \right]^2 + \left[ \tau_d \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{N}\right) \right]^2}}. \quad (3.8)$$

Caso o valor de  $\tau_d$  seja igual ao da constante de tempo  $\tau$  do sinal avaliado, a componente CC de decaimento exponencial será completamente eliminada pelo filtro.

A contribuição do filtro mímico pode ser mais bem observada na Figura 3.4, que apresenta o sinal de corrente na fase A durante a ocorrência de uma falta. Conforme se

vê, o sinal da cor verde está associado ao fasor de corrente estimado sem a aplicação do filtro, com muitas oscilações, enquanto que o fasor de corrente estimado e filtrado é mostrado na cor vermelha.

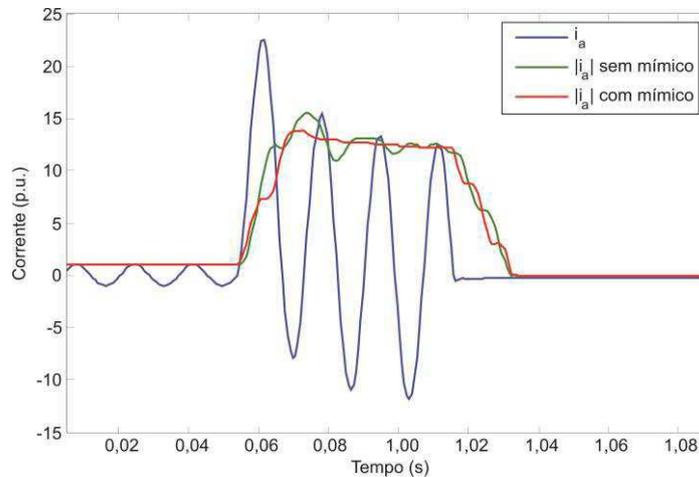


Figura 3.4 – Comparação de sinal com e sem aplicação do filtro mímico.

### 3.3. Detecção da Falta

De um modo geral, a ocorrência de faltas nos sistemas elétricos de potência é resultante de eventos do tipo: desligamentos não programados dos seus componentes, rompimento de condutores, contato com vegetação, etc. Na ocorrência de distúrbios dessa natureza, transitórios eletromagnéticos nos sinais de corrente e tensão do sistema são normalmente gerados.

A detecção de uma falta constitui-se em uma etapa importante no processo de atuação do sistema de proteção, visto que a partir dela, o relé irá enviar o sinal de *trip* para a abertura dos disjuntores. Além disso, os dispositivos de medição e registros dos sinais do sistema só entrarão no modo de gravação, quando alguma anormalidade for detectada, evitando o acúmulo de registros desnecessários.

O *software* ADDEP realiza a detecção via Transformada de Park (Tdq0), método proposto por R. H. Park e associados em 1929. Esse método decompõe as grandezas de armadura de uma máquina síncrona em duas componentes girantes: componente de eixo direto  $d$ , alinhada com o eixo do enrolamento de campo; e componente de eixo em quadratura  $q$ , em quadratura com o eixo do enrolamento de campo. A Tdq0, além de

comumente utilizada no estudo de máquinas elétricas de pólos salientes, tem também aplicação na detecção de distúrbios (LOPES *et al.*, 2011).

Considerando que o sistema referencial das grandezas transformadas gira na frequência da rede em sincronismo com os fasores das fases de um dado sistema trifásico, as grandezas transformadas não identificarão variações de frequência, pois, em regime permanente, a velocidade relativa entre os vetores será nula (LOPES *et al.*, 2011). Na ocorrência de um distúrbio, essa velocidade relativa passa a ser diferente de zero e os sinais gerados apresentam amplitudes não nulas e comportamento oscilatório.

O fasor de eixo direto  $V_d$  deve ser alinhado com umas das fases da tensão. Assim, é obtido um filtro que permite a visualização das componentes de frequência diferentes da frequência nominal da rede de forma que, em regime permanente, os coeficientes  $V_d$  têm amplitudes próximas a zero.

Por esse método de detecção, são calculados coeficientes  $c_{dif}$  proporcionais à diferença entre a amostra atual e imediatamente anterior do fasor de eixo direto  $V_d$ . Essa técnica permite a detecção do instante inicial do transitório, mesmo que o sistema apresente transitórios suaves, com forte amortecimento e com frequências próximas à nominal. Para tornar o monitoramento de transitórios mais robusto nas três fases, é utilizado o coeficiente  $c_{dif}$  elevado ao quadrado.

Um exemplo do processo de detecção de falta é mostrado na Figura 3.5. Conforme se vê, a partir do instante em que a descontinuidade é detectada, o sinal digital muda de estado para indicar a detecção. Considerando o momento em que as correntes são anuladas como o instante de pós-falta, é possível obter o período de duração da falta.

### **3.4. Classificação da Falta**

A classificação de falta no *software* ADDEP é realizada via método de sobrecorrente (ADU, 2002). O método identifica a fase defeituosa utilizando a diferença dos módulos de corrente de cada fase nos instantes de falta e pré-falta. No *software* ADDEP é implementada também a técnica com os fasores na frequência fundamental, conforme segue na Tabela I.

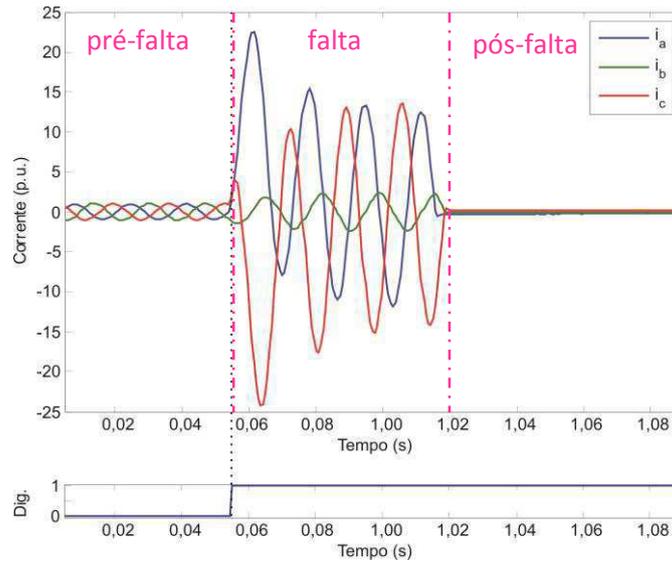


Figura3.5 – Detecção de distúrbios baseada na identificação de desbalanceamentos.

Tabela I – Classificação de faltas pelo método de sobrecorrente.

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

Os valores de  $\Delta I_a$ ,  $\Delta I_b$  e  $\Delta I_c$  são obtidos por meio de:

$$\Delta I_a = |I_a| - THV \quad 3.9$$

$$\Delta I_b = |I_b| - THV \quad 3.10$$

$$\Delta I_c = |I_c| - THV. \quad 3.11$$

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 (3 vezes maior, no caso do ADDEP);

Exemplo do processo de classificação de faltas é mostrado na Figura 3.6. Neste caso, a falta foi do tipo ACT. Conforme se vê, dado um valor limiar, as correntes com valores de amplitude maiores que o limiar, representam uma situação de falta envolvendo as fases correspondentes. As setas destacadas durante o período de falta indicam que o processo de comparação é realizado durante a ocorrência da falta, possibilitando inclusive, a classificação de faltas evolutivas.

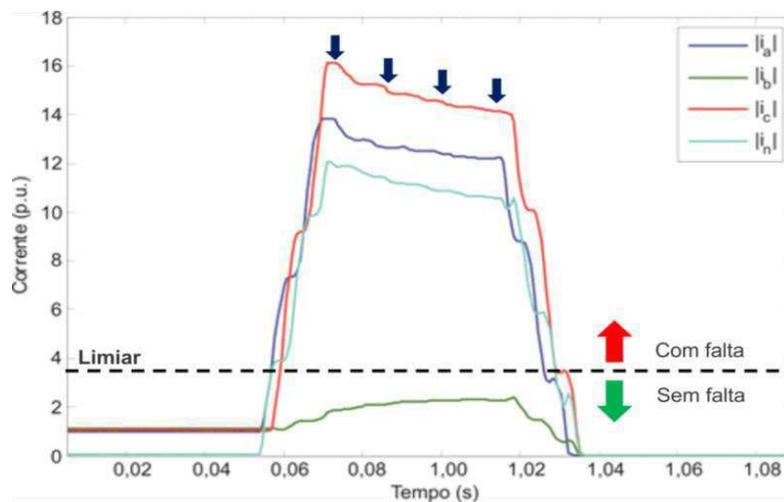


Figura 3.6 – Classificação de falta pelo método de sobrecorrente.

## 3.5. Desempenho da Proteção

A etapa de análise do desempenho da proteção consiste em verificar a correta atuação da proteção e os tempos estimados de abertura do disjuntor em relação à detecção da falta, e em relação à atuação da proteção.

### 3.5.1. Atuação da Proteção

Nos relés de distância, o conceito de comparador de fase e magnitude é utilizado para distinguir entre uma situação normal de operação e uma falta, fazendo o relé atuar ou

não. Conforme se viu, para a característica mho, a proteção irá atuar caso a diferença entre as fases da tensão de operação e de polarização estiver entre  $-90^\circ$  e  $90^\circ$ . Para a característica quadrilateral são necessários quatro comparadores de fase. Neste caso, se observa também, a diferença entre as fases de tensão de operação e polarização.

A implementação dessas características varia de um fabricante para outro. No ADDEP são implementados os comparadores mais comumente utilizados para função de distância (CIMADEVILLA, 2012), os quais são apresentados a seguir.

- **Unidade de reatância**

Os fasores para os elementos de fase e terra são apresentados na Tabela II.

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

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

Sendo:

$I_a, I_b$  e  $I_c$ : correntes de fase;

$I_{a2}, I_{b2}$  e  $I_{c2}$ : correntes de fase de sequência negativa;

$I_{a0}, I_{b0}$  e  $I_{c0}$ : correntes de fase de sequência zero;

$I_{ab}, I_{bc}$  e  $I_{ca}$ : correntes entre fases;

$V_a, V_b$  e  $V_c$ : tensões de fase;

$V_{ab}, V_{bc}$  e  $V_{ca}$ : tensões entre fases;

$Z_{n1}$ : alcance referente à unidade de reatância, que corresponde a um percentual da impedância de sequência positiva da linha referente à primeira zona de proteção.

De modo similar, se faz para as demais zonas de proteção. A atuação ocorre quando a diferença entre as fases de tensão de operação e polarização se encontra entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$ .

- **Unidades resistivas**

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

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

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

Sendo:

$I_{aeq}$ ,  $I_{beq}$  e  $I_{ceq}$ : correntes equivalentes de fase, as quais são dadas em função do fator de compensação de sequência zero;

$RG$  e  $RP$ : alcances resistivos dos elementos de terra e fase, respectivamente, dados em  $\Omega$ /fase.

A atuação ocorre quando a diferença entre as fases de tensão de operação e polarização se encontra entre  $-(180^\circ - \theta_1)$  e  $\theta_1$ , em que  $\theta_1$  é 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 IV.

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

<b>Unidade</b>	<b><math>F_{op}</math></b>	<b><math>F_{pol}</math></b>
<b>AT</b>	$I_a$	$V_a$
<b>BT</b>	$I_b$	$V_b$
<b>CT</b>	$I_c$	$V_c$
<b>AB</b>	$I_{ab}$	$V_{ab}$
<b>BC</b>	$I_{bc}$	$V_{bc}$
<b>CA</b>	$I_{ca}$	$V_{ca}$

Sendo:

$I_a, I_b$  e  $I_c$ : correntes de fase;

$I_{ab}, I_{bc}$  e  $I_{ca}$ : correntes entre fases;

$V_a, V_b$  e  $V_c$ : tensões de fase;

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

A atuação ocorre quando a diferença entre as fases de tensão de operação e polarização se encontra entre  $-(90^\circ + \alpha)$  e  $(90^\circ - \alpha)$ , em que  $\alpha$  é 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.

O fator de compensação residual  $k_0$  é calculado por:

$$k_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \quad 3.12$$

### 3.5.2. Informações Adicionais

Além da atuação da proteção, também é possível obter outras informações importantes, como por exemplo: tempo de atuação do *software* e sua comparação com o tempo real de atuação obtido a partir da leitura do arquivo COMTRADE; tempos estimados de abertura do disjuntor em relação à detecção do distúrbio e em relação à atuação da proteção.

O exemplo ilustrado na Figura 3.7 ilustra a comparação entre o tempo de atuação da proteção pelo ADDEP (intervalo 1) e pelo registro real (intervalo 2), depois da detecção do distúrbio. Os intervalos 3 e 4 apresentam o tempo de abertura do disjuntor em relação à detecção e à atuação da proteção, respectivamente.

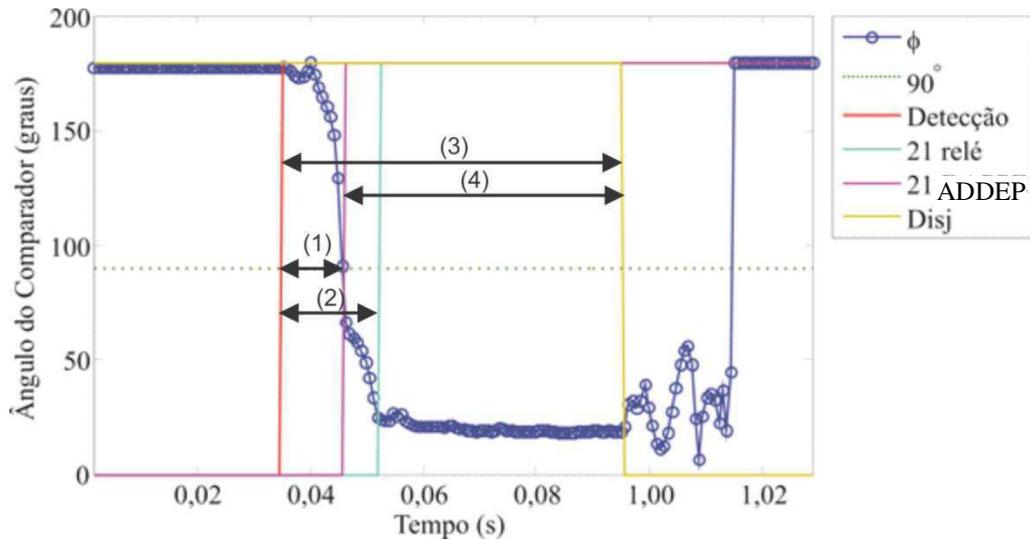


Figura 3.7 – Informações adicionais obtidas com o comparador de fase.

Por fim, na sua versão atual, o ADDEP estima a localização da falta a partir do comparador do tipo cosseno, considerando os valores em regime permanente de falta. Esse comparador apresenta a vantagem de utilizar números reais ao invés de ângulos, o que elimina erros em relação aos quadrantes em que os ângulos estão localizados. A distância da falta medida pelo relé, em p.u., é representada por  $m$  (SILVA *et al*, 2012):

$$m = \frac{\text{Re}[\hat{V}_R \cdot \hat{V}_{pol}^*]}{\text{Re}[Z_{LI} \hat{I}_R \cdot \hat{V}_{pol}^*]} \quad 3.13$$

Quando  $m$  for menor que o alcance da zona de proteção, o relé envia um comando de *trip* para os disjuntores.

### 3.6. Comparação dos Resultados

A partir de um arquivo em .txt gerado pelo ADDEP, é possível obter as principais informações da análise de falta disponibilizadas pelo *software*. Essas informações são comparadas com as contidas em um RADP e ao final, é possível fazer uma análise do desempenho do *software*. Nos Estudos de Caso que se seguem, essa comparação é feita com o intuito de validar o ADDEP.

## 4. Estudo de Caso

Para a validação do ADDEP, realizaram-se dois estudos de caso com registros reais do sistema Chesf a fim de comparar com as informações fornecidas pela DOPR.

### 4.1. LT 04S3 PAF-CCD

O primeiro registro foi proveniente de uma falta que ocorreu na linha de transmissão 04S3, de 230 kV e 134 km de extensão, que interliga as subestações de Paulo Afonso III e Cícero Dantas, nos estados de Alagoas e Bahia, respectivamente. O desarme da linha ocorreu no dia 7 de julho de 2014 devido à descarga atmosférica. O registro oscilográfico é apresentado na Figura 4.1, na qual se observam os sinais de corrente e tensão antes, durante e após a falta.

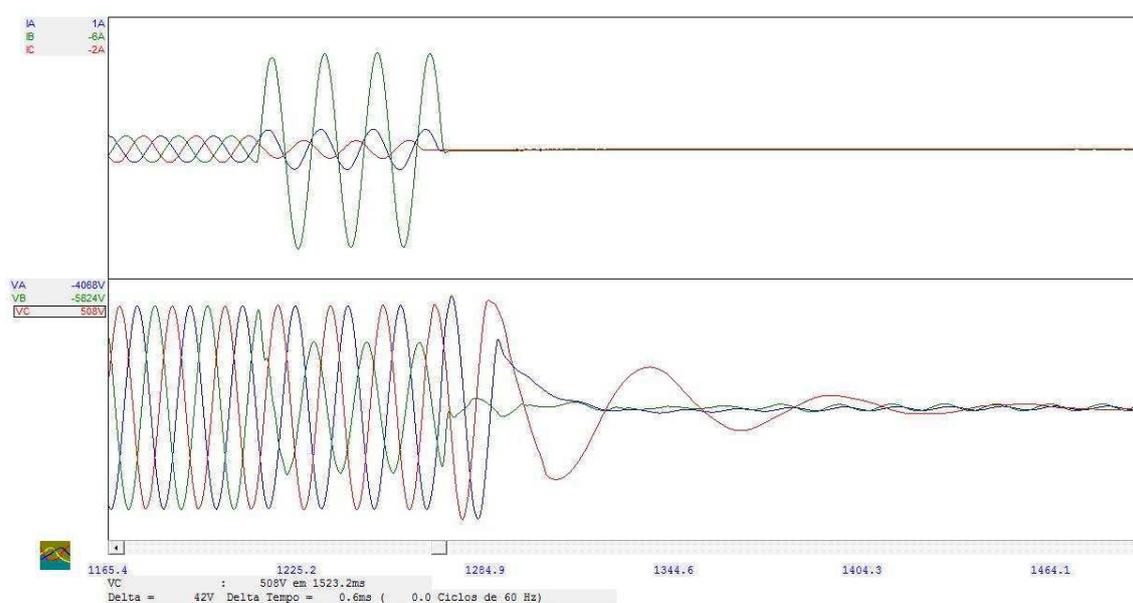


Figura 4.1 – Registro oscilográfico da ocorrência na linha 04S3.

Conforme se vê, a detecção da falta e a atuação da proteção ocorreram em primeira zona, tanto na característica mho, quanto na quadrilateral (Figura 4.2). A curva em azul destaca a trajetória da impedância vista pelo relé.

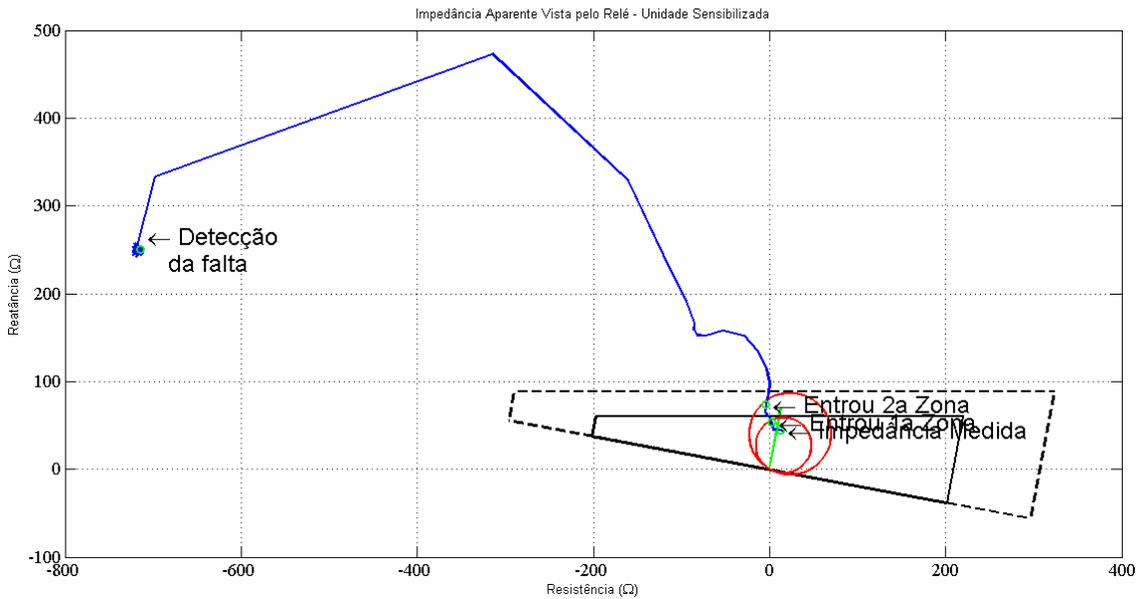


Figura 4.2 – Impedância aparente vista pelo relé.

Comparação dos intervalos de tempo para a atuação da proteção e a abertura do disjuntor lidos no arquivo COMTRADE e obtidos com o ADDEP é mostrado na Figura 4.3. É possível observar que a atuação do ADDEP (linha em rosa) foi mais rápida que a do relé em campo (linha azul clara). Além disso, o *software* indica que o disjuntor abriu em 38,225 ms após o *trip*, enquanto que o RADP informa uma abertura em 58,33 ms, conforme visto na Figura 4.4.

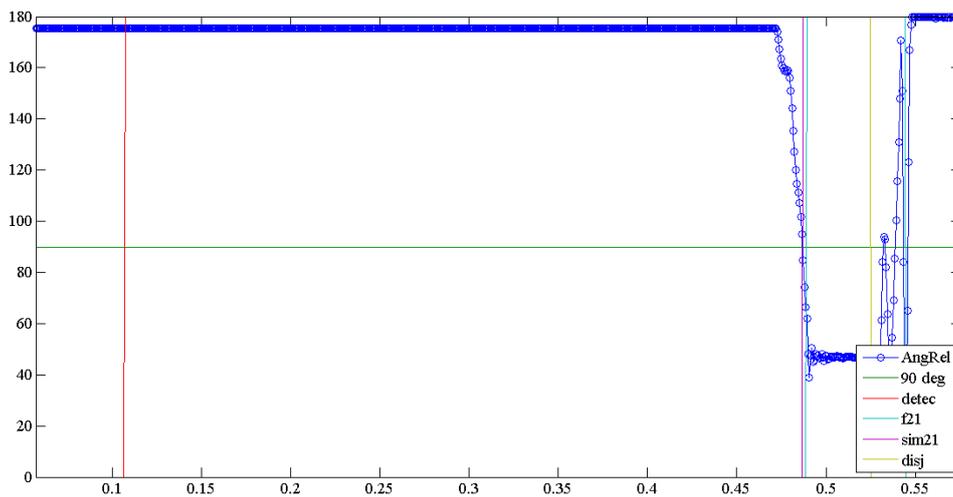


Figura 4.3–Instantes de detecção de falta, atuação da proteção e abertura do disjuntor.

<b>Terminal CCD</b>		
<b>Disjuntores</b>		
<b>CÓDIGO</b>	<b>MODO ABERTURA</b>	
14S3	Solicitação	
<b>Proteções</b>		
<b>FUNÇÃO PROTEÇÃO</b>	<b>TIPO RELÉ</b>	
21-P	P442 (PROT DIST)	
<b>UNIDADE</b>	<b>ATUAÇÃO</b>	<b>CAUSA ATUAÇÃO</b>
21-Z1N - DISTÂNCIA ZONA 1 NEUTRO	Correta	
<hr/>		
<b>FUNÇÃO PROTEÇÃO</b>	<b>TIPO RELÉ</b>	
21-A	P442 (PROT DIST)	
<b>UNIDADE</b>	<b>ATUAÇÃO</b>	<b>CAUSA ATUAÇÃO</b>
21-Z1N - DISTÂNCIA ZONA 1 NEUTRO	Correta	
<hr/>		
<b>Desempenho da Proteção</b>		
Atuação correta das proteções PP/PA, em 1ª zona, abrindo o disjuntor 14S3-CCD em 3,5 ciclos.		

Figura 4.4 – Trecho do RADP indicando a atuação da proteção em primeira zona e tempo de abertura do disjuntor.

Quanto à localização estimada, o documento gerado pelo ADDEP indica 87,62 km (65,49 % da linha), enquanto o RADP informa a localização em 87,76 km. O erro relativo entre os dois resultados é de 0,27 %.

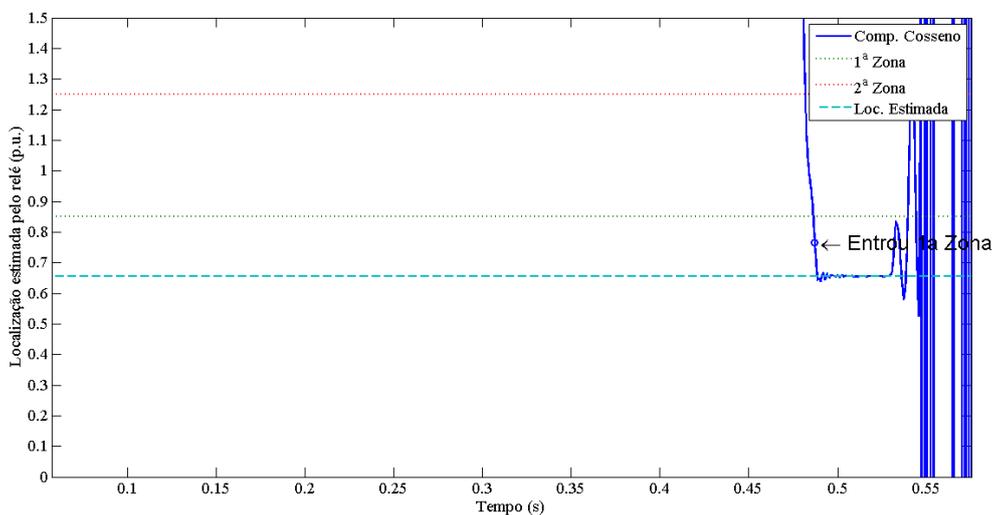


Figura 4.5 – Comparador cosseno utilizado para localização de falta.

**INDICAÇÃO DOS LOCALIZADORES DE DEFEITO**

Sisrep CCD = 87,76 Km (65,6%).

Figura 4.6 – Trecho retirado do RADP indicando a localização da falta.

Em relação à classificação, o relatório da Chesf indicou uma falta monofásica BT. O ADDEP fornece a classificação da falta diretamente no documento gerado (Figura 4.8). Conforme se vê, a falta foi classificada como monofásica BT e não sofreu nenhuma evolução, o que corresponde ao registro real.

1.1. LT 04S3 CICERO DANTAS / PAULO AFONSO III		
SEQUÊNCIA 1	DATA DE RESTABELECIMENTO 07/07/2014 - 05:52	TIPO DESLIGAMENTO Automático
ORIGEM CAUSA Interna	NATUREZA CAUSA Fugitiva	CAUSA DESLIGAMENTO Descarga Atmosférica
FASES ENVOLVIDAS B		NATUREZA ELÉTRICA Fase-Terra

Figura 4.7 – Trecho do RADP com a classificação da falta.

```

-----
CLASSIFICAÇÃO DA FALTA
-----
Evolução da falta:
Ciclo de falta: 1, Tipo: ---
Ciclo de falta: 2, Tipo: ---
Ciclo de falta: 3, Tipo: ---
Ciclo de falta: 4, Tipo: ---
Ciclo de falta: 5, Tipo: ---
Ciclo de falta: 6, Tipo: ---
Ciclo de falta: 7, Tipo: ---
Ciclo de falta: 8, Tipo: ---
Ciclo de falta: 9, Tipo: ---
Ciclo de falta: 10, Tipo: ---
Ciclo de falta: 11, Tipo: ---
Ciclo de falta: 12, Tipo: ---
Ciclo de falta: 13, Tipo: ---
Ciclo de falta: 14, Tipo: ---
Ciclo de falta: 15, Tipo: ---
Ciclo de falta: 16, Tipo: ---
Ciclo de falta: 17, Tipo: ---
Ciclo de falta: 18, Tipo: ---
Ciclo de falta: 19, Tipo: ---
Ciclo de falta: 20, Tipo: ---
Ciclo de falta: 21, Tipo: ---
Ciclo de falta: 22, Tipo: ---
Ciclo de falta: 23, Tipo: BT
Ciclo de falta: 24, Tipo: BT
Ciclo de falta: 25, Tipo: BT

Tipo de falta: BT

```

Figura 4.8 – Classificação de falta exibida no documento gerado pelo ADDEP.

O resultado final da comparação é apresentado na Tabela V. Com base na análise feita, é possível afirmar que o ADDEP obteve um desempenho satisfatório no diagnóstico do distúrbio.

Tabela V – Comparação entre os resultados obtidos para a linha 04S3 PAF-CCD

Dados sobre o distúrbio	RADP	ADDEP
Classificação da falta	BT	BT
Atuação da proteção	1ª zona (quadrilateral)	1ª zona (quadrilateral e mho)
Abertura dos disjuntores	58,33 ms	38,225 ms
Localização da falta	87,76 km	87,62 km

## 4.2. LT 04F1GNN-MRD

O segundo estudo de caso foi feito utilizando um registro proveniente de uma falta que ocorreu na linha de transmissão 04F1, de 230 kV e 50,6 km de extensão, que interliga as subestações de Goianinha e Mussurú II. O desligamento da linha ocorreu no dia 24 de fevereiro de 2012 e foi ocasionado por chuva na região. O registro oscilográfico é apresentado na Figura 4.9, na qual se observam os sinais de corrente e tensão antes, durante e após a falta.

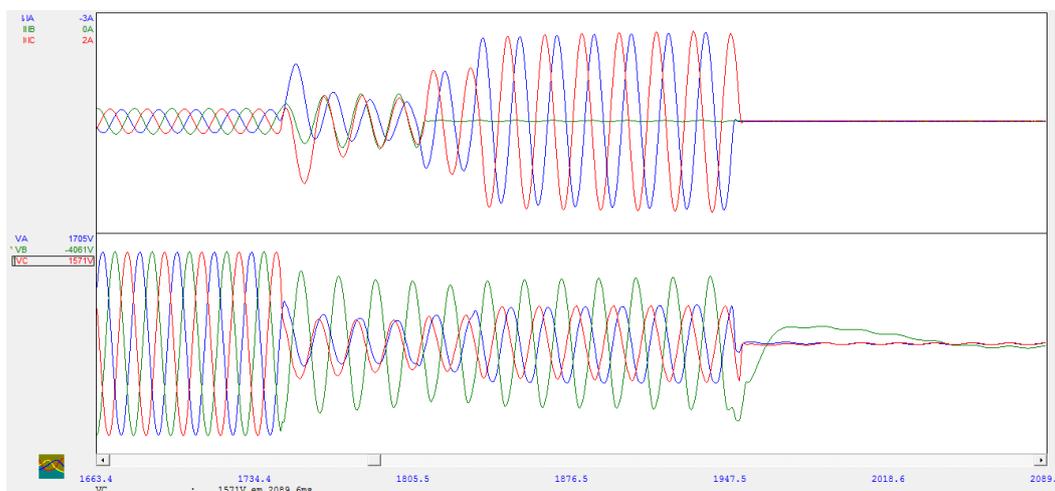


Figura 4.9 - Registro oscilográfico da ocorrência na linha 04F1.

A atuação da proteção em primeira zona tanto na característica mho como na quadrilateral são apresentadas na Figura 4.10. A curva em azul ilustra os valores de impedância aparente vista pelo relé. Na Figura 4.11 é possível observar trecho do RADP que indica a atuação em primeira zona e o tempo de abertura para o disjuntor. Pelo ADDEP, esse tempo obtido foi de 190,43 ms, resultando em um erro de 4,8 %.

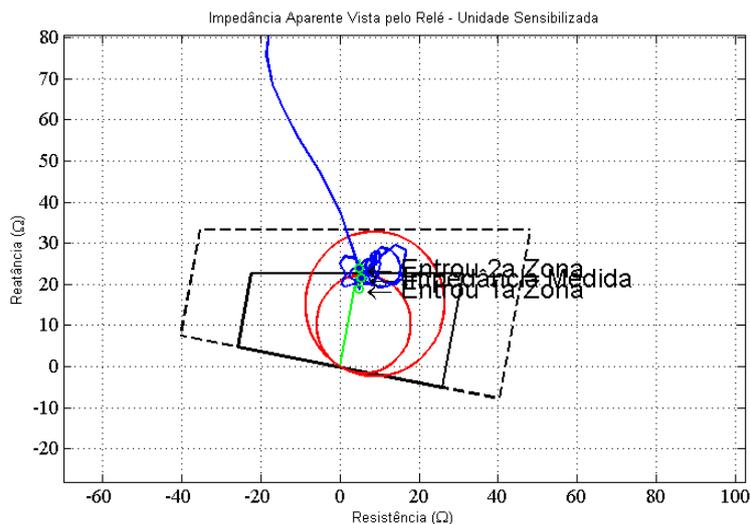


Figura 4.10 – Impedância aparente vista pelo relé.

DESEMPENHO PROTEÇÃO:	
04F1 - GNN: atuação correta da proteção de distância em 1ª zona abrindo o disjuntor em 65ms. MRD: atuação correta da proteção de distância em 1ª zona abrindo o disjuntor em 200ms.	←
04F2 - GNN: atuação correta da proteção de distância em 1ª zona abrindo o disjuntor em 65ms. MRD: atuação correta da proteção de distância em 1ª zona abrindo o disjuntor em 83ms.	

Figura 4.11 – Atuação da proteção e instante de abertura do disjuntor de acordo com o RADP.

Quanto à localização estimada, o documento gerado pelo ADDEP indica 42,37 km, enquanto o RADP informa a localização em 40,56 km. Neste caso, o erro foi de 4,5%. A classificação também foi precisa, indicando, assim como no RADP, uma falta bifásica-terra ACT. Nesse caso, porém, a falta iniciou apenas da fase C, sofrendo uma evolução para ACT (Figura 4.12).

```

-----
CLASSIFICAÇÃO DA FALTA
-----
Evolução da falta:
Ciclo de falta: 1, Tipo: CT
Ciclo de falta: 2, Tipo: ---
Ciclo de falta: 3, Tipo: ---
Ciclo de falta: 4, Tipo: ---
Ciclo de falta: 5, Tipo: CAT
Ciclo de falta: 6, Tipo: CAT
Ciclo de falta: 7, Tipo: CAT
Ciclo de falta: 8, Tipo: CAT
Ciclo de falta: 9, Tipo: CAT
Ciclo de falta: 10, Tipo: CAT
Ciclo de falta: 11, Tipo: CAT
Ciclo de falta: 12, Tipo: CAT
Tipo de falta: CAT

```

Figura 4.12 – Evolução da falta observada pelo ADDEP.

O resultado final da comparação é apresentado na Tabela VI. Com base na análise feita, é possível afirmar que o ADDEP obteve um bom desempenho no diagnóstico do distúrbio.

Tabela VI – Resultados obtidos para a linha 04F1GNN-MRD.

<b>Dados sobre o distúrbio</b>	<b>RADP</b>	<b>ADDEP</b>
<b>Classificação da falta</b>	ACT	ACT
<b>Atuação da proteção</b>	1ª zona	1ª zona
<b>Abertura dos disjuntores</b>	200ms	190,43ms
<b>Localização da falta</b>	40,56 km	42,37 km

## 5. Conclusões

O estudo do *software* ADDEP permitiu aprofundar os conhecimentos em proteção de sistemas elétricos e sua aplicação à eventos reais, mostrou o enorme potencial do *software* que está sendo desenvolvido.

Muitos dos registros provenientes de relés apresentam o arquivo COMTRADE em formato binário. Com a realização desse trabalho, foi possível observar que o *software* não lê tais arquivos, apenas os que estão em formato ASCII. Isso restringe a aplicação do ADDEP. Entretanto, esse problema pode ser contornado por meio de uma rotina que permita a leitura também de arquivos em binário.

Outra dificuldade encontrada foi em relação aos resultados apresentados nos RADP. Seria de grande importância saber como os engenheiros da DOPR realizam as análises dos dados oscilográficos para obter as informações contidas nos relatórios, pois a comparação dessas informações com as obtidas com o ADDEP seria mais bem fundamentada.

Ao final, espera-se que o *software* contemple outras funções de proteção, tornando-o cada vez mais semelhante aos dispositivos de proteção encontrados em campo.

## 6. Referências Bibliográficas

Cimadevilla, R. *Dynamic characteristics in distance protection*. In: Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, 2012.

Lima, M. M. M. *Alguns fatores afetando o desempenho de relés de distância*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

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.

Oliveira, N. L. S. & Souza, B. A. *Análise da resposta no tempo de algoritmos para estimação de fasores utilizados em relés digitais*. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Goiânia, 2012.

Oppenheim, A. V. *Sinais e Sistemas*. 2ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

Roberts, J., Guzman, A., Schweitzer, E. O.  *$Z = v/i$  não faz um relé de distância*. In: Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, 1993.

Santos, L. F. *Avaliação de algoritmos numéricos de proteção para linhas com compensação série*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2006.

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.

Silva, K. M., Silva, C. A., Lopes, F. V., Júnior, D. F., Neves, W. L. A., Coutinho, P. R. L. N., Dantas, K. M., Souza, B. A., Pesente, J. R., Bairy, R. G., Cardoso, L. F., Otto, R. B. *Avaliação do impacto da correção da tensão secundária de transformadores de potencial capacitivos sobre a proteção de distância*. In: Congresso Brasileiro de Automática, Campina Grande, 2012.

<[http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=filtro\\_butterworth&oldid=36262911](http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=filtro_butterworth&oldid=36262911)>. Acesso em: 20 de junho de 2014.