

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PROPOSIÇÃO DE UM MODELO PARA ANÁLISE DE FLUXO DE
CARGA, CURTO-CIRCUITO E SIMULAÇÃO DE RELÉS DE PROTEÇÃO

ENGº ARRHENIUS VINICIUS DA COSTA OLIVEIRA

Orientador: Prof. D. Sc. José Tavares de Oliveira
Co-orientador: Prof. Dr. -Ing. Manoel Firmino de Medeiros Junior

Natal – RN
Dezembro – 2004

**PROPOSIÇÃO DE UM MODELO PARA ANÁLISE DE FLUXO DE
CARGA, CURTO-CIRCUITO E SIMULAÇÃO DE RELÉS DE PROTEÇÃO**

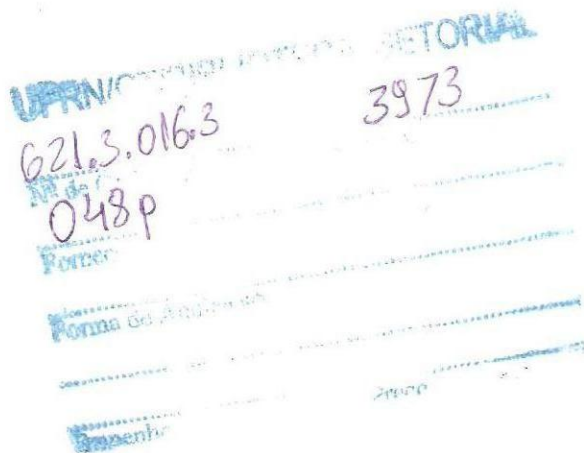
ARRHENIUS VINICIUS DA COSTA OLIVEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. D. Sc. José Tavares de Oliveira

Co-orientador: Prof. Dr. -Ing. Manoel Firmino de Medeiros Júnior

NATAL – RN
Dezembro – 2004



Catálogo da Publicação na Fonte.UFRN / Biblioteca Central
Zila Mamede. Divisão de Serviços Técnicos

Oliveira, Arrhenius Vinicius da Costa.

Proposição de um modelo para análise de fluxo de carga, curto-circuito e simulação de relés de proteção / Arrhenius Vinicius da Costa Oliveira. – Natal, RN, 2004.

xiv, 91 p. : il.

Orientador: José Tavares de Oliveira.

Co-orientador: Manoel Firmino de Medeiros Junior.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

1. Fluxo de carga. 2. Relés de proteção. 3. Curto-circuito. 4. Transitórios eletromagnéticos. 5 ATP. I. Oliveira, José Tavares de. II. Medeiros Junior, Manoel Firmino de. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/UF/BCZM

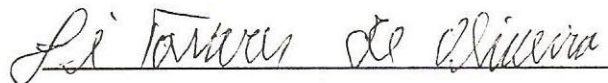
CDU 621.3.016.3

**PROPOSIÇÃO DE UM MODELO PARA ANÁLISE DE FLUXO DE
CARGA, CURTO-CIRCUITO E SIMULAÇÃO DE RELÉS DE PROTEÇÃO**

ARRHENIUS VINICIUS DA COSTA OLIVEIRA

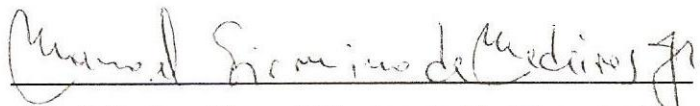
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Defendida e aprovada em 17/12/2004



Prof. D. Sc. José Tavares de Oliveira

- Orientador -



Prof. Dr. Ing. Manoel Firmino de Medeiros Junior

- Co-orientador -



Prof. D. Sc. Ricardo Ferreira Pinheiro

- Examinador interno -



Prof. D. Sc. Benemar Alencar de Souza

- Examinador externo -

NATAL – RN

Dezembro – 2004

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, ao Senhor Deus pela benção concedida que permitiu a conclusão deste trabalho.

Aos meus Pais, minha tia e minha irmã, pelo apoio incondicional fornecido durante todo o percurso da minha vida.

A minha namorada Ismênia, pelo incentivo e compreensão dedicados no decorrer do trabalho.

Aos Professores José Tavares e Manoel Firmino que desempenharam de forma eficaz as funções de orientador e co-orientador respectivamente.

Ao Engenheiro Dílson Andrade por todas as contribuições técnicas fornecidas no decorrer da pesquisa.

Em especial ao Engenheiro Cleómenes Augusto, pela experiência profissional e pela ilimitada vontade de realizar as experiências práticas necessárias ao desenvolvimento da pesquisa.

A Companhia Energética do Rio Grande do Norte que permitiu o acesso às ferramentas de suporte da pesquisa.

SUMÁRIO

Lista de figuras	IX
Lista de tabelas	XII
Resumo	XII
	I
Abstract	XI
	V
Capítulo 1 – Introdução	01
1.1. Considerações iniciais	01
1.2. Atividades de planejamento	02
1.2.1. Fluxo de carga	02
1.2.2. Análise de curto-circuito	03
1.2.3. Análise de transitórios eletromagnéticos	04
1.3. Objetivos do trabalho	05
Capítulo 2 – Aspectos básicos de proteção	07
2.1. Sobrecorrentes	07
2.1.1. Tipos de faltas	07
2.1.2. Tipos de curto-circuito	08
2.1.3. Fontes de corrente de curto-circuito	08
2.1.4. Caracterização das correntes de curto-circuito	10
2.2. Proteção de Sistemas Elétricos	11
2.3. A evolução dos relés	14
2.3.1. Relés eletromecânicos – a 1ª geração dos relés	14

2.3.2. Relés estáticos	15
2.3.3. Relés digitais e microprocessados (numéricos)	16
2.4. Tipos de relés existentes na COSERN	18
2.4.1. Relés de sobrecorrente	18
2.4.2. Relés direcionais (função 67)	21
2.4.3. Relés diferenciais (função 87)	24
2.4.3.1. Relé diferencial amperimétrico	25
2.4.3.2. Relé diferencial percentual	26
2.4.4. Relés de distância (função 21)	28
2.4.4.1. Relé de impedância	29
2.4.4.2. Relé reatância	30
2.4.4.3. Relé admitância ou mho	32
2.4.4.4. Memória nos relés de distância	32
Capítulo 3 – Ferramentas de simulação de relés	34
3.1. O simulador CMC 256	34
3.2. O software <i>Omicron Test Universe</i>	35
3.2.1. O módulo <i>Advanced Transplay</i>	37
3.2.2. O módulo <i>Overcurrent</i>	38
3.2.3. O módulo <i>Advanced Distance</i>	39
3.2.4. O módulo <i>Advanced Differential</i>	40
Capítulo 4 – Modelagem de redes, aplicações e procedimentos de simulação	43

4.1. Modelagem no ATP	43
4.2. ATP X Fluxo de carga	46
4.2.1. Sistema Regional Mossoró II	46
4.2.2. Sistema Regional Açú II	49
4.3. Comparação de registros de curtos-circuitos com os resultados alcançados pelo ATP	50
4.3.1. Ocorrência na linha de transmissão Governador Dix-Sept Rosado Caraúbas (LT 02F5 DSR/CRB)	51
4.3.2. Ocorrência na linha de transmissão Caraúbas Almino Afonso LT 02F4 CRB/AAF	53
4.4. Procedimento de simulação	55
4.5. Simulação de relé a partir de dados de ocorrências simuladas no ATP	56
4.5.1. Ocorrência na linha de transmissão Governador Dix-Sept Rosado Caraúbas (LT 02F5 DSR/CRB)	56
4.5.2. Ocorrência na linha de transmissão Caraúbas Almino Afonso LT 02F4 CRB/AAF	58
4.5.3. Simulação de faltas monofásicas hipotéticas no início da linha de transmissão Governador Dix-Sept Rosado Caraúbas (LT 02F5 DSR/CRB)	60
4.5.4. Simulação de faltas monofásicas hipotéticas no fim da linha de transmissão Governador Dix-Sept Rosado Caraúbas (LT 02F5 DSR/CRB)	64
4.5.5. Simulação de falta bifásica-terra hipotética no fim da linha de transmissão Governador Dix-Sept Rosado Caraúbas (LT 02F5 DSR/CRB)	68
4.5.6. Simulação de falta trifásica hipotética no fim da linha de transmissão Governador Dix-Sept Rosado Caraúbas (LT 02F5 DSR/CRB)	70
Capítulo 5 – Análise dos resultados e conclusões	73
Referências bibliográficas	75
Apêndice A – Modelos disponíveis no ATP	77
A.1. Elementos concentrados	77

A.2. Pi-equivalentes polifásicos	77
A.3. Transformadores	78
A.4. Linhas de transmissão	80
A.5. Chaves	81
A.6. Fontes	82
Apêndice B – Cálculo de fluxo de carga	84
B.1. Equações básicas de fluxo de carga	84
B.2. O método Newton-Raphson	85
Apêndice C – Dados dos sistemas utilizados para simulações	89
C.1. Sistema regional Açu II	89
C.2. Sistema regional Mossoró II	90

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 Curto-circuito nos terminais do gerador	11
Fig. 2.2 Componentes de corrente contínua e alternada no início do curto-circuito para falta ocorrida distante do ponto de geração	11
Fig. 2.3 Declividade das curvas tempo-corrente	20
Fig. 2.4 Aspecto das curvas tempo-corrente	21
Fig. 2.5 Diagrama fasorial de um relé direcional	22
Fig. 2.6 Possíveis conexões de um relé direcional	23
Fig. 2.7 Esquema da proteção diferencial amperimétrica	25
Fig. 2.8 Esquema da proteção diferencial percentual	26
Fig. 2.9 Característica de atuação do relé diferencial percentual	26
Fig. 2.10 Característica de atuação do relé impedância	29
Fig. 2.11 Características das três zonas do relé impedância	29
Fig. 2.12 Características de atuação do relé reatância	31
Fig. 2.13 Características das zonas de atuação e da unidade de partida <i>mho</i>	31
Fig. 2.14 Características das três zonas de atuação do relé <i>mho</i>	32
Fig. 3.1 <i>Hardware CMC 256 da Omicron</i>	35
Fig. 3.2 Página inicial para o <i>Omicron Test Universe</i>	36
Fig. 3.3 Reprodução de um sinal transitório no <i>Advanced Transplay</i>	38
Fig. 3.4 Simulação utilizando o módulo <i>Overcurrent</i>	39
Fig. 3.5 Visualização de faltas no plano R-X no <i>Advanced Distance</i>	40
Fig. 3.6 Diagrama fasorial de faltas simuladas no <i>advanced distance</i>	40

Fig. 3.7 Característica de um relé, simulada no <i>advanced differential</i>	41
Fig. 4.1 Regional Mossoró II modelado no ATP	47
Fig. 4.2 Regional Açu II modelado no ATP	49
Fig. 4.3 Registro de falta ocorrida na LT DSR/CRB	51
Fig. 4.4 Circuito no ATP para simular falta real na LT DSR/CRB	52
Fig. 4.5 Corrente elétrica simulada para falta real ocorrida na LT DSR/CRB	52
Fig. 4.6 Registro de falta ocorrida na LT CRB/AAF	53
Fig. 4.7 Circuito no ATP para simular falta real na LT CRB/AAF	54
Fig. 4.8 Corrente elétrica simulada no ATP para falta real ocorrida na LT CRB/AAF	55
Fig. 4.9 Fluxograma do processo	55
Fig. 4.10 Falta simulada no ATP registrada pelo relé PZ1000	56
Fig. 4.11 Eventos registrados pelo relé para falta simulada	57
Fig. 4.12 Registro de gráficos de tensão e corrente captados pelo programa do simulador, para uma falta real na LT 02F5 DSR/CRB simulada no ATP	57
Fig. 4.13 Falta simulada no ATP registrada pelo relé PL200	59
Fig. 4.14 Eventos registrados pelo relé para falta simulada	59
Fig. 4.15 Registro de gráficos de tensão e corrente captados pelo programa do simulador, para uma falta real na LT 02F4 CRB/AAF simulada no ATP	60
Fig. 4.16 Registro de gráficos de tensão e corrente captados pelo programa do simulador, para uma falta hipotética no início LT 02F5 DSR/CRB simulada no ATP, para máxima assimetria	61
Fig. 4.17 Falta monofásica com máxima assimetria simulada no ATP, registrada pelo relé PZ1000	62
Fig. 4.18 Falta monofásica com assimetria nula simulada no ATP, registrada pelo relé PZ1000	62

Fig. 4.19 Registro de gráficos de tensão e corrente captados pelo programa do simulador, para uma falta hipotética no início da LT 02F5 DSR/CRB simulada no ATP, para assimetria nula	63
Fig. 4.20 Falta monofásica com máxima assimetria no fim da linha, registrada pelo relé PZ1000	64
Fig. 4.21 Registro de gráficos de tensão e corrente captados pelo programa do simulador, para uma falta hipotética no fim da LT 02F5 DSR/CRB simulada no ATP, para máxima assimetria	65
Fig. 4.22 Registro de gráficos de tensão e corrente captados pelo programa do simulador, para uma falta hipotética no fim da LT 02F5 DSR/CRB simulada no ATP, para assimetria nula	66
Fig. 4.23 Falta monofásica com assimetria nula no fim da linha registrada, pelo relé PZ1000	67
Fig. 4.24 Falta bifásica-terra no fim da linha, registrada pelo relé PZ1000	68
Fig. 4.25 Registro de gráficos de tensão e corrente captados pelo programa do simulador, para uma falta hipotética bifásica-terra no fim da LT 02F5 DSR/CRB simulada no ATP	69
Fig. 4.26 Falta trifásica no fim da linha registrada pelo relé PZ 1000	70
Fig. 4.27 Registro de gráficos de tensão e corrente captados pelo programa do simulador, para uma falta hipotética trifásica no fim da LT 02F5 DSR/CRB simulada no ATP	71
Fig. A.1 Resistências, indutâncias e capacitâncias	77
Fig. A.2 Pi-equivalente	78
Fig. A.3 Circuito equivalente para um transformador de n enrolamentos	79
Fig. A.4 Formas de onda básicas para fontes de excitação	83
Fig. A.5 Forma de onda composta	83
Fig. B1 Circuito π equivalente	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Combinações para polarização dos relés direcionais	23
Tabela 2.2 – Temporização e alcance das zonas do relé de distância	30
Tabela 4.1 – Comparação entre fluxo de carga e ATP, para o nível de tensão	47
Tabela 4.2 - Comparação entre fluxo de carga e ATP, para o fluxo de potência	48
Tabela 4.3 – Comparação entre fluxo de carga e ATP, para o nível de tensão	50
Tabela 4.4 - Comparação entre fluxo de carga e ATP, para o fluxo de potência	50
Tabela C.1 – Dados das barras de cada uma das subestações do regional Açu II	89
Tabela C.2 – Dados das linhas do sistema regional Açu II	89
Tabela C.3 – Dados das barras de cada uma das subestações do regional Mossoró II	90
Tabela C.4 – Dados das linhas do sistema regional Mossoró II	91

RESUMO

O presente trabalho objetiva ao desenvolvimento de um modelo para simular redes de energia elétrica em regimes transitório e permanente, utilizando o software ATP (*Alternative Transient Program*), para servir como elo entre dois temas distintos, presentes na metodologia clássica de planejamento de redes: a análise de curtos-circuitos e o estudo de fluxo de carga. Além disso, dispondo de uma ferramenta de simulação de relés, pretende-se usar o novo modelo, tanto para averiguar a influência de fenômenos transitórios na operação dos relés de proteção, quanto para calibrar esses relés. Para testar o modelo, utilizaram-se alguns dos relés atualmente instalados na COSERN.

ABSTRACT

The objective of the present work is develop a model to simulate electrical energy networks in transient and steady states, using the software ATP (Alternative Transient Program), able to be a way to join two distinct themes, present in classical methodology planning networks: short circuit analysis and load flow theory. Beyond that, using a tool for relay simulation, this paper intend to use the new developed model to investigate the influence of transient phenomenon in operation of protection relays, and calibrate the enterprise's protection relays. For testing the model, some relays, actually, installed at COSERN were used.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos últimos anos, o setor elétrico brasileiro vem sofrendo profundas reestruturações. O Estado, até então proprietário das concessionárias de energia elétrica, iniciou o processo de privatização destas, passando de agente investidor e controlador para agente regulamentador e mediador. Assim, as concessionárias de energia elétrica, impulsionadas pelo capital privado, desfrutam atualmente de um ambiente salutar de competitividade, onde palavras como agilidade de processos, eficácia e versatilidade estão cada vez mais presentes no ambiente dessas companhias. Esses fatores são os principais determinantes do binômio confiabilidade-qualidade. Baseado nisso, a área de Planejamento de Sistemas Elétricos se torna cada vez mais importante, pois parte dela a incumbência de elaborar estudos capazes de atender aos consumidores com elevada confiabilidade, sem desprezar os critérios de qualidade de fornecimento de energia. O conceito de "qualidade da energia" está relacionado a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. Entre muitos apontamentos da literatura, é possível caracterizar o assunto como qualquer problema oriundo da variação de tensão no ponto da entrega dos consumidores ou variação de frequência em torno do valor nominal, o que resulta em falha ou má atuação de equipamentos elétricos. Dentre as causas de avarias mais comuns, pode-se citar: chaveamentos de bancos de capacitores, curto-circuito nos sistemas elétricos,

introdução de harmônicos na rede, etc. Assim, esses casos merecem uma atenção especial e devem ser estudados pelas equipes de planejamento das concessionárias.

1.2. ATIVIDADES DE PLANEJAMENTO

O planejamento de um sistema elétrico requer a execução de uma série de estudos como análise de fluxo de carga, análise de curto-circuito e avaliação de transitórios eletromagnéticos.

1.2.1. Fluxo de carga

Os estudos de fluxo de carga desempenham um papel importante, pois permitem verificar, admitida uma projeção de carga ao longo do tempo, se o sistema proposto será capaz de se manter dentro dos critérios estabelecidos no atendimento aos usuários. Permitem ainda a comparação de alternativas de expansão, bem como a avaliação do impacto no sistema, da entrada de novas unidades geradoras ou consumidoras.

Os estudos de fluxo de carga são utilizados para simular o sistema funcionando em regime permanente, seja em condições normais ou de emergência. Entende-se como condição normal aquela em que o sistema apresenta todos os componentes em serviço (geradores, linhas de transmissão, transformadores, etc.). Estudos de fluxo de carga para a condição normal são feitos para verificar se nessa situação os critérios estabelecidos são respeitados, tanto na situação de carga máxima quanto de carga mínima. Os critérios para condição normal, em geral, dizem respeito a:

- Valores máximos e mínimos de tensão permitidos para todas as barras do sistema;
- Carregamentos máximos permitidos para os condutores que compõem as linhas de transmissão e os alimentadores de distribuição;
- Carregamento máximo para os transformadores;

- Fator de potência mínimo das unidades geradoras, que se traduz em um limite de potência reativa para essas máquinas;
- Limites de potência reativa para os compensadores síncronos.

O estudo de fluxo de carga, para o sistema em condições de emergência, é realizado de forma a verificar a viabilidade do sistema continuar operando, mesmo com perda temporária de algum equipamento ou linha de transmissão, dentro de critérios estabelecidos para as condições de emergência.

1.2.2. Análise de curto-circuito

Curto-circuitos em Sistemas de Energia Elétrica são eventos perturbadores e que constituem uma ameaça permanente à qualidade e à continuidade dos serviços prestados pelas concessionárias. Portanto, é de fundamental importância dispor de ferramentas capazes de determinar essas correntes de defeito, uma vez que estas são utilizadas no projeto de qualquer sistema de proteção, constituindo-se em dados indispensáveis aos estudos de coordenação e seletividade, dimensionamento da capacidade de interrupção dos equipamentos extintores de defeitos e ajustes de relés de proteção. Além disso, essas correntes também são usadas para determinação dos limites de suportabilidade térmica de cabos, transformadores, chaves de manobra etc., pelo tempo necessário para atuação dos equipamentos de proteção.

As correntes de curto-circuito adquirem valores de grande intensidade, porém com duração limitada a frações de segundo, sendo provocadas mais comumente pela perda de isolamento de algum elemento energizado do sistema elétrico (MAMEDE FILHO, 2002:189). A amplitude dessas correntes, dependendo da localização das falhas, situa-se na faixa de 10 a 100 vezes a corrente nominal no ponto de defeito da instalação. Vale a pena ressaltar que a amplitude de uma corrente de curto-circuito independe da potência consumida pela carga, mas sim da potência do gerador e da impedância do sistema às correntes oriundas deste gerador.

A metodologia convencional empregada na obtenção das correntes provenientes de faltas é baseada na análise de componentes simétricas, pois esse modelo é aquele que fornece resultados mais rápidos e sem muitas complicações. Um fator negativo deste método é que este só pode ser empregado, mediante condições de regime permanente, não permitindo a visualização de efeitos transitórios inerentemente presentes aos curtos-circuitos.

1.2.3. Análise de transitórios eletromagnéticos

Manobras e descargas atmosféricas produzem transitórios nos Sistemas de Energia Elétrica envolvendo uma faixa de frequência, entre C.C. e vários Megahertz. Várias ferramentas têm sido usadas ao longo dos anos para a análise desses distúrbios.

O comportamento dinâmico de um sistema elétrico pode ser descrito por equações diferenciais. Devido ao alto grau de complexidade dos sistemas reais, se torna praticamente impossível uma solução analítica para a análise do comportamento dinâmico. O uso de métodos computacionais (simulação digital) é, portanto, bastante atrativo.

Muitas técnicas têm sido aplicadas na simulação digital de transitórios eletromagnéticos ao longo dos anos. Elas podem ser classificadas em duas categorias principais: técnicas no domínio da frequência e técnicas no domínio do tempo.

As técnicas de simulação no domínio do tempo são hoje mais difundidas e a grande maioria delas se baseia na aplicação da regra de integração trapezoidal para a representação de elementos a parâmetros concentrados e no método das características, também conhecido como método de Bergeron, para a representação de elementos a parâmetros distribuídos.

O programa ATP permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz de admitâncias de barras. A formulação matemática é baseada no método das características (método de Bergeron) para elementos com

parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados. Durante a solução, são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatoração triangular otimizada de matrizes, sendo calculados valores em intervalos de tempos discretos (AMON, 1996).

O programa permite a representação de não-linearidades, elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, pára-raios, reatores, etc. onde os itens utilizados na pesquisa (linhas de transmissão, fontes, chaves, transformadores) serão descritos mais detalhadamente no Apêndice A.

De uma forma geral, podem ser considerados parâmetros em componentes de fase ou em componentes de seqüência, dependendo do modelo. Tal fato torna o uso do ATP extremamente atraente, pois permite que efeitos transitórios presentes nos curtos-circuitos sejam visualizados.

1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO

Tendo em vista o aumento de competitividade entre empresas, determinado pelo novo modelo do setor elétrico brasileiro, é importante que elas busquem o máximo de eficiência nos processos (com o menor tempo de execução possível das tarefas), com um custo mínimo possível. Sabe-se que existem vários *softwares* no mercado com funcionalidades diversas, na execução dos estudos de planejamento. Entretanto, o grau de abrangência e eficiência de cada um desses programas é diretamente proporcional ao preço de aquisição dos mesmos. Sendo assim, alternativas de baixo custo financeiro devem ser buscadas, com o intento de otimizar o tempo dos profissionais de engenharia. Assim, decidiu-se por pesquisar a criação um modelo gratuito e capaz de servir como elo de ligação entre os estudos de fluxo de carga e curto-circuito. Dessa forma, esse trabalho visa implementar um modelo no ATP (*software* de uso gratuito), capaz de ser útil para análise de fluxo de carga, com a extensão para estudos de curto-circuito. Uma outra vantagem é a possibilidade de visualizar o período transitório contido nas faltas.

É inegável também o volume de investimentos que as concessionárias realizaram após a privatização. Na Cosern, por exemplo, os recursos tecnológicos atingiram o seu ápice com a chegada da automação de subestações, que passaram a ser operadas remotamente por um centro de operações, e com a aquisição de relés digitais. É evidente que esses relés também apresentam uma estreita relação com o departamento de planejamento, pois esse fornece os ajustes implantados nesses equipamentos de proteção. Entretanto, as características de operação dos relés em Sistemas de Potência são simuladas sob condições de regime permanente, e, agregadas a tais condições estão presentes as características transitórias que podem vir a produzir efeitos indesejáveis na operação dos relés. Portanto, os resultados alcançados pelo modelo desenvolvido no ATP serão conduzidos a um simulador de relés para estudar os efeitos de transitórios eletromagnéticos, servindo como mais uma ferramenta para validar a eficácia desses modernos equipamentos de proteção.

Em termos de organização desta dissertação, no capítulo 2 serão explorados temas relativos à proteção elétrica do sistema, com destaque para os relés. O capítulo 3 contemplará as ferramentas utilizadas para simulação desses equipamentos. No capítulo 4, será apresentado o modelo desenvolvido como elo de ligação entre fluxo de carga e curtos-circuitos, sendo este elo evidenciado através de resultados comparativos. No mesmo capítulo, também será abordada a influência dos efeitos transitórios sobre os relés de proteção. Finalmente, no capítulo 5 serão apresentadas conclusões e sugestões para pesquisas futuras com temática semelhante à apresentada no presente trabalho.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS BÁSICOS DE PROTEÇÃO

No presente capítulo, serão enfocados temas relativos à proteção de sistemas elétricos. Como a temática do capítulo inclui uma caracterização das correntes de curto-circuito, também focalizará a área dos relés de proteção, mostrando sua concepção evolutiva, e destacando também os principais equipamentos utilizados pela COSERN.

2.1. SOBRECORRENTES

2.1.1. Tipos de faltas

Quanto à duração, as faltas podem ser classificadas em faltas transitórias ou faltas permanentes (ALMEIDA, 1999).

- Faltas transitórias → Quando ocorre a operação de um equipamento de proteção, o defeito é extinto, retornando o circuito às condições normais de operação após o religamento automático. Dentre as causas mais comuns de defeitos transitórios, pode-se citar as descargas atmosféricas, os contatos momentâneos entre condutores, etc. Segundo dados de estatísticas, as faltas transitórias correspondem a 80% dos defeitos existentes no sistema elétrico.
- Faltas permanentes → Para esse tipo de falha, necessita-se da intervenção humana para correção do defeito. Caso não haja uma

adequada operação dos equipamentos de proteção, uma falta do tipo transitória pode se transformar em uma falta do tipo permanente.

2.1.2. Tipos de curto-circuito

O método clássico empregado para se calcular as correntes de curto-circuito é baseado na teoria das componentes simétricas (ROBBA, 1973). Nas redes trifásicas, é possível enumerar os seguintes casos de defeitos, dependendo do número de condutores que entram em contato entre si ou com a terra:

- Curto-Circuito Trifásico;
- Curto-Circuito Bifásico sem contato com equipamentos aterrados ou com a terra;
- Curto-Circuito Bifásico com contato com equipamentos aterrados ou com a terra;
- Curto-Circuito Monofásico com contato com equipamentos aterrados ou com a terra.

O 1º tipo de falta caracteriza-se como uma carga simétrica sobre a rede trifásica, onde cada um dos condutores transporta o mesmo valor eficaz de corrente de curto-circuito. Desse modo, o cálculo precisa ser feito apenas para um condutor. Já nos demais casos de curto-circuito, são produzidas cargas assimétricas. Tal fato gera a necessidade de realizar cálculos individuais para mensurar as assimetrias existentes.

2.1.3. Fontes de correntes de curto-circuito

Quando se calculam as correntes de curto-circuito, é extremamente importante que todas as fontes de curto-circuito sejam consideradas e que as impedâncias dessas fontes sejam conhecidas. DA SILVEIRA et al

(2002:1-2) descreve sucintamente, o modo pelo qual cada um desses elementos alimenta uma possível falha.

Geradores

Quando ocorre uma falha no sistema elétrico, os geradores, durante certo tempo não muito longo, devido às inércias de suas massas girantes, mantêm-se com velocidade que pode ser considerada constante, apesar da tendência de aceleração decorrente da diminuição de carga na máquina primária. As máquinas primárias podem ser turbinas a vapor, turbinas hidráulicas, motores diesel, turbinas a gás etc. A não ser para as falhas que persistam por longo tempo, quando então o gerador é passível de perder a sincronização com o sistema, a pressuposição de velocidade constante é considerada válida.

Segundo essa pressuposição, a corrente de curto-circuito depende da tensão mantida pelos geradores e das impedâncias do circuito, incluindo todos os elementos de geração, transmissão e transformação existentes entre as fontes e a falha.

A tendência dos geradores, quando ocorre um curto-circuito, é manter as tensões nos valores pré-falha, acarretando níveis elevados de corrente durante a falha.

Motores síncronos

Os motores síncronos têm funcionamento e construção semelhantes aos geradores. A diferença básica é que os motores absorvem potência elétrica do sistema e a entregam, sob a forma de potência mecânica, a uma carga acoplada a seus eixos. Durante a ocorrência de um curto-circuito, a tensão nos terminais do motor é alterada e este pode passar a funcionar como gerador, usando por tempo relativamente curto a energia armazenada nas massas girantes, para continuar girando. Esse fato, associado à presença da excitação, contribui para a alimentação do curto-circuito.

O valor da contribuição ao curto-circuito depende da tensão nominal, da potência, da reatância do motor e da impedância até o ponto onde ocorreu a falha.

Motores de indução

A inércia da carga e do rotor de um motor de indução tem aproximadamente o mesmo efeito, tanto sobre o motor de indução, como sobre o motor síncrono; assim, o motor, pelo efeito da inércia, continua girando. A diferença entre um e outro está na capacidade de manutenção da corrente de curto-circuito, uma vez que o motor de indução não possui excitação independente. Portanto, as contribuições de um motor de indução a um curto-circuito têm uma constante de tempo bem menor, afetando apenas

o comportamento do sistema num período de dois a três ciclos após o curto-circuito. Da mesma forma que no motor síncrono, a corrente de curto-circuito depende da potência, da tensão nos terminais, da reatância do motor e da reatância entre o motor e o ponto de falha.

2.1.4. Caracterização das correntes de curto-circuito

A corrente de curto-circuito é composta de duas componentes: a componente de corrente alternada que varia simetricamente em relação ao eixo horizontal de referência, e a componente de corrente contínua, que vem representada em um dos lados deste mesmo eixo. Efetuando-se a soma dos valores de corrente contínua a alternada, presentes em cada instante, obtém-se a real variação da corrente de curto-circuito.

Em termos de localização de fontes de curto-circuito, destacam-se duas situações relevantes: a primeira aborda os defeitos ocorridos nos terminais do gerador; já a segunda, focaliza os defeitos ocorridos longe dos terminais do gerador.

É indiscutível o destaque dos geradores como principal fonte de correntes de curto-circuito. Esse componente dispõe de uma reatância interna variável, cujo valor parte de uma reatância subtransitória (reatância de dispersão do estator e do rotor), atinge a fase transitória (reatância de dispersão do estator e excitação do gerador) e finalmente alcança o valor da reatância síncrona (reatância dos enrolamentos do gerador), quando então alcança o seu regime permanente. A Fig. 2.1 ilustra graficamente a reação do gerador nos estágios mencionados.

Quando ocorrem faltas em locais afastados dos pontos de geração, a impedância das linhas de transmissão predomina sobre as impedâncias de geração, eliminando a influência destas últimas sobre as correntes de curto-circuito (ver Fig. 2.2).

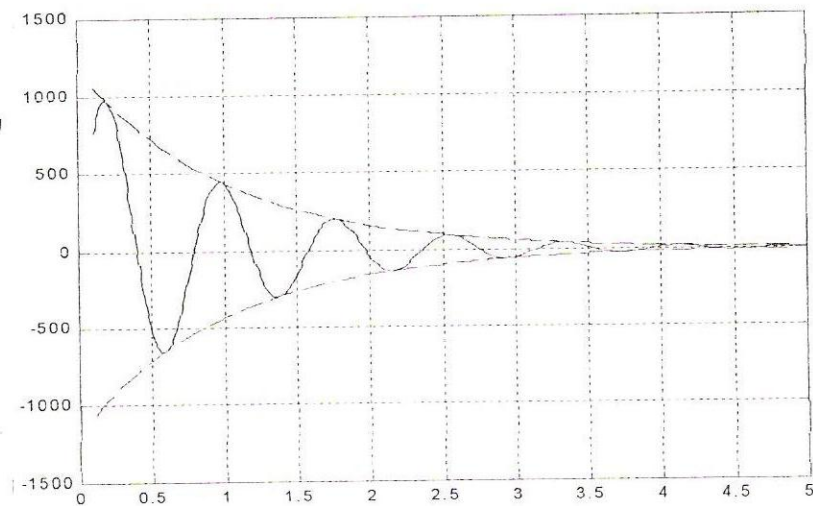


Fig. 2.1 – Curto-circuito nos terminais do gerador

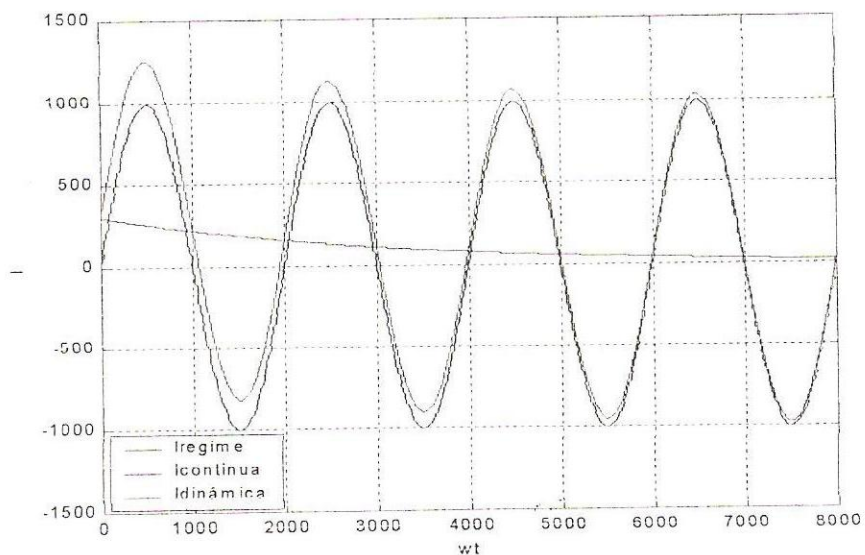


Fig. 2.2 – Componentes de corrente contínua e alternada no início do curto-circuito para falta ocorrida distante do ponto de geração

2.2. PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Em oposição ao intento de garantir economicamente a qualidade do serviço e assegurar uma vida razoável às instalações, as concessionárias de energia elétrica defrontam-se com as perturbações e anomalias de funcionamento que afetam as redes elétricas. Para atenuar os efeitos das perturbações, um sistema de proteção deve ser capaz de evitar ou minimizar

danos materiais, diminuindo assim as despesas com manutenção corretiva, e retirar de serviço um equipamento ou parte do sistema que se apresente defeituoso, melhorando assim a continuidade do serviço.

Na proteção de um sistema elétrico, três aspectos devem ser analisados:

- Operação normal;
- Prevenção contra falhas elétricas;
- Limitação dos defeitos devido às falhas.

Não é economicamente viável nem tecnicamente possível eliminar por completo as possibilidades de falhas, pois muita coisa não depende do projetista. Sendo assim, providências devem ser tomadas no sentido de prevenção ou limitação das severidades das falhas. Dentre as principais providências é possível citar:

- Limitação da amplitude da corrente de curto-circuito através da inclusão de reatores na rede elétrica;
- Projeto capaz de suportar os efeitos mecânicos e térmicos das correntes de defeito;
- Existência de circuitos alternativos e geradores de reserva;
- Existência de dispositivos capazes de interromper as correntes provenientes de falhas: fusíveis, religadores e disjuntores, tendo como elemento sensor o relé;
- Análises sobre as mudanças no sistema, como, por exemplo, o crescimento de cargas, com os conseqüentes reajustes dos relés, reorganização do esquema operativo.

Observa-se através das providências citadas anteriormente que a proteção por relés é uma das maneiras de se minimizar os efeitos danosos oriundos de falhas na rede elétrica, devendo ser considerada nos primeiros estágios do planejamento.

O relé é a parte lógica do sistema de proteção. É um dispositivo, analógico ou digital, que conectado ao sistema elétrico é responsável pela detecção de condições intoleráveis ou indesejáveis ao sistema elétrico e pela tomada de decisão de abertura ou não dos disjuntores adequados, a ele associados, a fim de iniciar o processo de retirada de operação da parte faltosa da linha, mantendo com isso a continuidade do fornecimento de energia elétrica no resto do sistema e limitando os danos aos equipamentos.

Sendo assim, a proteção por meio de relés tem duas funções: a função principal é excluir do sistema um elemento que sofreu curto-circuito, ou quando tal componente começa a comprometer a operação normal do restante do sistema; cabe à função secundária indicar a localização e o tipo do defeito ocorrido, visando uma reparação mais rápida do sistema.

Em termos de características funcionais dos relés, é possível enumerar os seguintes fatores:

- **Confiabilidade:** é entendida por duas características: confiabilidade propriamente dita e segurança. A primeira é definida como o grau de certeza de que o relé irá operar corretamente. A segunda é definida como o grau de certeza de que o relé não irá operar em condições normais de operação da rede. Então, confiabilidade indica a habilidade do relé de executar corretamente sua função, quando requerido, e evitar operação desnecessária durante a operação normal do sistema ou na presença de faltas fora de sua zona de proteção.
- **Seletividade:** é a habilidade do relé de isolar a menor parte possível do sistema que está sob falta do resto deste, operando os disjuntores adequados a ele associados, dentro da sua zona de proteção, para assegurar a máxima continuidade dos serviços, com a retirada de operação do sistema apenas das linhas que estejam sob falta.
- **Velocidade de operação:** o tempo entre a incidência da falta e o comando de abertura do disjuntor dado pelo relé é determinado pela configuração do sistema e no caso da proteção digital, é tipicamente alguns ciclos da frequência do sistema. Assim, é desejado que o relé

tenha uma velocidade de atuação necessária para assegurar um rápido isolamento da zona de proteção em que se encontra a falta, principalmente quando a necessidade de seletividade é envolvida.

- Sensibilidade: a proteção deve possuir a habilidade de distinguir entre alterações normais no sistema, como energização de transformadores ou aumento de carga no sistema, das anomalias causadas por curto-circuito, retirando de operação apenas a parte do sistema que se encontra sob falta, deixando o restante do sistema operando normalmente.

2.3. A EVOLUÇÃO DOS RELÉS

A evolução dos relés de proteção certamente é, dentre outros, uma das peças mais surpreendentes da história da evolução tecnológica dentro da indústria da energia elétrica. Embora tantas vezes rotulada como conservadora, a área de proteção de sistemas elétricos vem passando por grandes inovações em um curto espaço de tempo. Um breve histórico dessas evoluções, incluindo os principais avanços obtidos, é apresentado nos tópicos que se seguem.

2.3.1. Relés eletromecânicos - a 1ª geração dos relés

Essa história de evolução tem como princípio os velhos relés eletromecânicos que, embora já ultrapassados e de difícil aquisição, mesmo em se tratando de peças de reposição, muitos se encontram ainda instalados em usinas e subestações elétricas de concessionárias e em parques industriais.

Na realidade, diversos foram os relés eletromecânicos inventados e construídos, desde os mais simples atuadores de contato (unidades instantâneas) tipo armadura em dobradiça, até os mais bem elaborados relés do tipo wattimétricos com unidades direcionais e distanciométricas.

Os mais difundidos, sem dúvida, foram aqueles cujos princípios se fundamentam nas leis do eletromagnetismo, em que um disco metálico sujeito a forças magnéticas oriundas da passagem de corrente ou aplicação de tensão em bobinas, propicia o fechamento de contatos pelo seu movimento circular, causando o desligamento do alimentador associado.

Há que se concordar, no entanto, que toda essa geração pecava pela necessidade de manutenção permanente e pela ausência de memória que determinasse o tipo de falta, amplitudes e horários envolvidos nas ocorrências. Além disso, existia a limitação de faixas de ajustes, deixando de prover uma seletividade mais perfeita entre alimentadores de carga, em função das próprias limitações construtivas destes relés de primeira geração. Outro problema era a insensibilidade deste tipo de relé a correntes ou tensões de pequena amplitude. É possível citar o caso da falha do sistema interligado entre Canadá e Estados Unidos (1º *black-out* de Nova York), cuja causa principal foi a falha dos relés de distância que não desligaram as linhas de transmissão durante o período de uma falta fase-terra. A tensão residual do sistema caiu a níveis muito baixos, fazendo com que não houvesse torque suficiente para que os relés eletromecânicos de rejeição de cargas eliminassem seletivamente os circuitos.

2.3.2. Relés estáticos

Com o desenvolvimento dos dispositivos eletrônicos baseados em silício (diodos, transistores e SCR's), foi possível desenvolver unidades eletrônicas ou estáticas de segunda geração.

Em meados da década de 70 o setor elétrico passou a instalar esses relés de estado sólido, também chamados de estáticos analógicos. Apesar dos inconvenientes iniciais, esses relés tiveram boa aceitação no setor, encontrando-se ainda hoje muitas unidades em operação.

Os relés estáticos introduziram uma série de benefícios até então difíceis, se não impossíveis, de serem conseguidos pelos eletromecânicos. Dentre tais vantagens é possível citar:

- Dispositivos reconfiguráveis propiciando uma maior flexibilidade devido a troca de cartões eletrônicos, quando necessário, diminuindo inclusive o número de unidades em estoque;
- Redução de espaço físico, pois já era possível incorporar três dispositivos em uma única unidade trifásica;
- Maior sensibilidade em operações com níveis de tensão e correntes muito reduzidos. Era o caso de relés de rejeição de cargas que trabalhavam com níveis muito pequenos de tensão no sistema.

Além disso, esses relés já traziam a possibilidade de ajustes mais refinados, tornando mais adequada a seletividade entre sistemas.

Entretanto, estes equipamentos de 2ª geração pecavam pela sua alta sensibilidade a campos eletromagnéticos externos, causando atuações indevidas. O uso de *walk-talkies*, por exemplo, ou instalação de relés estáticos próximos a fontes oriundas de sistemas de excitação de geradores causava atuações indesejáveis.

2.3.3. Relés digitais e microprocessados (numéricos)

Com o desenvolvimento mais elaborado da microeletrônica e dos circuitos integrados, foi possível desenvolver equipamentos microprocessados, denominados de terceira geração.

Ao longo da evolução dos relés numéricos, dois elementos foram de capital importância: o *software* e a comunicação. De modo mais abrangente, o *software* de um relé de proteção possui diferentes rotinas dentre as quais estão:

- Rotinas de proteção compostas pelos algoritmos que envolvem todo o processo de medição e obtenção dos sinais digitalizados seguido do processamento desses sinais e da obtenção das grandezas de interesse que podem ser valores eficazes, fasores de tensão ou corrente,

impedância, etc., dependendo do tipo de proteção. Finalmente, como núcleo principal, o processo de comparação com os valores de referência para a tomada de decisão (*trip*, bloqueio, desbloqueio, alarme);

- Rotinas de automonitoração, que são incorporadas aos relés para uma averiguação constante da sua integridade, tanto em nível de *software* quanto em nível de *hardware* (*CPU*, *DSP*, memórias, módulos I/O, etc.);
- Rotinas de comunicação que são necessárias para que o relé se comunique com o mundo externo de modo a receber informações dos usuários ou de outros dispositivos para fins de parametrização, *reset*, atualizações, etc., bem como enviar informações aos usuários ou a outros dispositivos quando solicitados, tais como: valores atuais, mudanças de estado, registros de eventos, dentre outros.

O *software*, quando incorporado aos primeiros relés de proteção, sugerindo-lhes o nome "numéricos", tornava-os bastante vantajosos em relação aos seus antecessores, porém, possuíam apenas algumas rotinas de automonitoração e, além disso, a comunicação limitava-se a uma porta RS-232 para entrada de dados de ajustes e obtenção de informações *in loco*, obrigando Engenheiros e Técnicos a manusearem *laptops* dentro dos ambientes de uma subestação. A principal rotina do relé, contendo o algoritmo de proteção, era a mais compacta possível, utilizando as mais simples técnicas de processamento para a obtenção e a comparação das grandezas. Com a evolução das *CPU's*, dos *DSP's* e das redes de comunicação, a programação dos relés foi se tornando cada vez mais robusta e melhor elaborada. De fato, os relés estáticos analógicos durante algum tempo foram mais vantajosos do que os relés numéricos, em termos de velocidade de atuação. Somente nos últimos anos é que, para funções mais complexas como, por exemplo, a proteção de linhas de transmissão, os relés numéricos têm se igualado ou ultrapassado, em velocidade, seus antecessores analógicos.

Com essas novas ferramentas, foi possível acelerar os tempos de atuação de proteção, minimizando a suportabilidade dos equipamentos às

faltas e a possibilidade de memorizar fatos ocorridos, estampando data, hora, causa da falta, oscilografia e *data logger* dos parâmetros das falhas.

Hoje, é possível determinar com precisão os parâmetros das ocorrências no sistema elétrico e com o uso de portas de comunicação em RS232 e RS485, transmitir as informações a distância, concentrando dados em um local de supervisão para visualização pelo operador e tomada de decisões pela gerência de manutenção e controle.

Esses equipamentos de terceira geração permitem uma maior flexibilidade nos esquemas de proteção, pela aplicação de características que não estão presentes nos equipamentos das gerações anteriores, as quais são descritas abaixo.

- **Seletividade Lógica:** Permite que as unidades instantâneas dos relés de sobrecorrente a jusante e a montante sejam ajustadas e que os tempos de coordenação entre essas unidades sejam reduzidas de 400 ms nas gerações anteriores, para os atuais 60 ms;
- **Memória *Flash EEPROM*:** Permite que seja construído um equipamento que sempre esteja atualizado tecnicamente (produto não acabado). Com o uso desse tipo de memória, é possível acrescentar novas funções sem a necessidade de troca de *hardware*;
- ***Hardware* Versátil e *Software* Amigável:** Com o uso dos relés de terceira geração, existe a possibilidade de se utilizar entradas e saídas digitais e entradas e saídas analógicas totalmente configuráveis, permitindo adequar parâmetros em função de sua aplicação, sem a necessidade de alteração de *hardware* ou uso de acessórios especiais.

2.4. TIPOS DE RELÉS EXISTENTES NA COSERN

2.4.1. Relés de sobrecorrente

Conforme o próprio nome já sugere, a grandeza característica de atuação ou de acionamento é uma corrente fornecida ao relé, seja diretamente, ou através de um transformador de corrente da rede. Isso ocorrerá quando o

módulo da corrente amostrada atingir um valor igual ou superior a um ajuste previamente estabelecido (corrente mínima de atuação).

Simplicidade e menor custo com relação aos seus concorrentes são fatores que caracterizam esse modelo de relé. Entretanto, devido a um constante crescimento de cargas, os ajustes desses equipamentos de proteção devem ser atualizados com frequência. Esses relés são usados basicamente para proteção de faltas fase-terra em circuitos de distribuição de concessionárias e sistemas industriais, e em circuitos de subtransmissão quando a proteção de distância não possa ser justificada, economicamente. Como proteção de falta à terra, no entanto, o releamento de sobrecorrente é usado até mesmo em linhas de transmissão (CAMINHA, 1977:169-170). A proteção de sobrecorrente costuma envolver dois ou três relés de fase e um de terra (no caso dos relés eletromecânicos e estáticos), ou então um único relé com múltiplas funções (relés numéricos).

Geralmente os relés de sobrecorrente são compostos por duas unidades: instantânea (função 50) e temporizada (função 51).

A unidade 50 atua instantaneamente ou segundo um tempo previamente definido, ou seja, uma vez ajustados o tempo de atuação e a corrente mínima de atuação, o relé irá atuar neste tempo para qualquer valor de corrente igual ou maior do que o mínimo ajustado.

A unidade 51 pode atuar tanto com curvas de tempo definido quanto com tempo dependente. Nesse caso o tempo de atuação do relé é inversamente proporcional ao valor da corrente, ou seja, o relé irá atuar em tempos decrescentes para valores de corrente igual ou maior do que a corrente mínima de atuação.

O tempo de operação das unidades de sobrecorrente varia com a amplitude da corrente. Dessa forma, há dois ajustes a serem feitos:

- Ajuste de corrente → corrente mínima de atuação, ajustada por meio de *taps* de derivação, na bobina de correntes. É o que se chama de ajuste de *tap*;
- Ajuste do dispositivo de tempo → determina o tempo de operação para um dado *tap* e amplitude de corrente.

Há uma família de curvas cujas declividades são classificadas em três grupos: Normalmente Inversa (NI), Muito Inversa (MI) e Extremamente Inversa (EI), cujos gráficos estão ilustrados na Fig. 2.3. Essas curvas são definidas, por norma, a partir de equações exponenciais do tipo:

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

Onde:

- k_1 e k_2 : constantes que, dependendo do valor recebido, irão definir os grupos NI ($K_1=0,14$ e $K_2=0,02$), MI ($K_1=13,5$ e $K_2=1$) e EI ($K_1=80$ e $K_2=2$);
- I : corrente que chega ao relé através do secundário de um TC;
- I_s : corrente de ajuste ou de partida do relé (*starting current*)
- TMS: os valores numéricos atribuídos a TMS fazem as curvas se deslocarem ao longo do eixo dos tempos. Na Fig. 2.4 são apresentadas as características de resposta dos relés de sobrecorrente, constituídas de curvas de tempo (segundos) versus múltiplos da corrente de *tap*, para diversos valores de TMS.

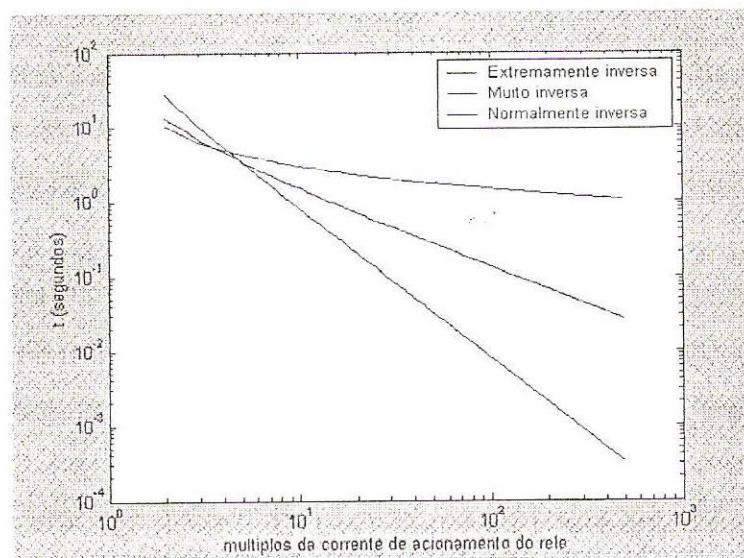


Fig. 2.3 – Declividade das curvas tempo-corrente

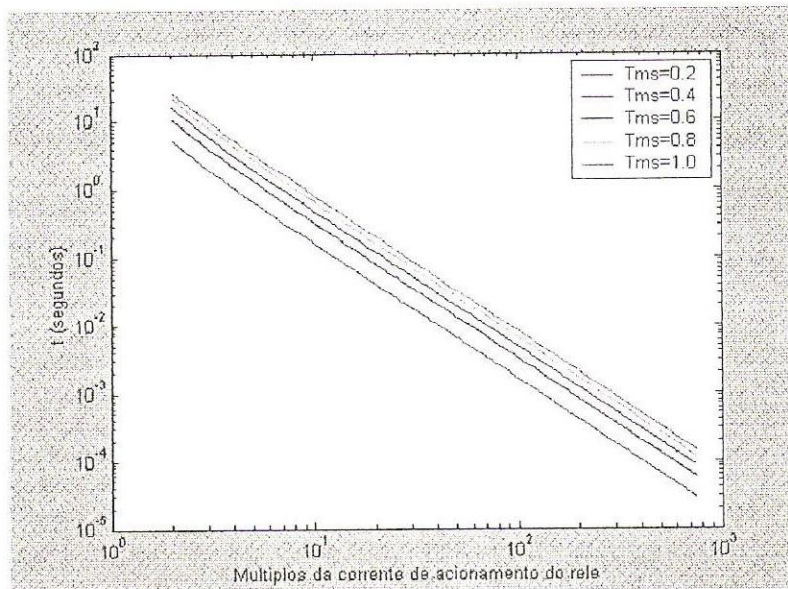


Fig. 2.4 – Aspecto das curvas tempo-corrente

2.4.2. Relés direcionais (função 67)

Os relés direcionais são usados extensivamente para reconhecer a diferença entre a corrente de carga e de falta, que circula em uma direção ou em outra em circuitos AC. Como principais aplicações, é possível citar:

- Permitir desligamento de um disjuntor quando o sentido da corrente de curto-circuito é coincidente com aquele previamente ajustado (sentido de atuação do relé). Se a falta provocar uma corrente no sentido contrário (corrente inversa ou reversa), o relé deverá inibir o desligamento do disjuntor;
- Desligamento seletivo entre disjuntores de barramentos de alimentadores em paralelo quando a falta ocorre em uma das linhas;
- Desligamento seletivo do disjuntor de um gerador de neutro aterrado ou do disjuntor de um transformador quando ocorre uma falta à terra na unidade protegida existindo outras fontes fornecendo corrente;
- Proteger linhas de transmissão em conjunto com os relés de distância.

Os relés direcionais caracterizam-se por duas grandezas de entrada: uma de operação ou atuação e outra de polarização ou referência. A identificação da direção de atuação é feita utilizando-se o ângulo de defasagem da grandeza de operação em relação à grandeza de polarização.

O funcionamento de um relé direcional pode ser representado pela seguinte equação:

$$H = E_1 E_2 \cos(\theta - \tau)$$

Onde:

H: medida de sensibilidade do relé;

θ : ângulo entre sinais de entrada E_1 e E_2 que podem ser duas correntes, duas tensões ou uma tensão e uma corrente;

τ : ângulo de sensibilidade máxima do relé.

O relé direcional mais utilizado é o do tipo tensão-corrente. É conectado ao sistema por meio de transformadores de potencial (TP's) e transformadores de corrente (TC's), sendo a corrente a grandeza de operação e a tensão, a grandeza de polarização. Na Fig. 2.5 é apresentado o diagrama fasorial desse tipo de relé.

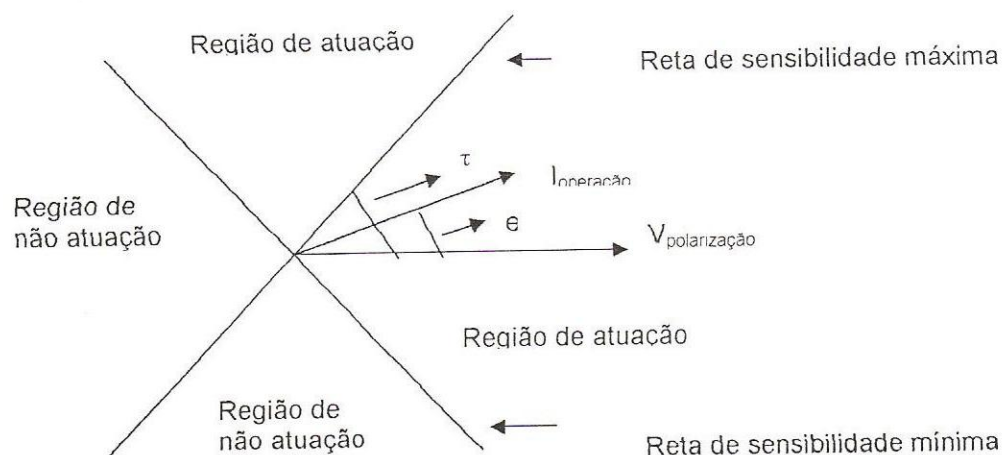


Fig. 2.5 – Diagrama fasorial de um relé direcional

Os relés de sobrecorrente direcionais tem ângulos de sensibilidade máxima que podem ser ajustados numa faixa que varia geralmente entre 20° e 80°, entretanto, a região de atuação se encontra localizada numa faixa de

aproximadamente -120° a $+120^\circ$, em relação à reta de máxima sensibilidade. Procura-se ajustar este ângulo de sensibilidade a fim de que se possa obter o melhor desempenho possível na operação do relé.

Como os curtos-circuitos envolvem correntes bastante atrasadas em relação à tensão, é desejável que os relés direcionais para a proteção contra curto-circuito sejam fisicamente conectados aos TP's e TC's para desenvolver conjugado máximo sob tais condições de corrente. Em caso de curto-circuito, a instalação passa de uma condição de fator de potência 0,90 a 0,30. Assim, pode haver um grande número de conexões possíveis, mas na prática, apenas algumas são usuais. Mais exatamente, elas são conhecidas como conexões 90° (quadratura), 30° (adjacente) e 60° , conforme pode ser visto na Fig. 2.6. Essas denominações descrevem a relação entre a corrente de atuação e a tensão de referência.

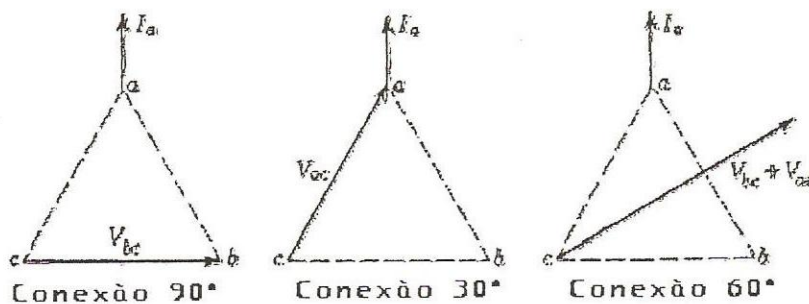


Fig. 2.6 – Possíveis conexões de um relé direcional

A tabela 2.1 mostra as combinações para polarização de relés direcionais para as três fases.

Tabela 2.1 – Combinações para polarização dos relés direcionais

Fase	Sinal	Conexão 30°	Conexão 60°	Conexão 90°
A	Atuação	I_A	I_A	I_A
	Polarização	V_{AC}	$V_{AC} + V_{BC}$	V_{BC}
B	Atuação	I_B	I_B	I_B
	Polarização	V_{BA}	$V_{BA} + V_{CA}$	V_{CA}
C	Atuação	I_C	I_C	I_C
	Polarização	V_{CB}	$V_{CB} + V_{AB}$	V_{AB}

2.4.3. Relés diferenciais (função 87)

Por definição, um relé diferencial é aquele que opera quando o vetor da diferença de duas ou mais grandezas elétricas semelhantes excede uma quantidade pré-determinada. O relé diferencial geralmente é empregado na proteção de transformadores de força, barramentos de subestações, grandes motores e geradores, linhas de transmissão que empregam sistemas de teleproteção. Entretanto, o presente trabalho dará ênfase à proteção diferencial de transformadores de força.

No caso dos transformadores, deve-se voltar a atenção para proteção contra curtos-circuitos externos e a proteção de retaguarda contra faltas externas. Os curtos-circuitos resultam de defeitos de isolamento, causados por sobretensões, de origem atmosférica ou manobras, e por sobreaquecimento inadmissível dos enrolamentos. As sobrecargas repetitivas, permanentes ou temporárias, conduzem a um envelhecimento prematuro dos enrolamentos e finalmente, a curtos-circuitos entre espiras, entre fases, etc.

A seguir, são relacionados alguns fatores que influenciam ou determinam o desempenho dessa proteção aplicada a transformadores.

- A localização dos TC's define a zona protegida. Podem ser utilizados TC's de bucha do próprio transformador ou de disjuntor associado;
- Conexão/tipo de ligação do transformador, estabelece o tipo de conexão dos TC's, objetivando o balanço das correntes passantes devido ao defasamento angular e à relação de transformação do transformador;
- Desequilíbrios provocados pelas relações de transformação de TC's e do transformador, acarretando a presença de corrente diferencial;
- A existência de correntes de "inrush" e de magnetização devido a energização do transformador;
- Fenômenos de saturação e erro de relação dos TC's provocam correntes diferenciais elevadas para as condições de carga ou de defeitos externos.

Em função da importância desse tipo de relé de proteção para transformadores, serão destacados a seguir os principais tipos de relés utilizados.

2.4.3.1. Relé diferencial amperimétrico

Conforme se pode ver na Fig. 2.7, o relé diferencial amperimétrico é um relé de sobrecorrente instantâneo, conectado diferencialmente, e cuja zona de proteção é limitada pelos TC's. Apesar dessa conexão ser bastante utilizada, é necessário lembrar que existem erros quase sistemáticos na proteção diferencial, devido principalmente a:

- Erro nas relações dos TC's a serem conectados para compatibilizar as correntes a serem medidas pelo relé diferencial;
- Comutador de TAP sob carga;
- Relações de transformação não ideais provocando a existência de corrente diferencial;
- Correntes de *inrush* causadas pela energização de transformadores;

Sendo assim, é necessário utilizar-se uma conexão menos sensível, ou seja, menos susceptível de falsas operações que o relé diferencial amperimétrico.

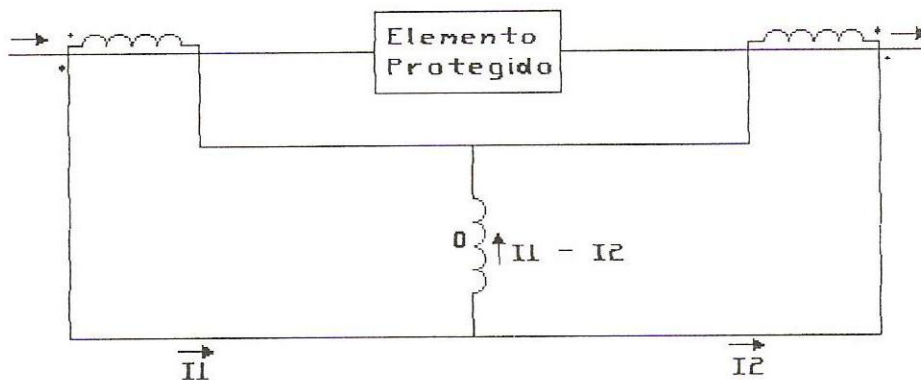


Fig. 2.7 – Esquema da proteção diferencial amperimétrica

2.4.3.2. Relé diferencial percentual

A fim de evitar os inconvenientes apresentados acima, para o relé amperimétrico, utiliza-se o relé diferencial percentual. Esse relé é capaz não só de eliminar todos os tipos de curtos-circuitos internos, como também os defeitos devidos a arcos nas buchas. Nessa montagem diferencial, comparam-se as correntes na entrada e na saída do elemento protegido, sendo que o relé opera quando atravessado por uma corrente cuja diferença entre entrada e saída ultrapassa certo valor ajustado e denominado corrente diferencial.

A Fig. 2.8 ilustra o esquema funcional de um relé percentual que além da bobina de operação, possui uma bobina de restrição, dividida em duas metades.

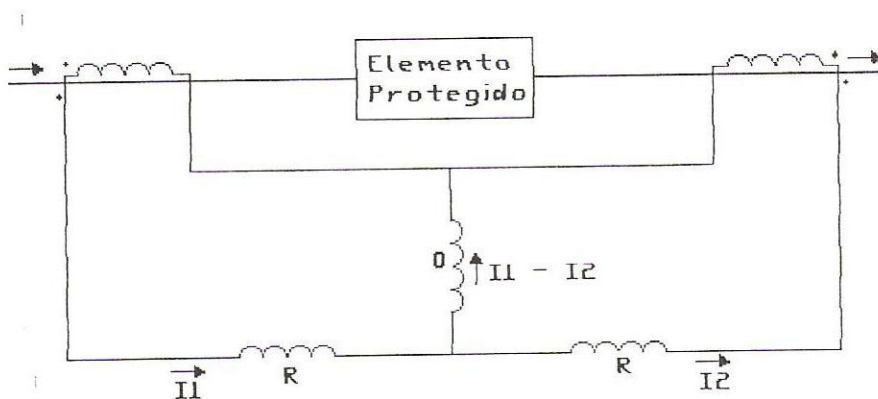


Fig. 2.8 – Esquema da proteção diferencial percentual

A característica do relé percentual pode ser representada por uma reta que divide o plano em duas regiões: atuação e não atuação.

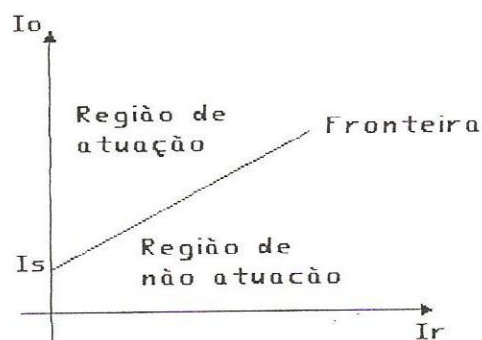


Fig. 2.9 – Característica de atuação do relé diferencial percentual

A partir da característica mostrada na Fig. 2.9, define-se a declividade ($a\%$) do relé através da relação:

$$a\% = (I_0 / I_r) \times 100\%$$

Onde,

I_0 é chamada de corrente de operação = $I_1 - I_2$

I_r é chamada de corrente de restrição = $(I_1 + I_2) / 2$

Se $a\%$ resultante da diferença vetorial entre as correntes primária e secundária for superior a $a\%$ ajustado, o relé operará; caso contrário não haverá atuação. Além disso, é necessário que a corrente que circula no circuito de operação seja superior a um valor de partida (I_s) previamente ajustado.

Vale a pena ressaltar que para faltas externas à zona de proteção, é necessário um grande valor da corrente de operação para vencer a retenção fornecida por I_r ; Já para faltas internas, I_r decresce e basta um pequeno valor de corrente na bobina de operação para acionar a partida do relé (CAMINHA, 1977:42).

Atualmente, exige-se que o relé diferencial percentual, usado na proteção de transformadores, diferencie faltas internas e corrente de magnetização (inrush), já que esta pode causar operações indevidas do relé. Alguns métodos foram desenvolvidos para evitar tais desligamentos intempestivos, entretanto a configuração baseada na restrição de harmônicos é a mais utilizada atualmente. Como a energização de um transformador é rica em harmônicos de 2ª ordem, desenvolveu-se um circuito sintonizado, pré-seletivo, nesta frequência, de modo que quando no sistema existir tal harmônico em uma dada amplitude, o relé diferencial ficará bloqueado, que é o caso do "inrush" dos transformadores. Cabe ainda ressaltar que as faltas em sistemas elétricos são pobres em 2º harmônico, fato que indica que não se terá bloqueio do relé, ou seja, haverá operação.

2.4.4. Relés de distância (função 21)

Conforme apresentado anteriormente, o relé diferencial é um tipo de equipamento de proteção que compara a corrente que entra num circuito ou equipamento protegido, com a corrente que dele sai. Entretanto, o uso de relés diferenciais, em linhas de transmissão, é economicamente inviável, devido a fatores tais como seu comprimento, seu arranjo ou seu nível de tensão. Para linhas, costuma-se adotar a solução de proteção através de relé de distância, objetivando custos muito menores.

Um relé de distância, ao invés de comparar a corrente de linha no local do relé com a corrente no extremo do trecho protegido, compara a corrente medida pelo relé (corrente compatibilizada através de TC's) com a tensão também medida por este (compatibilidade de tensão realizada por TP's), na fase correspondente ou suas componentes convenientes. Em resumo, trata-se de uma proteção temporizada em que o escalonamento é também função da impedância ao invés da corrente apenas. Esse tipo de releamento deve ser preferido quando o uso de proteção de sobrecorrente for lento ou não seletivo.

Para uma falta no extremo da linha, a tensão no local de instalação do relé será a queda Z_1 da linha. A relação entre tensão e corrente para uma falta no extremo afastado, será $V/I = Z$, onde Z é a impedância da linha. Para uma falta interna, a seção protegida da linha é $V/I < Z$. Como Z é proporcional ao comprimento da linha entre o relé e a falta, Z é também uma medição de distância à falta, justificando a denominação de relé de distância.

Com a finalidade de medir a mesma impedância em todas as faltas envolvendo mais de uma fase, o relé de distância compara a tensão medida entre duas fases faltosas com a diferença vetorial das correntes cujas fases estão envolvidas no defeito. Por exemplo, para uma falta envolvendo as fases b-c, a impedância medida pelo relé será $Z_1 = V_{bc} / (I_b - I_c)$, que é a impedância de seqüência positiva da linha entre o relé e a falta. Similarmente para faltas fase-terra o relé mede a impedância de malha ao longo do condutor da linha defeituosa, passando pela falta e voltando pelo percurso na terra até o neutro

do sistema. Assim para uma falta envolvendo a fase C e a terra, o relé irá medir $Z_1 = V_{cn} / (I_c - I_n)$ (CAMINHA, 1977:181).

Uma vez que os relés de distância enxergam impedâncias, é importante que as características de operação dos mesmos sejam traçadas num plano R-X, facilitando assim os ajustes das zonas de atuação.

2.4.4.1. Relé de impedância

Conforme pode ser visto na Fig. 2.10, a característica de atuação desse relé é representada por uma circunferência cuja origem coincide com o centro do sistema de eixos.

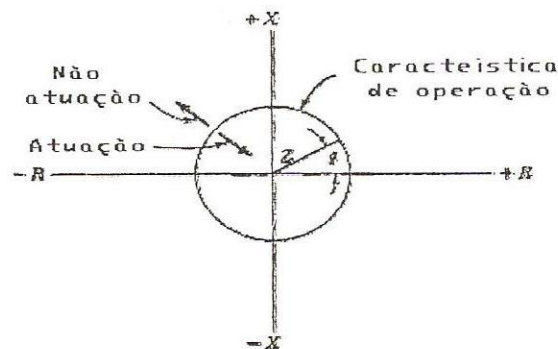


Fig. 2.10 – Característica de atuação do relé impedância

Normalmente, os relés de distância dispõem de três unidades de medida de impedância ($Z_1 - Z_2 - Z_3$) de alta velocidade, reguláveis independentemente com temporizações t_1 , t_2 ou t_3 . Para garantir uma operação seletiva, são acoplados aos relés impedância unidades direcionais.

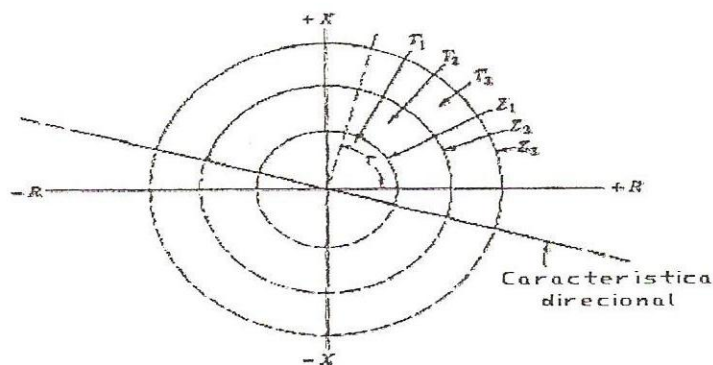


Fig. 2.11 – Características das três zonas do relé impedância

Cada zona de atuação possui uma temporização cujos valores típicos são apresentados na tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Temporização e alcance das zonas do relé de distância

Zona	Tempo (s)	Alcance
1ª	Instantâneo	80 a 90 % de Z_{linha}
2ª	0,15 a 0,5	120 % de Z_{linha}
3ª	0,4 a 1,0	200 % de Z_{linha}

Para explicar o funcionamento de tal relé, considere que a 1ª zona (círculo Z_1) é ajustada para ver faltas até 80 % do comprimento do trecho protegido; a segunda zona ajustada para 120 % (círculo Z_2) e a terceira zona para 200 %. Quanto às temporizações, considera-se que para a 1ª zona, $T_1 = 0$, para 2ª zona, $T_2 = 0,5$ s, para 3ª zona, $T_3 = 1$ s. Assim, se ocorre uma falta dentro da 1ª zona, as três unidades de medida enxergam o tal defeito, o que provoca a “partida” das unidades do relé. Entretanto, como T_1 é praticamente nulo, será a unidade Z_1 que provocará a atuação do relé, abrindo assim o disjuntor. Caso a falta ocorra na 2ª zona, somente as unidades Z_2 e Z_3 sentirão o defeito, mas como a unidade Z_2 é mais rápida, será esta que provocará a abertura do disjuntor. Já para uma falta na 3ª zona, está será a única unidade a ser sensibilizada, provocando assim a interrupção do defeito. Percebe-se que as unidades Z_2 e Z_3 servem como retaguarda para Z_1 do trecho seguinte ao protegido pelo relé de distância.

Normalmente os relés impedância são indicados para proteção de fases, em linhas de comprimento médio. São pouco sensíveis às oscilações do sistema e exigem unidade direcional adicional.

2.4.4.2. Relé reatância

No plano R-X, a característica de operação é representada por uma reta paralela ao eixo das resistências. Tal situação é ilustrada na Fig. 2.12.

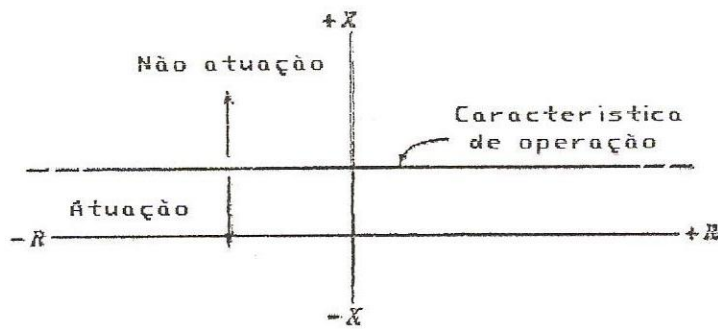


Fig. 2.12 – Característica de atuação do relé reatância

Embora este relé tenha restrições por ser de característica aberta, tornando-o sensível às oscilações do sistema, é usado devido a sua independência da resistência de arco. De fato, admitindo-se que essa resistência possa ser representada por um valor ôhmico puro, qualquer que seja o valor, o relé perceberá o defeito, ao contrário do que ocorre com relés de característica fechada.

Esse relé é não-inherentemente direcional, necessitando assim do acoplamento de uma unidade direcional. Portanto, utiliza-se uma unidade mho para proporcionar direcionalidade ao relé e compor a 3ª zona. Os alcances e temporizações são semelhantes aos valores típicos empregados para o relé reatância.

Os relés reatância são empregados na proteção de fase em linhas de comprimento curto, onde a resistência tem um valor considerável em relação à indutância e os arcos voltaicos não podem ser desconsiderados. Também devido a grande variação da resistência em faltas envolvendo a terra, os relés reatância são os mais empregados para proteção de neutro.

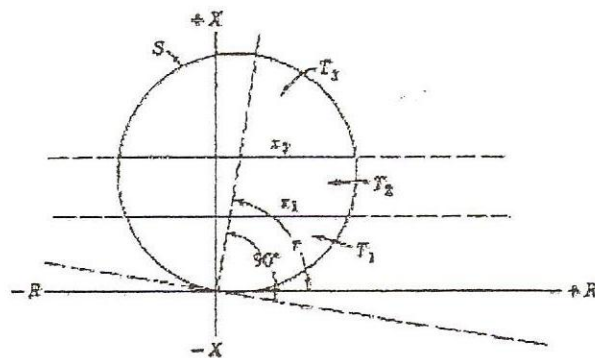


Fig. 2.13 – Características das zonas de atuação e da unidade de partida mho

2.4.4.3. Relé admitância ou mho

A representação da característica de atuação do relé mho no plano R-X é apresentada na Fig. 2.14. É possível perceber que a circunferência tangencia a origem do sistema de eixos. Outro fator a se mencionar é que este relé é inerentemente direcional. De forma semelhante ao relé impedância, também possui três zonas de atuação (Z_1 , Z_2 e Z_3) com os respectivos tempos de atuação e alcances.

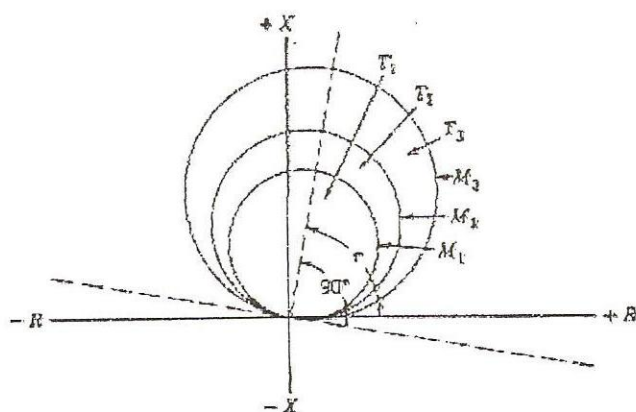


Fig. 2.14 – Características das três zonas de atuação do relé mho

Uma vantagem do relé mho sobre o relé impedância reside no fato do primeiro acomodar melhor a resistência de arco que o segundo, ou seja, para proteger um mesmo comprimento de linha e uma dada resistência de arco, o relé abrange uma menor área no plano R-X, o que se torna vantajoso devido a uma menor sensibilidade às possíveis oscilações do sistema.

O relé admitância é indicado na proteção de fase de linhas longas sujeitas a sérias oscilações.

2.4.4.4. Memória nos relés de distância

Um problema no funcionamento dos relés de distância pode ocorrer no momento de um curto-circuito. Para faltas muito próximas à fonte, e sendo V pequeno no instante de defeito ($V = Z \times I_{cc}$), pode ocorrer um mau funcionamento ou mesmo falha do equipamento, criando-se uma "zona morta". Assim há para o relé a exigência de um "comprimento mínimo" de linha para

que este possa atuar de forma apropriada. Para solucionar tal problema, adota-se a "ação de memória". O princípio de funcionamento baseia-se na energia armazenada num capacitor em um circuito paralelo ao da bobina de tensão. Assim, mesmo que a tensão caia a zero no lado de alta-tensão do transformador, no caso de um curto-circuito, uma corrente proveniente da descarga do capacitor se estabelecerá na bobina de tensão do relé, por um tempo curto, mas o suficiente para a operação do relé.

CAPÍTULO 3

FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO DE RELÉS

Com a privatização das concessionárias de energia elétrica, essas empresas passaram a contar com recursos financeiros suficientes para realizar investimentos e realizar avanços tecnológicos. A COSERN, por exemplo, alavancou um extraordinário crescimento, baseado na incorporação de novas tecnologias. Dentre estas, o universo da proteção ganhou destaque com a plena substituição dos relés eletromecânicos e estáticos por equivalentes microprocessados. Contudo, para que esses relés sejam instalados nos circuitos de proteção, é preciso que sejam aferidos de maneira adequada. Assim, adquiriu-se um sistema junto à Empresa *OMICRON*, dotado de um *hardware* gerador de sinais e controlado por um *software*, cujas características serão apresentadas nos itens que se seguem.

3.1. O SIMULADOR CMC 256

O simulador CMC 256 é um dispositivo de teste controlado por computador, cuja função é testar relés de proteção, transdutores e medidores de energia. Para efetuar testes nos equipamentos citados anteriormente, o simulador dispõe de quatro saídas de tensão, seis saídas de corrente, controle de amplificadores externos através de interface de baixo nível e saída de sinais binários. Na Fig. 3.1, mostra-se uma fotografia do equipamento CMC 256.

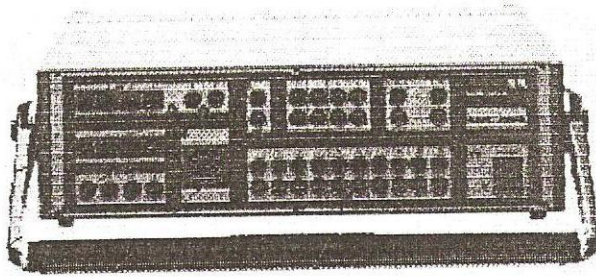


Fig. 3.1 – Hardware CMC 256 da OMICRON

O simulador CMC 256 faz parte de um sistema de testes que, além do próprio dispositivo, também requer o uso de um microcomputador PC gerenciando o *software OMICRON Test Universe* a partir do sistema operacional *Windows™*.

Cabe ao simulador executar as seguintes funções:

- Criar sinais de teste (correntes, tensões, sinais binários);
- Medir a reação (analógica e binária) do dispositivo em teste;
- Fornecer corrente em CC ao equipamento em teste

Já o *Software* que é executado no PC deve:

- Controlar os sinais a serem aplicados no teste;
- Processar os dados de medida;
- Criar informações;
- Gerar entradas de dados.

Uma vez apresentado o dispositivo CMC 256, é necessário apresentar o *software* controlador deste equipamento. Trata-se do *Omicron Test Universe* que será detalhado a seguir.

3.2. O PROGRAMA OMICRON TEST UNIVERSE

O programa *OMICRON Test Universe* foi desenvolvido para testar dispositivos de proteção e medição, tanto pelas companhias elétricas quanto

pelas companhias fabricantes de relés. Tal programa gerencia o simulador apresentado anteriormente, baseado em *Windows™*, proporcionando flexibilidade e adaptabilidade a diferentes aplicações. Ao se executar o *OMICRON Test Universe*, abre-se uma tela com o aspecto de uma página da web, como mostra a Fig. 3.2.

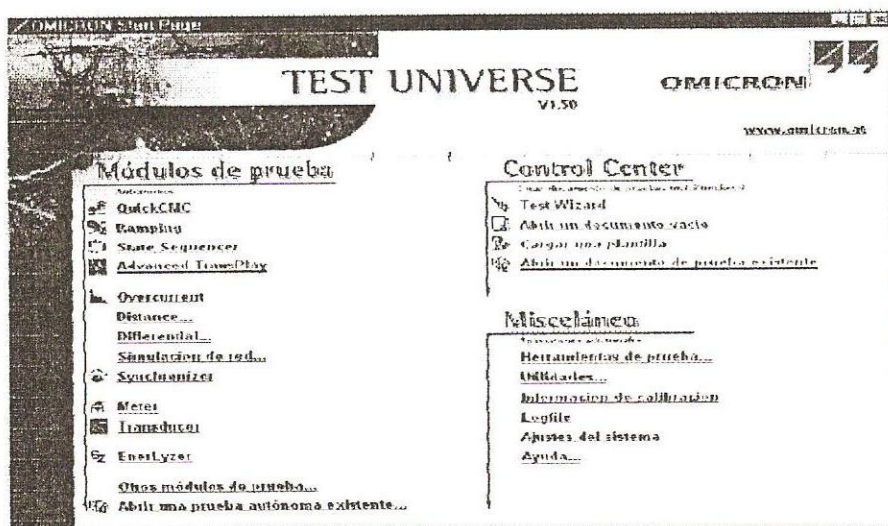


Fig. 3.2 – Página inicial para o *OMICRON Test Universe*

Neste *software* existem módulos de testes de proteção, medição, etc. Entretanto, como esse trabalho objetiva estudar características de atuação de relés sob condições de falta, será dada ênfase ao módulo de testes voltado para proteção.

O módulo *Protection Package* dispõe de várias funções para definir e realizar testes de qualquer relé de proteção de acordo com as indicações do fabricante ou segundo ajustes definidos para o relé.

Dotado das mesmas características do *Protection Package*, o *Advanced Protection Package* proporciona, adicionalmente, módulos de prova mais avançados para testar relés de proteção. Dentre esses diversos módulos, o presente trabalho enfocará apenas aqueles utilizados para os testes dos equipamentos disponíveis na empresa.

3.2.1. O módulo *Advanced Transplay*

O módulo *Advanced Transplay* é uma ferramenta universal para realizar testes com sinais transitórios utilizando o sistema CMC. Arquivos de sinais transitórios obtidos dos registradores digitais de distúrbios ou programas de simulação de redes elétricas podem ser reproduzidos com o *Advanced Transplay*. Tal software aceita os formatos de arquivos *COMTRADE* (C37, 111-1991 e P37.111/D11), *PL4* (formato ASCII para PC) e *TRF*.

O *Advanced Transplay* não só produz sinais de tensão e de corrente, mas também pode reproduzir sinais binários de um registro de faltas via saídas binárias (transistor ou relé) do CMC. Sinais binários adicionais (por exemplo, sinais de envio ou recebimento de esquemas baseados em comunicação) podem ser agregados. Durante a reprodução, os sinais de tensão, corrente e binários são aplicados a um relé de proteção.

A resposta da proteção é medida e avaliada por meio de medições de tempo. É possível realizar medições de tempo absoluto ou relativo. As primeiras determinam, por exemplo, os tempos de partida ou disparo do relé enquanto o sinal é reproduzido. Já as medições relativas comparam a resposta do relé durante a reprodução do sinal e sua resposta original armazenada no registro (referência). Isso possibilita investigar se existem diferenças entre o valor registrado e o comportamento real do relé durante a reprodução, além de verificar como outros relés de proteção operariam sob as mesmas condições.

O *Advanced Transplay* provê um modo de repetição no qual os resultados individuais de cada repetição, assim como os valores médios e desvios padrões (funções estatísticas) são exibidos. O programa também gera, automaticamente, um relatório de testes com representação gráfica dos resultados, conforme pode ser visto na Fig. 3.3.

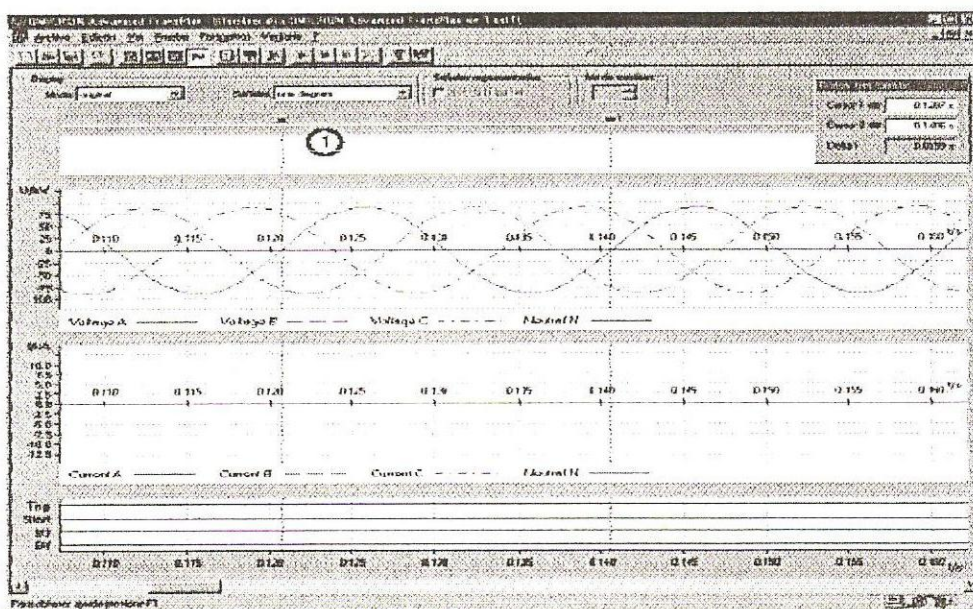


Fig. 3.3 – Reprodução de um sinal transitório no *Advanced Transplay*

3.2.2. O módulo *Overcurrent*

O módulo de teste *Overcurrent* é utilizado para testes manuais ou automáticos em relés de sobrecorrente (direcionais e não direcionais). Conforme pode ser visto na Fig. 3.4, o programa apresenta as características do relé em um diagrama tempo-corrente. Cada ponto do teste é definido nesta característica e logo é agregado a uma tabela de pontos de teste. Para cada ponto, uma avaliação é realizada baseada na tolerância predefinida para o tempo de disparo.

Para cada relé podem ser definidas até quatro características de operação diferentes: falha fase-terra, falha fase-fase, seqüência zero e seqüência negativa. As características de tempo ou curvas, podem ser definidas pelo usuário em uma tabela de corrente X tempo, ou dentro de uma variedade de características de relés predefinidos. As características de relés disponíveis dos padrões OMICRON são: curvas *standard inverse* definidas pela norma IEC 255-4 (BS 142) e curvas específicas de relés baseadas na fórmula IEEE *standard* (PC37.112).

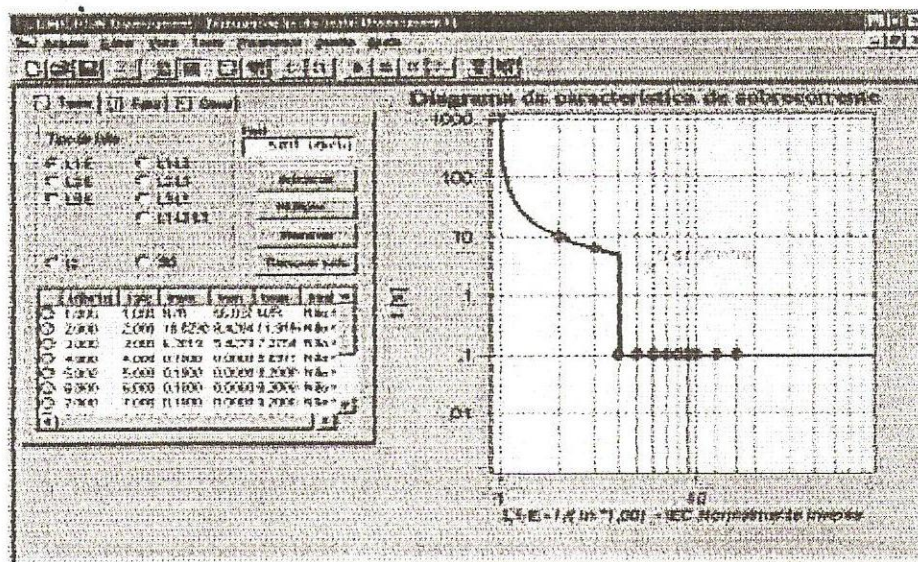


Fig. 3.4 – Simulação utilizando o módulo *Overcurrent*

3.2.3. O módulo *Advanced Distance*

O módulo *Advanced Distance* dispõe de funcionalidade para realizar testes em relés de distância. Os elementos de impedância são avaliados por meio da definição de pontos de teste específicos no plano R-X com apresentação gráfica das características. Quando uma falha é simulada, a resposta do relé é comparada com os ajustes nominais especificados, sendo gerada uma avaliação, cujos resultados são apresentados graficamente no plano de impedância ou através de dados numéricos. Este módulo apresenta uma versátil interface com o usuário, ilustrando graficamente desde os resultados no plano de impedância até os vetores das tensões e correntes em termos das componentes de seqüência positiva, negativa e zero simuladas no plano R-X. Tais detalhes são explorados nas Figuras 3.5 e 3.6.

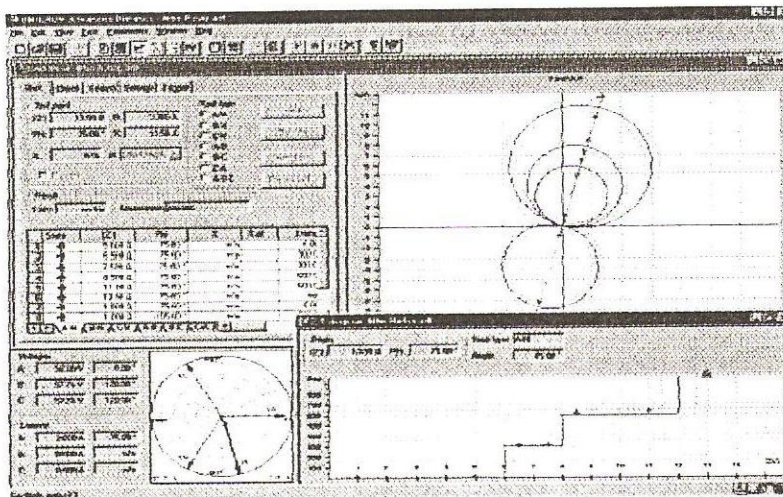


Fig. 3.5 – Visualização de faltas no plano R-X no *Advanced Distance*

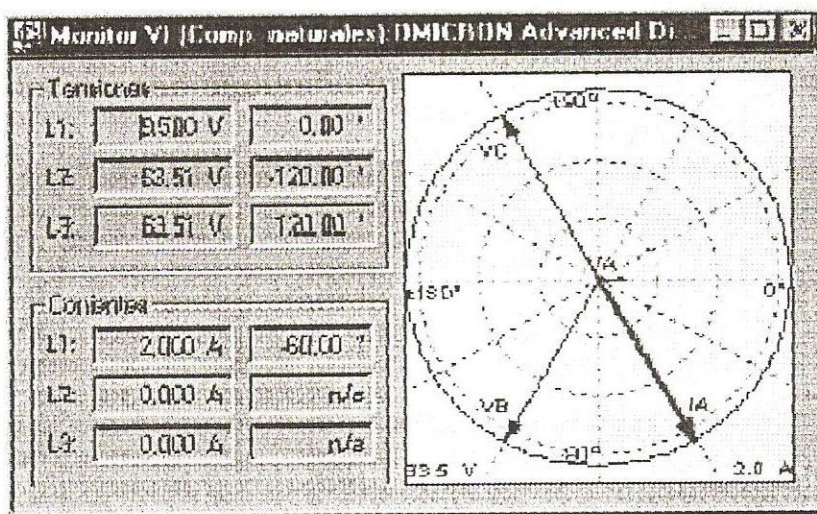


Fig. 3.6 – Diagrama fasorial de faltas simuladas no *Advanced Distance*

3.2.4. O módulo *Advanced Differential*

O módulo *Advanced Differential* é constituído de uma família de programas que permitem o teste completo de esquemas diferenciais para transformadores com até 03 enrolamentos (9 correntes de teste). O cálculo automático das correntes de teste evita perda de tempo e os erros típicos dos cálculos manuais. Conseqüentemente, o teste garante um funcionamento correto do relé de uma forma simples e em um tempo reduzido, resultando um custo/benefício eficiente.

Esses módulos de teste são também recomendados para testar outras funções de relés diferenciais, como a função de proteção de sobrecorrente *backup* (essa função atuará numa eventual falha da proteção principal) ou uma função de sobrecarga integrada no relé.

Para transformadores, o cálculo automático das correntes a serem injetadas é baseado em dados do transformador (dados nominais, grupo de defasagem, conexões dos TC's), tipo da falha (1, 2 ou 3 fases), o lado da falha/lado da fonte (primária, secundária,...), corrente de carga e correção da amplitude de fase. Os testes são baseados na entrada de todos os dados pertinentes ao transformador (tensão nominal, relação de transformação, grupo vetorial, conexões dos TC's) e aos relés (características de operação, tempos, tolerâncias). A característica simulada de um relé diferencial é apresentada na Fig. 3.7.

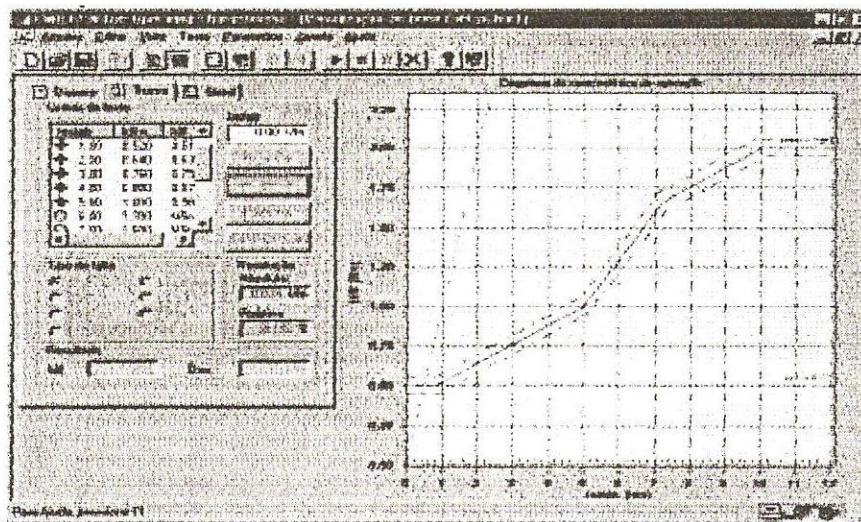


Fig. 3.7 – Característica de um relé, simulada no *Advanced Differential*

O módulo *Advanced Differential* consiste dos 4 módulos de teste seguintes:

- *Diff configuration* → testa a atuação do relé para falhas simuladas fora da área protegida;
- *Diff operating characteristic* → testa a característica de atuação do relé para falhas dentro da zona protegida;

- *Diff trip time characteristic* → mede o tempo de *trip* do relé;
- *Diff harmonic restraint* → testa as funções de bloqueio por correntes de magnetização ao se energizar um transformador e por saturação do relé diferencial. São injetadas correntes que consistem de uma mistura entre a fundamental e harmônicas sobrepostas.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM DE REDES, APLICAÇÕES E PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO

O capítulo anterior abordou o modo pelo qual cada relé é aferido na COSERN. Como a pesquisa em questão pretende simular nos relés de proteção os fenômenos transitórios, presentes nas faltas, o presente capítulo enfocará o modo pelo qual cada elemento do sistema é modelado no ATP. Entretanto, antes de testar as faltas simuladas no referido programa no módulo de simulação de relés da Omicron, é necessário comprovar se a modelagem desenvolvida condiz com a realidade. Para tanto, serão confrontados os resultados gerados pelo ATP com outros, provenientes de situações mais realistas: com aqueles gerados por um fluxo de carga, bem como com as faltas reais gravadas nos registradores dos relés. Finalmente, após realizar esse procedimento, as faltas reais simuladas no ATP serão testadas no módulo de simulação da Omicron. Além disso, para dar mais suporte à pesquisa, também serão criadas e testadas faltas hipotéticas.

4.1. MODELAGEM NO ATP

Uma vez comentados sobre características gerais de relés de proteção e os procedimentos utilizados, na Cosern, para calibrá-los, é necessário descrever como cada um dos componentes existentes no sistema da Cosern é modelado no ATP (DE OLIVEIRA et al, 2002).

a) Barramento da geradora

O ponto de partida para a análise é o ponto de conexão entre a empresa geradora (para esse caso, a CHESF) e a empresa distribuidora (nesse caso, a COSERN). O barramento de qualquer subestação de uma Empresa geradora de energia é modelado por um barramento infinito em série com as impedâncias equivalentes de curto-circuito vistas a partir do ponto de conexão da Companhia geradora. A fonte de tensão tem a forma $e(t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi)$, sendo $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, sendo $f=60\text{Hz}$. Já a amplitude do sinal de entrada é descrito pela expressão $A = \frac{\sqrt{2}V_{rms}}{\sqrt{3}}$ e a constante de fase $\varphi=0$.

b) Disjuntores

Os disjuntores são considerados como sendo chaves tripolares, com tempo de fechamento igual, para as três fases do sistema.

c) Linhas de transmissão

As linhas de transmissão são modeladas através de um circuito pi-equivalente trifásico. Os dados da barra da empresa geradora e das linhas de transmissão são fornecidos em termos de componentes de seqüência Z_1 , Z_0 , C_1 e C_0 . Sendo que C_1 e C_0 na barra da geradora são nulos. Esses componentes são convertidos em elementos de fase próprios e mútuos através das relações

$$\begin{cases} Z_1 = Z_p - Z_m \\ Z_0 = Z_p + 2 \cdot Z_m \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_1 = C_p - C_m \\ C_0 = C_p + 2 \cdot C_m \end{cases}$$

a fim de compor as matrizes que representam a linha e a barra da geradora. Essas matrizes são necessárias na entrada de dados de circuito pi-equivalente da linha, no programa ATP.

d) Transformadores

Os transformadores são caracterizados por um modelo delta-estrela aterrado, cujos parâmetros de entrada são os valores de tensão de fase fornecidos a cada um dos enrolamentos, além da reatância de curto-circuito do transformador.

e) Cargas

As cargas de subestações da Cosern são modeladas, de forma simplificada, através de um circuito RL trifásico para um nível de tensão de 13,8 kV. Já os grandes clientes, com carga superior a 2,5 MVA, têm suas cargas modeladas também através de um circuito RL trifásico. Entretanto, a tensão utilizada é 69 kV.

f) Bancos de capacitores

Os bancos de capacitores presentes nas subestações da Cosern são modelados para tensões de 13,8 e 69 kV (valores de potência reativa convertidos para impedância e, em seguida, para capacitância) e conectados em paralelo às cargas das subestações.

g) Transformadores de potencial e corrente

O ATP dispõe de medidores de tensão que serão utilizados para medir tensões em barramentos sem que haja interesse em fornecê-los aos relés de proteção. Quando isso for necessário, serão modelados transformadores de potencial com tensão compatível à que o relé necessita. A mesma abordagem pode ser estendida para os transformadores de corrente.

4.2. ATP X FLUXO DE CARGA

Para comprovar a veracidade do sistema modelado no ATP, faz-se necessário confrontar os resultados obtidos com aqueles obtidos a partir de um fluxo de carga (um breve resumo sobre fluxo de carga é abordado no apêndice B), onde a modelagem das cargas para ambos os métodos foram consideradas como sendo de impedância constante. Assim, foram escolhidos os Sistemas Regionais Mossoró II e AÇU II. Os dados relativos aos dois sistemas são apresentados no apêndice C.

4.2.1. Sistema Regional Mossoró II

O suprimento de energia ao Sistema Regional Mossoró II é efetuado a partir da subestação 230/69 kV da CHESF, denominada Mossoró II que dispõe de dois transformadores de 100 MVA cada. Esse regional conta com 416,05 km de linhas de transmissão na tensão de 69 kV e uma capacidade transformadora de 168,20 MVA, distribuída pelas seguintes subestações: Almino Afonso, Apodi, Baraúna, Canto do Amaro (consumidor particular), Caraúbas, Governador Dix-Sept Rosado, Grossos, Gangorra, Itapetinga (consumidor particular), Maísa, Mossoró I, Mossoró III, Riacho da Forquilha (consumidor particular) e Serra Vermelha.

De posse dos dados das cargas consumidas em cada subestação e dos parâmetros das linhas de transmissão, é possível construir um circuito equivalente no ATPDRAW para o Sistema Regional Mossoró II. Tal circuito é ilustrado na Fig. 4.1.

A numeração das barras se dá de acordo com a sequência apresentada nas duas primeiras colunas da tabela 4.1. Já as colunas 3 e 4 apresentam os valores das tensões calculadas, respectivamente, pelo fluxo de carga (FC) e pelo ATP. A coluna 5 apresenta a razão entre os valores de tensão encontrados pelos dois métodos. Finalmente as colunas 6 e 7 confrontam o erro obtido pelo ATP em comparação com o fluxo de carga, cujo maior erro apresentado se encontra próximo a 0,87%.

19	D.S. Rosado	13,8300	13,7200	0,9920	0,0080	0,7954
20	Riacho da Forquilha	67,9600	67,8200	0,9979	0,0021	0,2060
21	Caraúbas	67,5500	67,4500	0,9985	0,0015	0,1480
22	Caraúbas	13,9200	13,8800	0,9971	0,0029	0,2874
23	Apodi	66,2400	66,1900	0,9992	0,0008	0,0755
24	Apodi	13,7500	13,6300	0,9913	0,0087	0,8727
25	Alm.Afonso	64,8600	64,5100	0,9946	0,0054	0,5396
26	Alm.Afonso	14,0300	13,9400	0,9936	0,0064	0,6415

A tabela 4.2 é similar à anterior. Compara os resultados de ambos métodos, para os fluxos de potência nas linhas e nos transformadores. Neste caso, o maior erro encontrado encontra-se próximo a 4,03%.

Tabela 4.2 – Comparação entre fluxo de carga e ATP, para o fluxo de potência

Da barra Nº	Para a Barra nº	Potência Aparente FC (MVA)	Potência Aparente ATP (MVA)	$A = P_{atp} / P_{fluxo}$	Erro = $abs(1 - A)$	Erro (%)
1	2	6,1000	6,3460	1,0403	0,0403	4,0328
2	3	3,8080	3,8000	0,9979	0,0021	0,2101
2	4	3,3600	3,3740	1,0042	0,0042	0,4167
4	5	1,4560	1,4650	1,0062	0,0062	0,6181
1	6	18,5220	18,8310	1,0167	0,0167	1,6683
6	7	4,6300	4,7410	1,0240	0,0240	2,3974
7	8	5,9440	5,8800	0,9892	0,0108	1,0767
6	9	16,5430	16,5380	0,9997	0,0003	0,0302
1	10	32,6880	31,4530	0,9622	0,0378	3,7781
6	10	2,7010	2,6180	0,9693	0,0307	3,0729
10	11	22,1110	22,1190	1,0004	0,0004	0,0362
10	12	5,4910	5,6370	1,0266	0,0266	2,6589
12	13	5,4820	5,5260	1,0080	0,0080	0,8026
10	14	2,2360	2,2470	1,0049	0,0049	0,4919
1	15	1,5260	1,4990	0,9823	0,0177	1,7693
15	16	1,3600	1,3550	0,9963	0,0037	0,3676
1	17	12,8380	12,9550	1,0091	0,0091	0,9114
1	18	23,5550	24,1320	1,0245	0,0245	2,4496
18	19	4,1630	4,1590	0,9990	0,0010	0,0961
18	20	2,9730	3,0730	1,0336	0,0336	3,3636
18	21	16,2390	16,2750	1,0022	0,0022	0,2217
21	22	2,8280	2,8890	1,0216	0,0216	2,1570
21	23	6,1350	6,1900	1,0090	0,0090	0,8965

(mesma estrutura da tabela 4.2) aponta uma melhor visualização para o fato apresentado.

Tabela 4.3 – Comparação entre fluxo de carga e ATP, para o nível de tensão

Nº	Nome	Tensão no FC (kV)	Tensão no ATP (kV)	$A = V_{atp} / V_{fluxo}$	Erro = $abs(1 - A)$	Erro (%)
01	Açu II	71,0000	71,0000	1,0000	0,0000	0,0000
02	Macau	69,4140	69,4900	1,0011	0,0011	0,1095
03	Pendências	69,3450	69,4500	1,0015	0,0015	0,1514
04	Estreito	69,3450	69,4100	1,0009	0,0009	0,0937
05	Alto do Rodrigues	69,1380	69,2100	1,0010	0,0010	0,1041
06	Ubarana	66,4470	66,6000	1,0023	0,0023	0,2303
07	Potiporã	69,3450	69,4000	1,0008	0,0008	0,0793
08	Macau	14,2410	14,2500	1,0006	0,0006	0,0632
09	Pendências	14,4200	14,3200	0,9931	0,0069	0,6935
10	Estreito	13,7720	13,8500	1,0057	0,0057	0,5664

Tabela 4.4 – Comparação entre fluxo de carga e ATP, para o fluxo de potência

Da barra Nº	Para a Barra nº	Potência Aparente FC (MVA)	Potência Aparente ATP (MVA)	$A = P_{atp} / P_{fluxo}$	Erro = $abs(1 - A)$	Erro (%)
1	2	20,0000	20,2600	1,0130	0,0130	1,3000
1	3	14,4840	14,6620	1,0123	0,0123	1,2289
1	4	23,4000	23,8660	1,0199	0,0199	1,9915
4	5	12,9830	13,1790	1,0151	0,0151	1,5097
5	3	6,7940	6,9940	1,0294	0,0294	2,9438
3	2	10,9860	11,2460	1,0237	0,0237	2,3666
2	6	22,9650	23,1600	1,0085	0,0085	0,8491
3	7	1,0300	1,0430	1,0126	0,0126	1,2621
2	8	6,7700	6,7390	0,9954	0,0046	0,4579
3	9	8,5090	8,5600	1,0060	0,0060	0,5994
4	10	10,2770	10,3390	1,0060	0,0060	0,6033

4.3. COMPARAÇÃO DE REGISTROS DE CURTOS-CIRCUITOS COM OS RESULTADOS ALCANÇADOS PELO ATP

Conforme mencionado anteriormente, quando se deseja realizar cálculos de curto-circuito, é preciso dispor das impedâncias de sequência positiva,

negativa e zero e simulá-las sob condições de regime permanente. Existem diversas ferramentas computacionais que realizam este cálculo de forma eficiente, tais como os programas CAPE (*Computer-Aided Protection Engineering*) e o PTW (*Power Tools for Windows*). Entretanto, esses programas não agregam dados referentes aos fenômenos transitórios envolvidos durante faltas. Assim, o modelo desenvolvido no ATP para cálculo de fluxo de carga pode ser expandido para estudos de curto-circuito. Os estudos para comprovar a eficácia do método são abordados a seguir.

4.3.1. Ocorrência na linha de transmissão Governador Dix-Sept Rosado/ Caraúbas (LT 02F5 DSR/CRB)

Em abril de 2004, ocorreu uma falta na linha de transmissão que liga as subestações Governador Dix-Sept Rosado e Caraúbas (LT 02F5 DSR/CRB), cujo comprimento é de aproximadamente 40,4 km. O elemento protetor desta LT é o disjuntor 12F5 DSR, cujo relé associado a esse equipamento é do tipo distância, modelo PZ1000 da *Team-Arteche*. O registrador microprocessado do relé memorizou uma falta com as características listadas na figura abaixo.

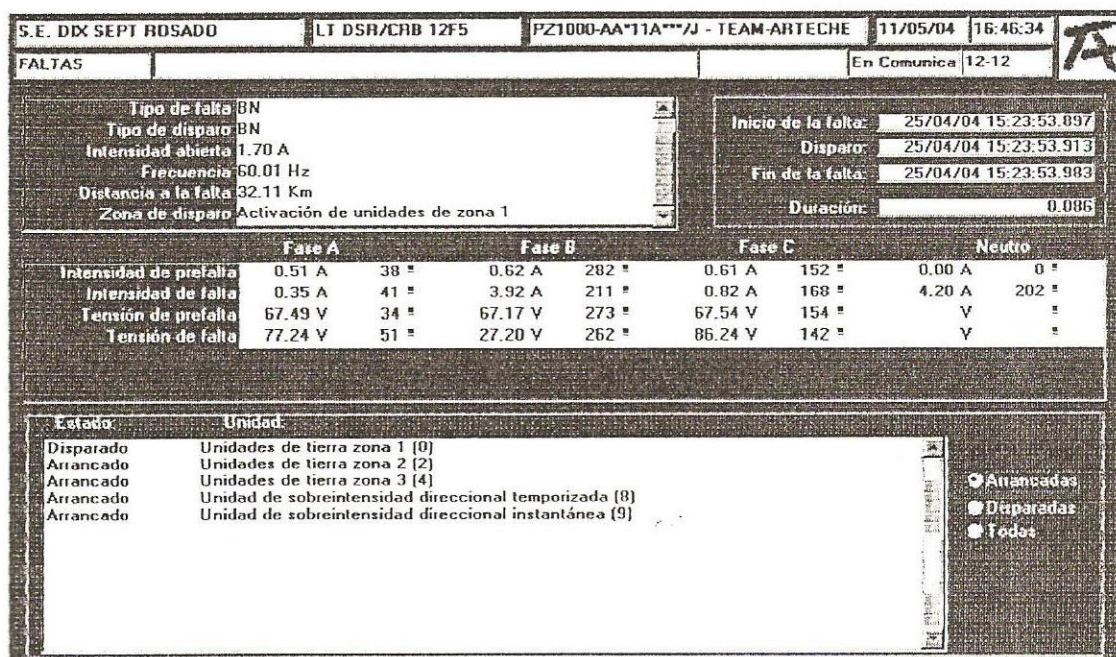


Fig. 4.3 – Registro de falta ocorrida na LT DSR/CRB

Analisando a Fig. 4.3, percebe-se que a falta ocorrida foi do tipo fase-terra (fase B e neutro), localizada a 32,11 km do início da LT 02F5, o tempo de interrupção do defeito foi 86 ms (16 ms para partida do relé e 70 ms para abertura do disjuntor) e a amplitude da falta em termos de valores secundários foi de 3,92 A. Como a relação de transformação dos TC's é 600:5, a corrente primária é aproximadamente 470,4 A_{rms}, ou então 665,26 A_{pico}.

Objetivando reproduzir a falta apresentada acima, foi modelado no ATP um circuito equivalente com uma impedância de falta à terra de 5 Ω, cujo resultado pode ser visto na Fig. 4.4. Os gráficos obtidos por este circuito são apresentados na Fig. 4.5.

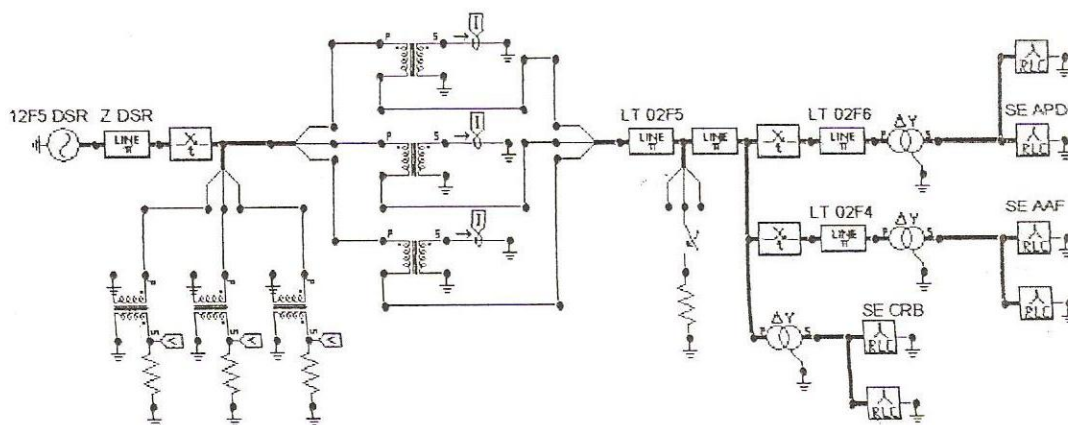


Fig. 4.4 – Circuito no ATP para simular falta real na LT DSR/CRB

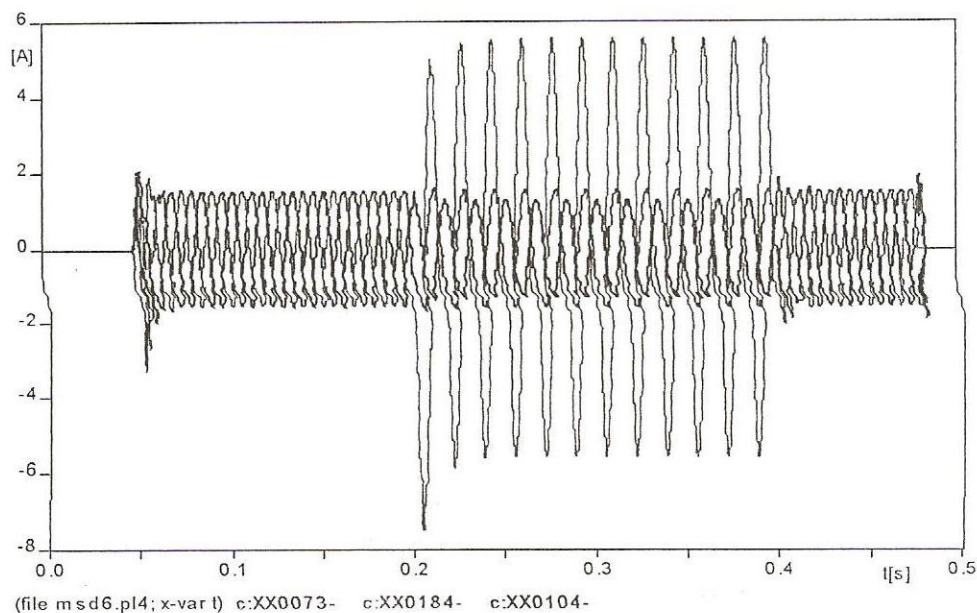


Fig. 4.5 – Corrente elétrica simulada para falta real ocorrida na LT DSR/CRB

Comparando o valor obtido na Fig. 4.3 ($0,62 A_{rms}$ secundários) com o gráfico da Fig. 4.5 ($1,62 A_{pico}$ secundários ou $1,15 A_{rms}$ secundários), percebe-se que as intensidades de correntes de pré-falta apresentam elevada divergência. Tal fato pode ser explicado devido aos valores utilizados para realizar a simulação no ATP corresponderem a grandezas no horário de carga máxima. Entretanto, a fidelidade alcançada pela simulação se registra na amplitude da corrente de falta. Comparando as amplitudes de corrente de defeito, a corrente real atingiu $3,92 A$, enquanto a simulada alcançou $3,93 A$ (erro de $0,25\%$).

4.3.2. Ocorrência na linha de transmissão Caraúbas Almino Afonso (LT 02F4 CRB/AAF)

Objetivando comprovar a eficácia das faltas simuladas no ATP, foi realizada outra simulação envolvendo uma falta real. Nesse estudo, foi envolvida a LT 02F4 CRB (Caraúbas)/AAF (Almino Afonso), de comprimento aproximado de $45 km$. O disjuntor protetor desse circuito é codificado por 12F4 CRB, tendo como elemento sensor o relé de sobrecorrente modelo PL-200, fabricado pela *Team-Arteche*. A Fig. 4.6 ilustra o registro da falta captada pelo relé.

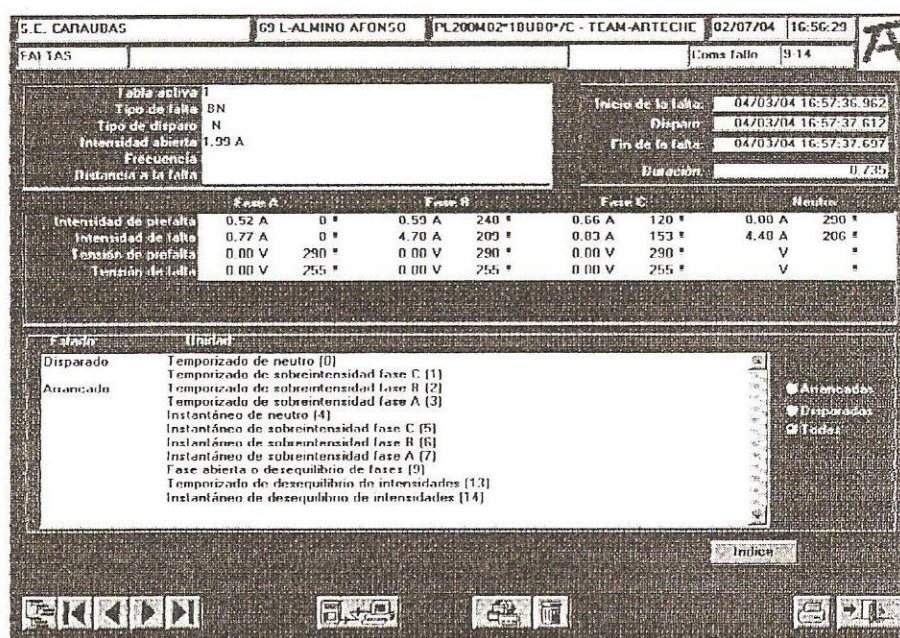


Fig. 4.6 – Registro de falta ocorrida na LT CRB/AAF

Através da figura acima, constata-se que o defeito aconteceu entre a fase B e o neutro e a amplitude da corrente de falta em termos de valores secundários foi de 4,70 A_{rms}. Como o relé protetor é do tipo sobrecorrente, este não dispõe de mecanismos para localizar faltas. Sendo assim, foi utilizado um software aceito internacionalmente para estimar qual era o ponto da linha onde ocorreu o defeito. Considerando uma impedância de falta à terra de 5 Ω, o programa CAPE estimou uma falta distando 38,7 km do início da linha, para obter a corrente secundária desejada. Assim, a falta foi modelada no ATP e o resultado alcançado foi 4,77 A_{rms} secundários, o que resulta num valor de 286,2 A_{pico}, considerando uma relação de transformação dos TC's de 300:5. Na Fig. 4.7 é apresentado o circuito utilizado para realizar a modelagem no ATP. Já na Fig. 4.8 são apresentados os gráficos simulados no ATP. Comparando as amplitudes de corrente de defeito, a corrente real atingiu 4,70 A, enquanto a simulada alcançou 4,77A (erro de 1,46%).

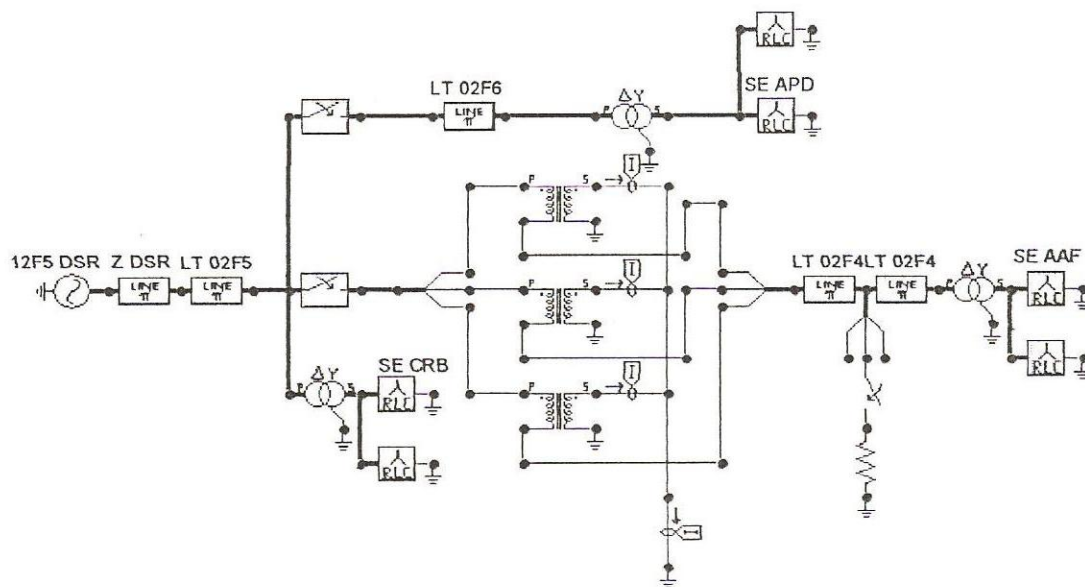


Fig. 4.7 – Circuito no ATP para simular falta real na LT CRB/AAF

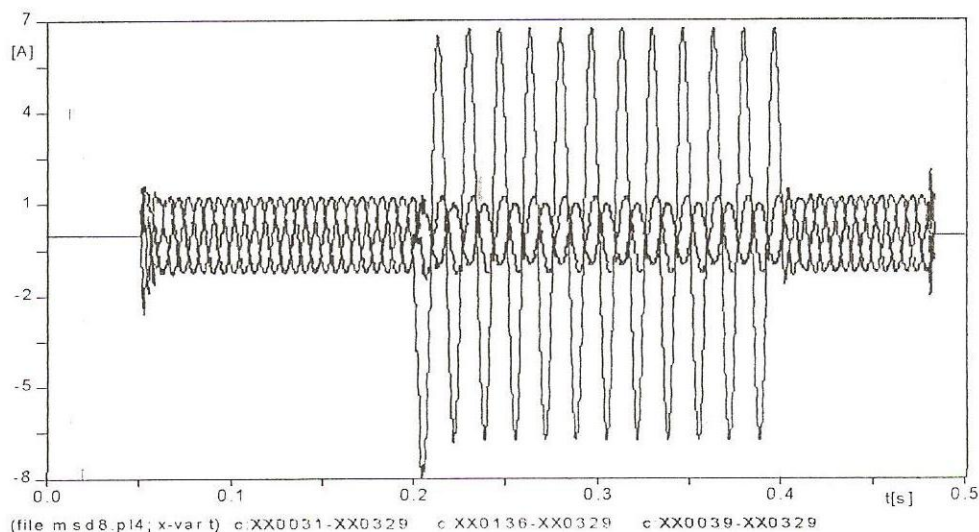


Fig. 4.8 – Corrente elétrica simulada no ATP para falta real ocorrida na LT CRB/AAF

4.4. PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO

Após constatar que a modelagem do ATP produz resultados satisfatórios, é possível, finalmente, realizar as simulações desejadas no software da *omicon*. Antes disso, a título de ilustração do processo, é ilustrada na Fig. 4.9 o fluxograma do processo.

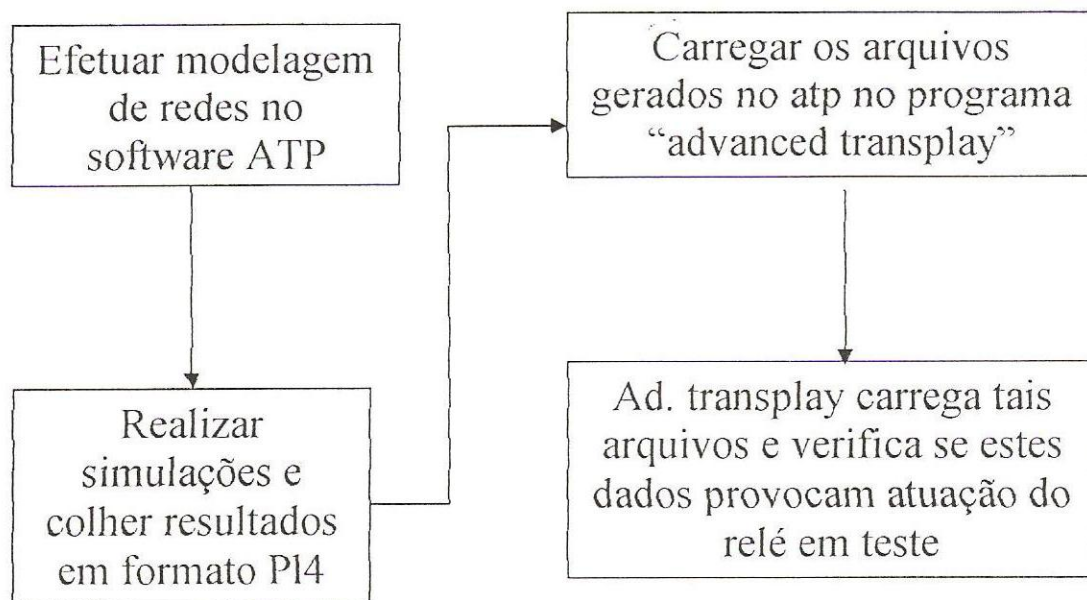


Fig. 4.9 – Fluxograma do processo

4.5. SIMULAÇÃO DE RELÉ A PARTIR DE DADOS DE OCORRÊNCIA SIMULADAS NO ATP

Neste momento, serão reproduzidas no ATP defeitos existentes no sistema de transmissão, bem como criadas faltas para serem reproduzidas pelo simulador de relés.

4.5.1. Ocorrência na linha de transmissão Governador Dix-Sept Rosado Caraúbas (LT 02F5 DSR/CRB)

Com base no circuito modelado Fig. 4.4, foi possível conduzir os sinais gerados pelo ATP ao software de simulação da *omicon*. A Fig. 4.10 aborda a falta simulada no ATP que foi registrada pelo relé PZ1000 da *Team-Arteche*. Em seguida a Fig. 4.11, ilustra, em termos de arranque e disparos das zonas, os eventos registrados pelo relé. Finalmente, a Fig. 4.12 ilustra graficamente a falta simulada, apresentando também uma tabela gerada pelo programa de simulação que apresenta, como principal informação, o tempo de atuação do relé após a ocorrência da falta (esse tempo fica melhor evidenciado através da ilustração na parte inferior da figura, onde após 33,3 ms do início da falta, o relé enviou o comando para abertura de um disjuntor hipotético) .

The screenshot shows a text-based window with the following data:

```

Registro da falta simulada 250404 atp.twt - Bloco de notas
Arquivo Editar Pesquisar Ajuda
Início da falta 11/06/04 16:59:13.856
Disparo      11/06/04 16:59:13.860
Fim da falta 11/06/04 16:59:14.066
Tipo de falta BH
Intensidade aberta 1.97
Distância da falta 32.93
Frequência 60.00
    
```

	Fase A	Fase B	Fase C	Neutro
Intensidade de pré-falta	1.06	1.08	1.05	0.00
Intensidade de falta	1.08	3.93	0.90	4.02
Tensão de pré-falta	66.14	66.15	66.01	
Tensão de falta	76.97	24.57	81.15	

Fig. 4.10 – Falta simulada no ATP registrada pelo rele PZ1000

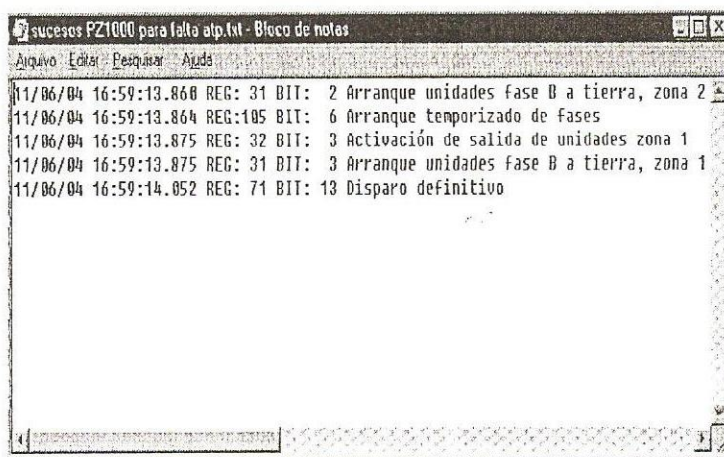


Fig. 4.11 – Eventos registrados pelo relé para falta simulada

Condição do Estado:

No	Nome	Ignorar antes	Iniciar	Parar	Tnom [s]	Tdesv- [s]	Tdesv+ [s]	treal [s]	Tdesv [s]	Aval.
1 (1)		inicio da falta	inicio da falta	Disparo 0>1				0,0333		0

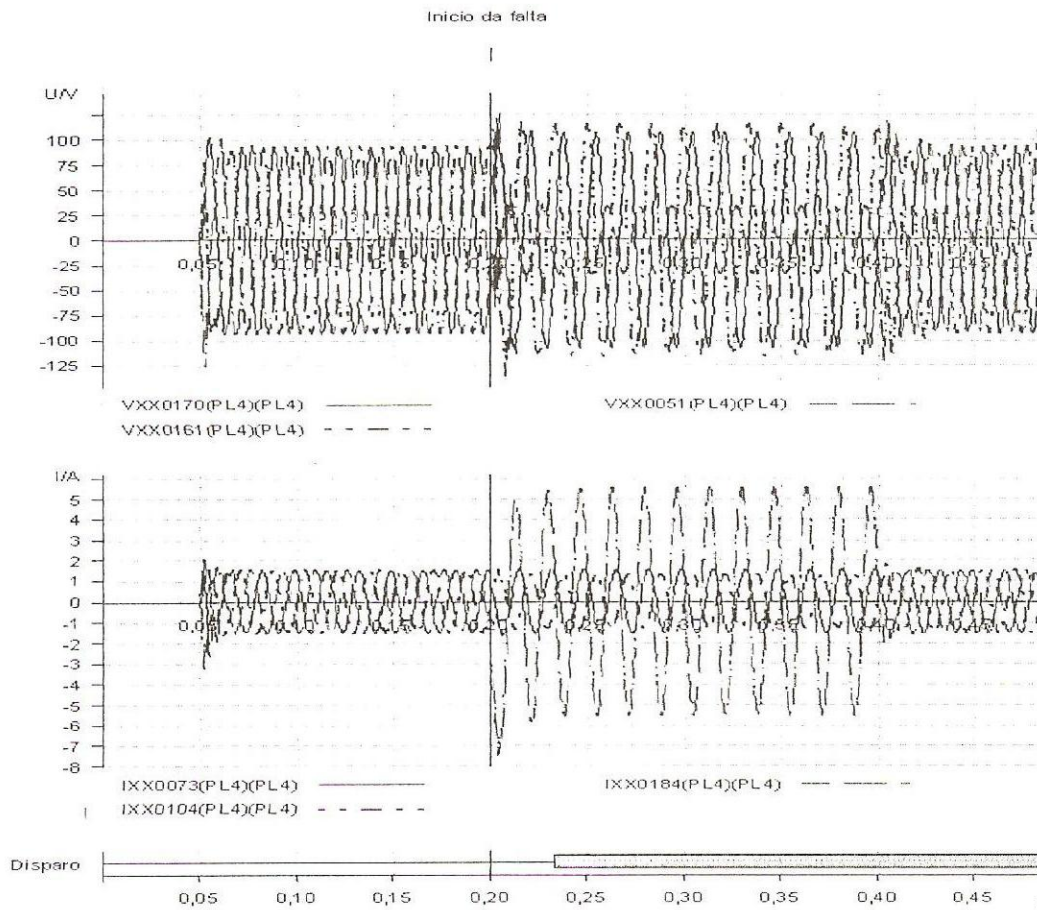


Fig. 4.12 – Registro de gráficos de tensão e corrente captados pelo programa do simulador, para uma falta real na LT 02F5 DSR/CRB simulada no ATP

Confrontando a distância da falta real com aquela obtida pela falta simulada, percebe-se que a primeira distou 32,11 km do ponto de partida (ver Fig. 4.3), enquanto a segunda alcançou uma distância de 32,93 km (observar Fig. 4.10), ou seja, um erro de aproximadamente 2,5%. Em termos de tempo de interrupção de defeitos, constata-se que a falta real perdurou por 86 ms, isso levando em conta o tempo de abertura do disjuntor. Na falta simulada, o relé enviou o comando de abertura em 33 ms. Levando-se em conta que um disjuntor demora entre 40 e 60 ms para efetuar a abertura, a falta simulada foi capaz de descrever com elevado grau de perfeição a falta real. Vale a pena salientar que o relé utilizado para a falta é do tipo de distância e que este é ajustado para operar instantaneamente para defeitos ocorridos na 1ª zona. Logo a atuação do elemento protetor ocorreu de forma correta. Cabe ressaltar que o disparo do relé ocorreu na fase transitória do defeito o que pode vir a causar religamentos desnecessários se a falta desaparecer na fase transitória do defeito. Como sugestão, pode-se aumentar o tempo de atuação da 1ª zona para algo em torno de 50 ms. Com essa mudança, defeitos extremamente rápidos não seriam percebidos pelo relé e oscilações indesejáveis de tensão seriam evitadas.

4.5.2. Ocorrência na linha de transmissão Caraúbas Almino Afonso (LT 02F4 CRB/AAF)

Continuando a análise dos efeitos transitórios, foi desenvolvido um circuito (que já foi apresentado na Fig. 4.7) que também teve seus dados simulados pelo *software* do simulador. A Fig. 4.13 ilustra o registro da falta real simulada captada pelo relé PL200 da *Team-Arteche*. Já a Fig. 4.14, ilustra, em termos de arranque e disparos, os eventos registrados pelo relé.

```

Fal3.txt - Bloco de notas
Arquivo Editar Pesquisa Ajuda
-----
Inicio da Falta 10/06/04 16:26:00.165
Disparo 10/06/04 16:25:58.250
Fim da Falta 10/06/04 16:26:00.790
Tipo de Falta B
Intensidade aberta 2.10

Fase A Fase B Fase C Neutro
Intensidade de pré falta 0.00 0.01 0.01 0.00
Intensidade de falta 0.89 4.72 0.70 4.71
Tensão de pré-falta 0.00 0.00 0.00 0.00
Tensão de falta 0.00 0.00 0.00 0.00
    
```

Fig. 4.13 – Falta simulada no ATP registrada pelo relé PL200

```

Disp3.txt - Bloco de notas
Arquivo Editar Pesquisa Ajuda
-----
10/06/04 16:25:58.250 IRLG: 11 BIT: 1 Arranque temporizado de Fase B

Fase A Fase B Fase C Neutro
0.90 A 4.83 A 0.72 A 4.81 A

10/06/04 16:26:00.165 REC: 11 BIT: 9 Activación salida de Temporizado de Fase B

Fase A Fase B Fase C Neutro
0.89 A 4.72 A 0.70 A 4.71 A
    
```

Fig. 4.14 – Eventos registrados pelo relé para falta simulada

A Fig. 4.15 mostra graficamente a falta simulada no ATP. Considerando os ajustes implantados no relé (*pick-up* 3,3 curva MDI ANSI para unidades de fase e *pick-up* 0,8 curva 1,7 NI ANSI), a interrupção da falta deveria ocorrer em 1,963 s. Entretanto, segundo os dados coletados pelo *software* de simulação de relés (apresentados na tabela sob o gráfico e no tempo de disparo do relé na parte inferior ao gráfico), a falta foi interrompida em 1,959 s. Por se tratar de um relé de sobrecorrente, os efeitos transitórios tornam-se irrelevantes.

Condição do Estado:

No	Nome	Ignorar antes	Iniciar	Parar	T _{nom} [s]	T _{desu} [s]	T _{desu} + t _{real} [s]	T _{desu} [s]	Aval.
1 (1)		Início da falta	Início da falta	Disparo 0>1			1,9590		o

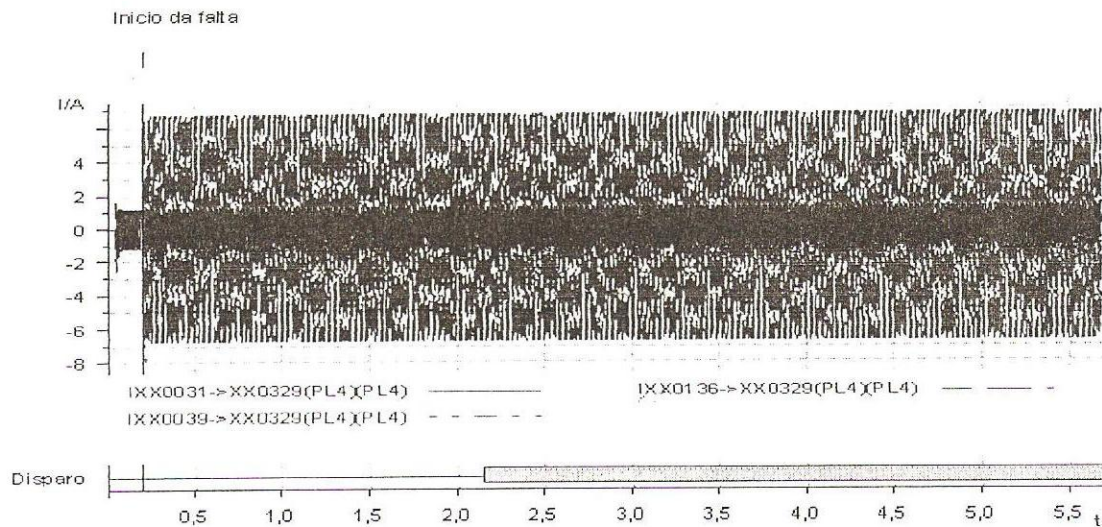


Fig. 4.15 – Registro de gráficos de correntes captado pelo programa do simulador, para uma falta real na LT 02F4 CRB/AAF simulada no ATP

Uma vez comprovada a eficácia do modelo desenvolvido no ATP para cálculos de fluxo de carga, curtos-circuitos e simulação de faltas reais em relés de proteção, pode-se também direcionar o método desenvolvido para criar faltas hipotéticas e testar o desempenho dos relés de proteção mediante a imposição de tais defeitos.

4.5.3. Simulação de faltas monofásicas hipotéticas no início da linha de transmissão Governador Dix-Sept Rosado Caraúbas (LT 02F5 DSR/CRB)

Baseado no circuito da Fig. 4.4 e alterando a configuração de falta de 32,11 km para 1,0 km, foram aplicadas faltas monofásicas com resistência de 5 Ω ao relé PZ1000 da *Team-Arteche* (os ajustes são idênticos aos existentes na LT 02F5 DSR/CRB) sob duas condições distintas: a primeira se refere ao instante que a onda de corrente da fase que será aplicado o defeito atinge o valor zero (gerando assim máxima assimetria) e a segunda considera o

momento em que a amplitude da onda da mesma fase que se tornará defeituosa alcança o valor máximo (gerando assimetria nula).

Para o primeiro caso, a Fig. 4.16 ilustra o sinal gerado pela falta e o tempo de abertura desta. Já a Fig. 4.17 enfoca os detalhes da falta captada pelo relé.

Condição do Estado:

No	Nome	Ignorar antes	Iniciar	Parar	Tnom [s]	Tdesv- [s]	Tdesv+ [s]	treal [s]	Tdesv [s]	Aval.
1 (1)		início da falta	início da falta	Disparo >1				0,0317		O

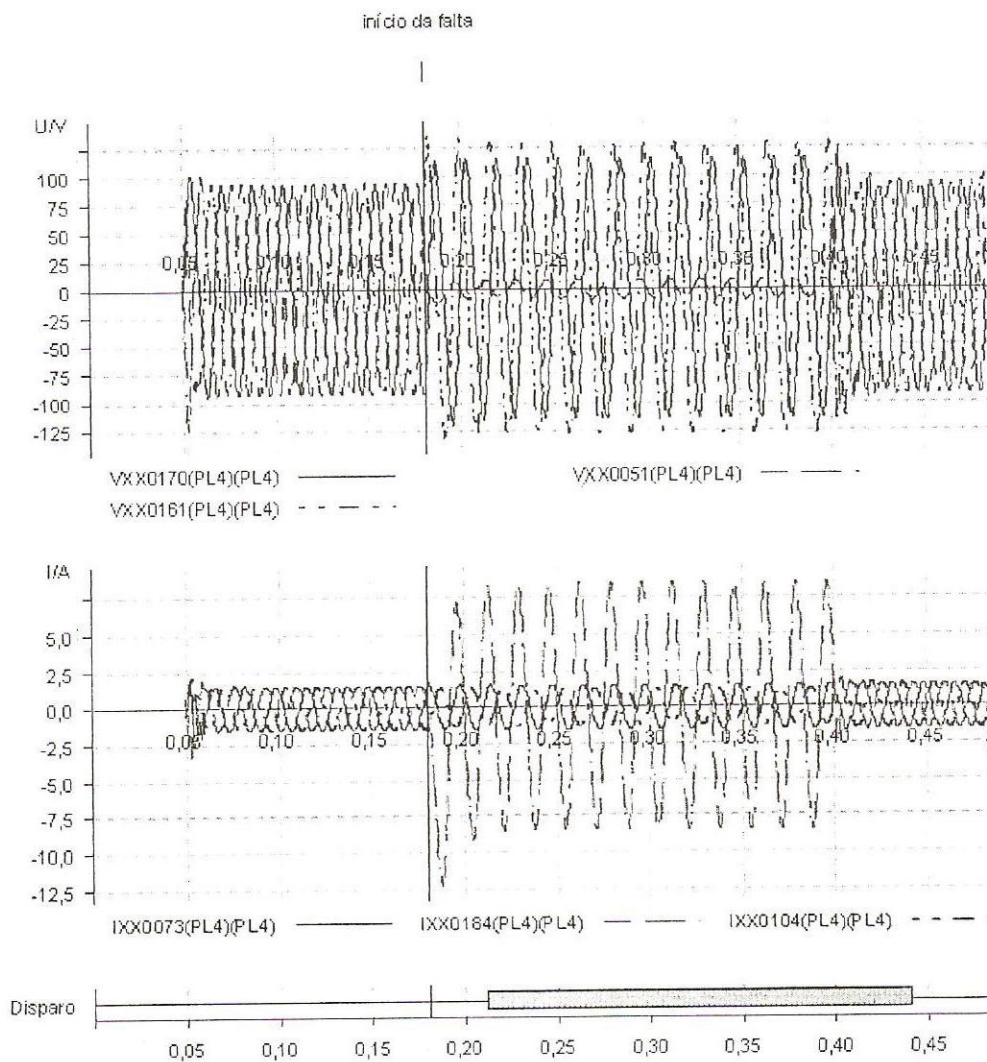


Fig. 4.16 – Registro de gráficos de tensão e corrente captados pelo programa do simulador, para uma falta hipotética no início da LT 02F5 DSR/CRB simulada no ATP, para máxima assimetria

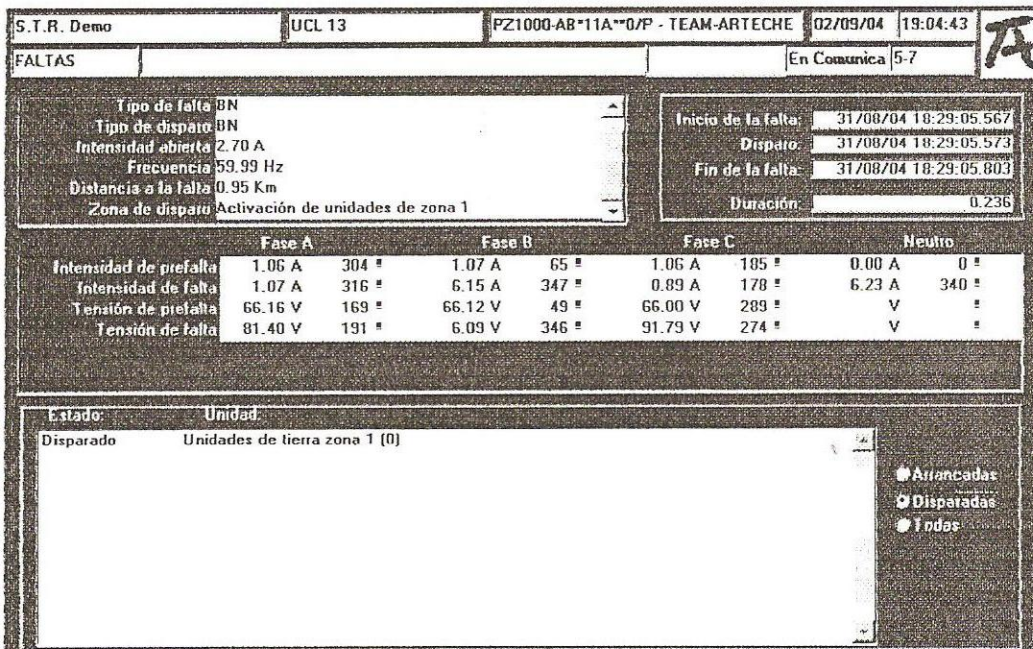


Fig. 4.17 – Falta monofásica com máxima assimetria simulada no ATP, registrada pelo rele PZ1000

Considerando a segunda situação (assimetria nula), o registro da falta é apresentado na Fig. 4.18 enquanto que os sinais gerados por essa falta, bem como o tempo de atuação do relé, são enfocados na Fig. 4.19.

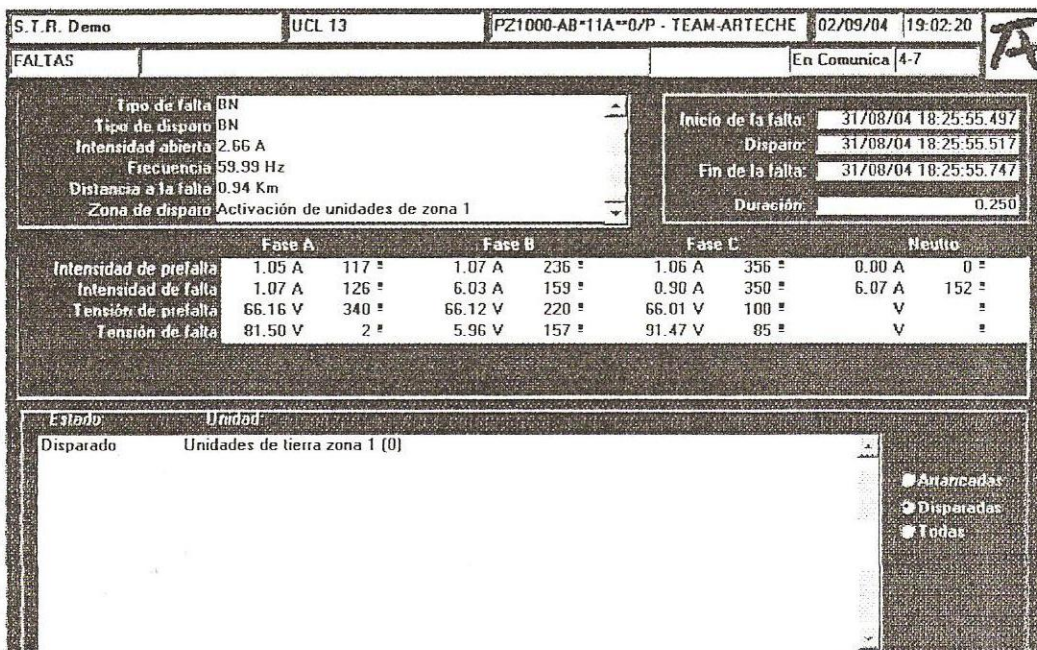


Fig. 4.18 – Falta monofásica com assimetria nula simulada no ATP, registrada pelo rele PZ1000

Condição do Estado:

No	Nome	Ignorar antes	Iniciar	Parar	Tnom [s]	Tdesv- [s]	Tdesv+ [s]	treal [s]	Tdesv [s]	Aval.
1 (1)		início da falta	início da falta	Disparo Q>1				0,0460		o

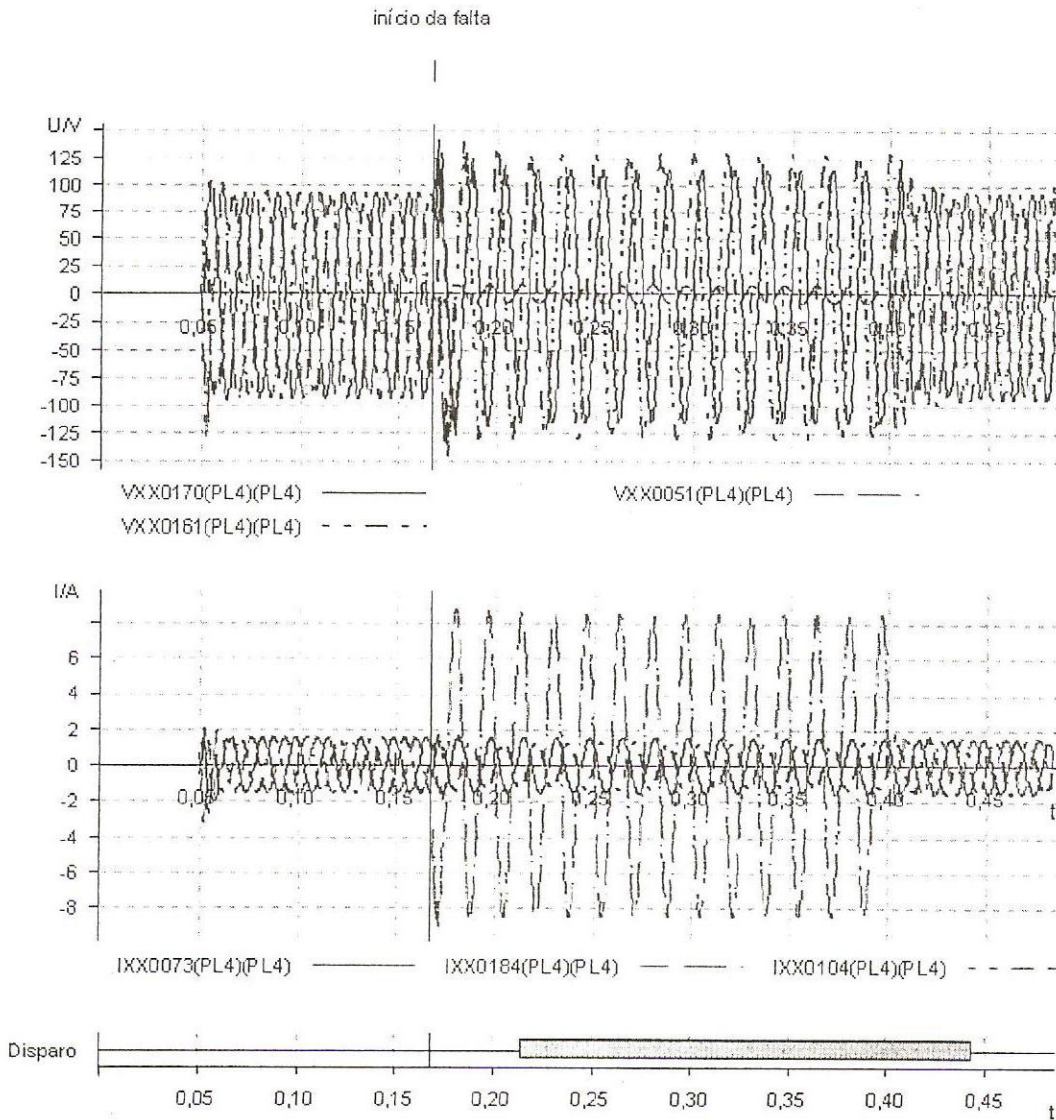


Fig. 4.19 – Registro de gráficos de tensão e corrente captados pelo programa do simulador, para uma falta hipotética no início da LT 02F5 DSR/CRB simulada no ATP, para assimetria nula

Inferindo os resultados aferidos pelo relé percebe-se que, para o caso inicial, a distância calculada para o defeito foi 0,95 km para um tempo de extinção da falha de 31,7 ms. Na segunda configuração, o defeito aconteceu a 0,94 km da origem sendo extinto 46 ms após. Confrontando a distância simulada pelo ATP com aquelas calculadas pelo relé, constata-se um erro de

5% para o caso de máxima assimetria e 6% para assimetria nula. Com relação aos tempos de atuação do relé e considerando que este está calibrado para disparar instantaneamente para defeitos ocorridos na 1ª zona, os tempos de 31,7 e 46 ms estão dentro de uma margem adequada. Entretanto, mais uma vez, o disparo do relé, para o caso de máxima assimetria, ocorreu no período transitório da falta o que comprova a necessidade de se elevar o tempo de disparo de 1ª zona para evitar aberturas indevidas sob faltas de ínfimas durações.

4.5.4. Simulação de faltas monofásicas hipotéticas no fim da linha de transmissão Governador Dix-Sept Rosado Caraúbas (LT 02F5 DSR/CRB)

Similar ao item anterior, onde foram modelados defeitos monofásicos com a mesma impedância de falta para assimetrias máxima e mínima, foram desenvolvidas com o circuito da Fig. 4.4 faltas fase-terra no fim da LT 02F5 DSR/CRB (40,4 km). Sendo assim, a Fig. 4.20 apresenta a falta monofásica com assimetria máxima registrada pelo relé e a Fig. 4.21 ilustra os sinais aplicados ao equipamento protetor e o tempo de disparo deste.

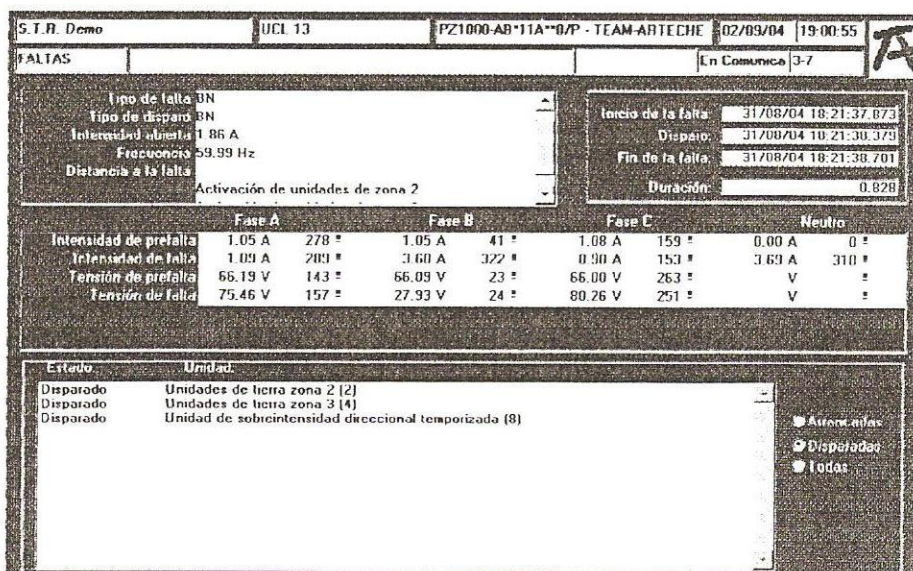


Fig. 4.20 – Falta monofásica com máxima assimetria no fim da linha, registrada pelo relé PZ1000

Condição do Estado:

No	Nome	Ignorar antes	Iniciar	Parar	Tnom [s]	Tdesv- [s]	Tdesv+ [s]	treal [s]	Tdesv [s]	Aval.
f (1)		início da falta	início da falta	Disparo 0>1				0,5368		o

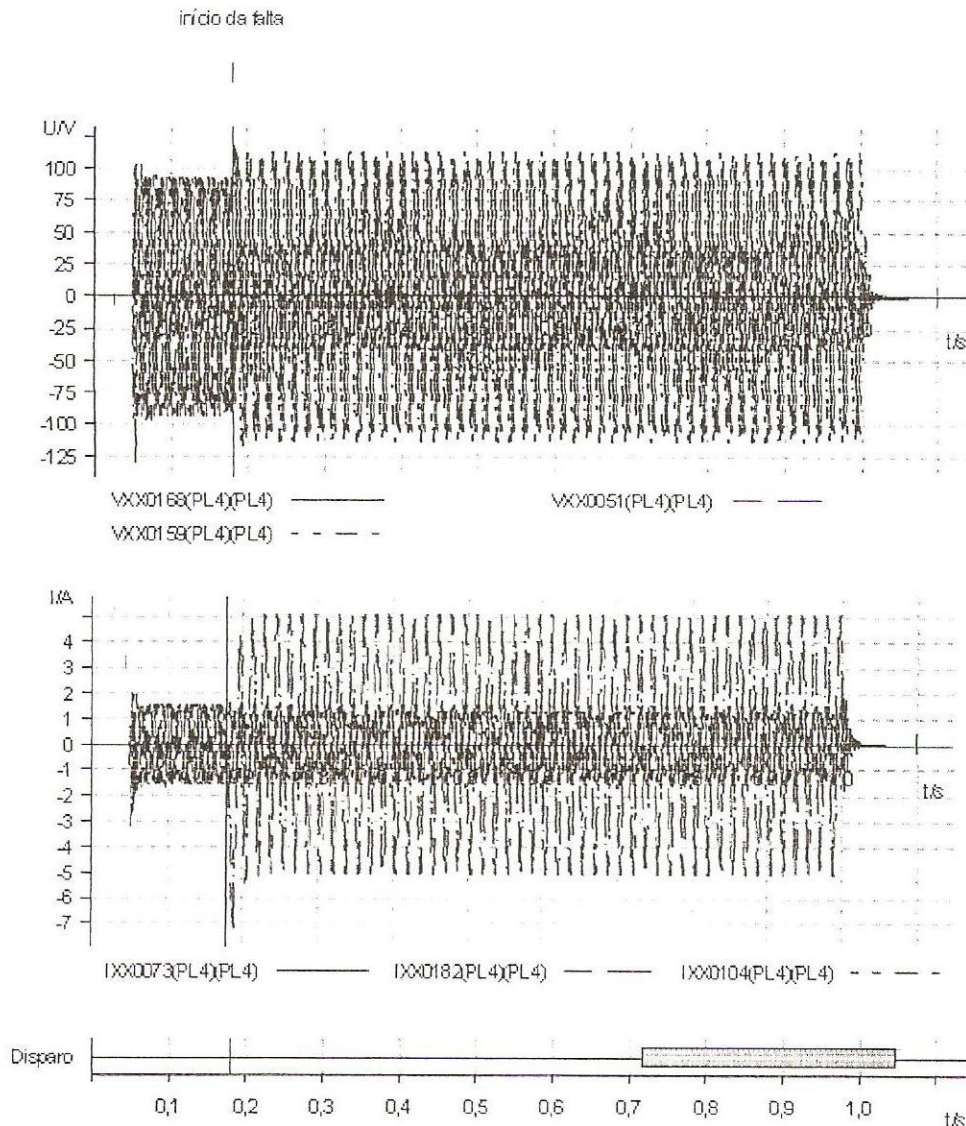


Fig. 4.21 – Registro de gráficos de tensão e corrente captados pelo programa do simulador, para uma falta hipotética no fim da LT 02F5 DSR/CRB simulada no ATP, para máxima assimetria

Para a configuração de assimetria nula, os sinais gerados, bem como o tempo de atuação do relé, são ilustrados na Fig. 4.22. Já a falta registrada é apresentada na Fig. 4.23.

Condição do Estado:

No	Nome	Ignorar antes	Iniciar	Parar	Tnom [s]	Tdesv- [s]	Tdesv+ [s]	treal [s]	Tdesv [s]	Aval.
1 (1)		início da falta	início da falta	Disparo 0>1				0,5360		o

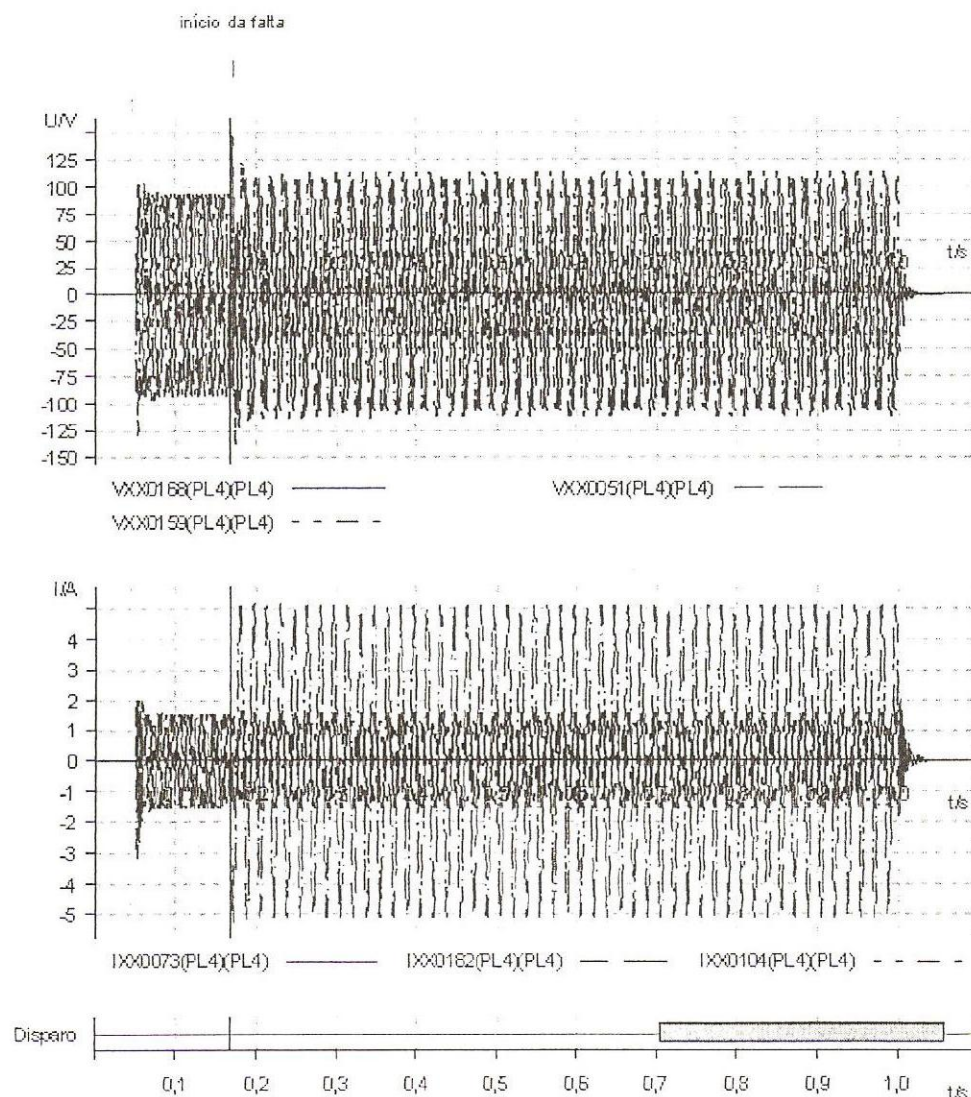


Fig. 4.22 – Registro de gráficos de tensão e corrente captados pelo programa do simulador, para uma falta hipotética no fim da LT 02F5 DSR/CRB simulada no ATP, para assimetria nula

Conforme pode ser visto nas figuras 4.21 e 4.22, os tempos de disparo do relé, para máxima e mínima assimetria, são respectivamente 536,8 e 530 ms. Tal situação pode ser explicada devido ao fato de que para defeitos ocorridos no fim da linha em questão, a zona do relé a ser sensibilizada é a segunda, sendo esta graduada com um tempo de disparo de 500 ms (esse

tempo foi escolhido apenas para uso na pesquisa). Para defeitos ocorridos na zona 2, os efeitos transitórios já não são relevantes, pois para um tempo de 500 ms os sinais envolvidos já se encontram em regime permanente. Com relação à distância da falta calculada pelo relé, o algoritmo existente na lógica do relé não conseguiu determinar a localização do defeito, simulada na falta com máxima assimetria (Fig. 4.20). Entretanto, para o segundo caso, a distância calculada pelo equipamento foi de 41,99 km (Fig. 4.23), resultando num erro de 3,79%.

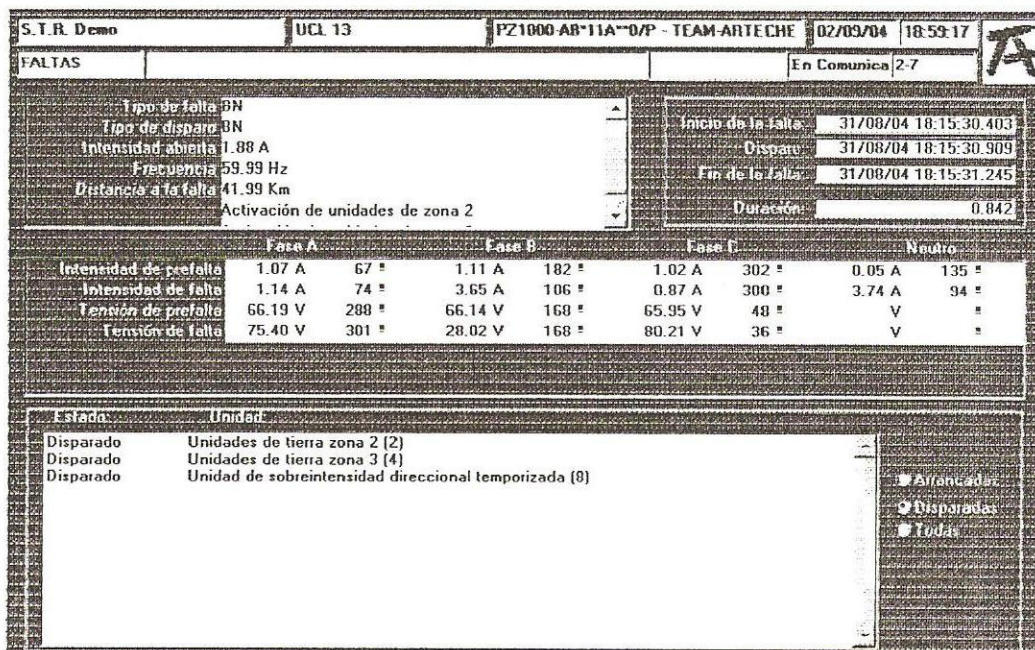


Fig. 4.23 – Falta monofásica com assimetria nula no fim da linha, registrada pelo relé PZ1000

Com relação às correntes de falta, o programa CAPE calculou um valor de 3,56 A_{rms} secundários. Assim. Os erros obtidos ao se confrontar os resultados da metodologia clássica com aqueles obtidos pelo ATP se encontram na faixa de 1,1% para assimetria máxima (3,60 A_{rms} secundários, ver Fig. 4.20) e 2,46% para assimetria nula (3,65 A_{rms} secundários, ver Fig. 4.23).

4.5.5. Simulação de falta bifásica-terra hipotética no fim da linha de transmissão Governador Dix-Sept Rosado Caraúbas (LT 02F5 DSR/CRB)

Dando continuidade à pesquisa, foi desenvolvida uma falta bifásica terra (impedância de falta 5Ω), envolvendo as fases A e C, no final da LT 02F5 DSR/CRB. A Fig. 4.24 ilustra o registro do curto-circuito. Comparando a distância proposta para a simulação da falta no ATP com aquela calculada pelo relé, constata-se que este último determinou que a falta em questão ocorreu no quilômetro 42,02, o que equivale a um erro de 3,86%. A oscilografia do defeito é apresentada na Fig. 4.25. Como a falta aconteceu no fim da linha, foi sensibilizada a segunda zona num tempo de 535,2 ms (mais uma vez os efeitos transitórios são irrelevantes).

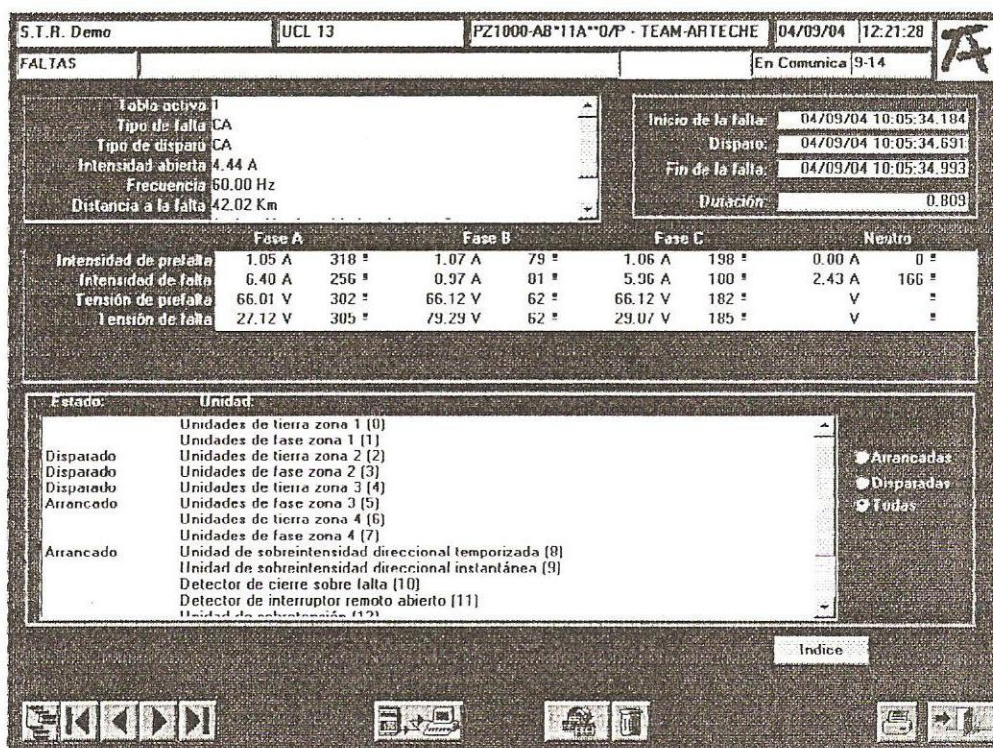


Fig. 4.24 – Falta bifásica-terra no fim da linha, registrada pelo relé PZ1000

Condição do Estado:

No	Nome	Ignorar antes	Iniciar	Parar	Tnom [s]	Tdesv- [s]	Tdesv+ [s]	treal [s]	Tdesv [s]	Aval.
f (1)		Início da falta	Início da falta	Disparo 0>1				0,5352		o

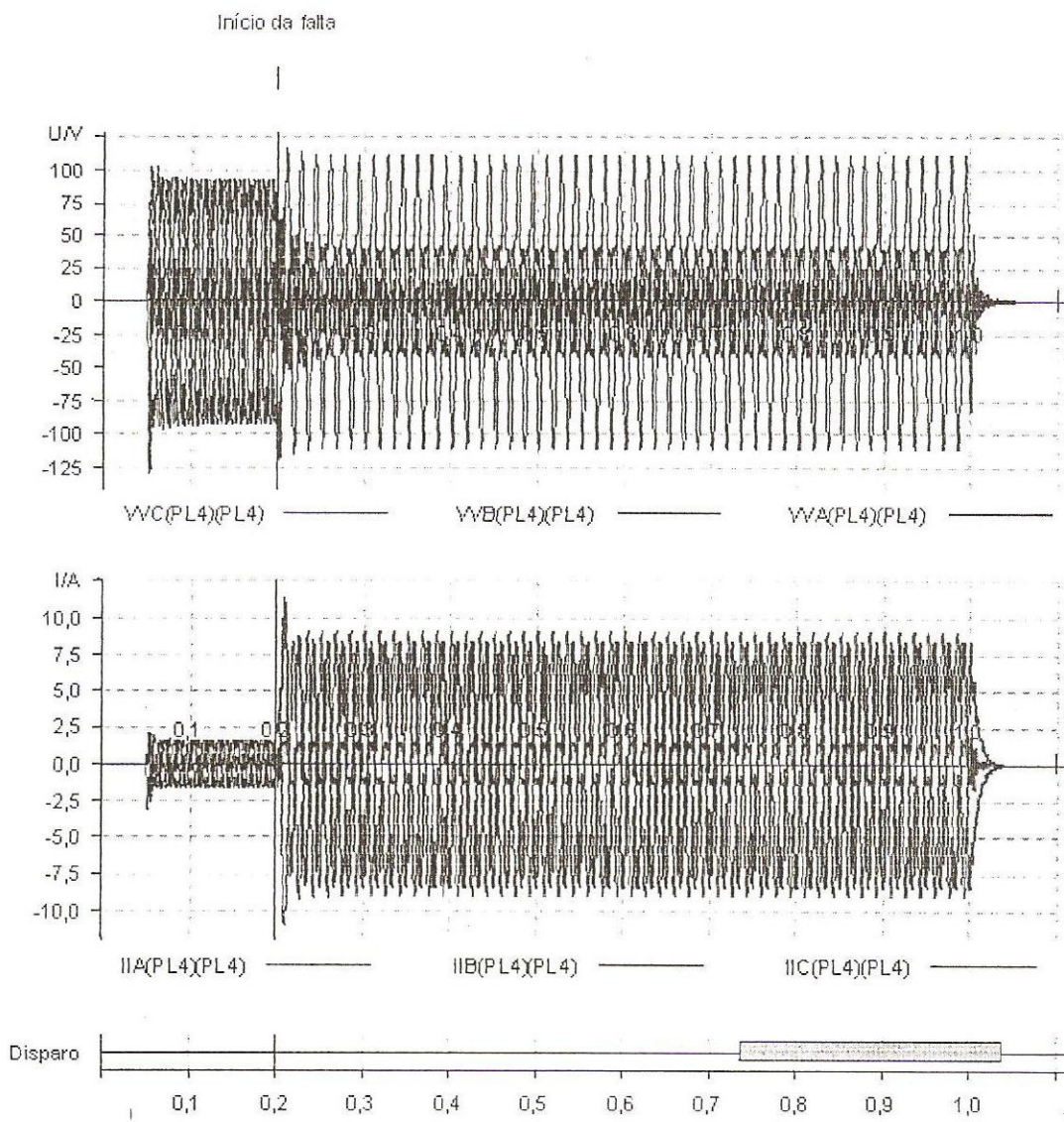


Fig. 4.25 – Registro de gráficos de tensão e corrente captados pelo programa do simulador, para uma falta hipotética bifásica-terra no fim da LT 02F5 DSR/CRB simulada no ATP

Em termos de valores de curto-circuito, o CAPE obteve 6,18 A_{rms} secundários para fase A e 5,97 A_{rms} secundários para fase C. Os valores registrados pelo relé foram, conforme a Fig. 4.25, 6,40 A_{rms} secundários para

fase A e 5,96 A_{rms} secundários para fase C, o que resulta erros de 3,43% e 0,16% para as fases A e C, respectivamente.

4.5.6. Simulação de falta trifásica hipotética no fim da linha de transmissão Governador Dix-Sept Rosado Caraúbas (LT 02F5 DSR/CRB)

A última falta a ser testada é do tipo trifásica, sem resistência de arco, também localizada no fim da LT 02F5 DSR/CRB. Nessa situação, conforme pode ser observado na Fig. 4.26, a distância calculada pelo equipamento de proteção resultou em um valor de 40,2 km. Comparando com a falta simulada no ATP, o erro resultante se situa próximo a 0,5% o que comprova mais uma vez a eficácia do método empregado na pesquisa.

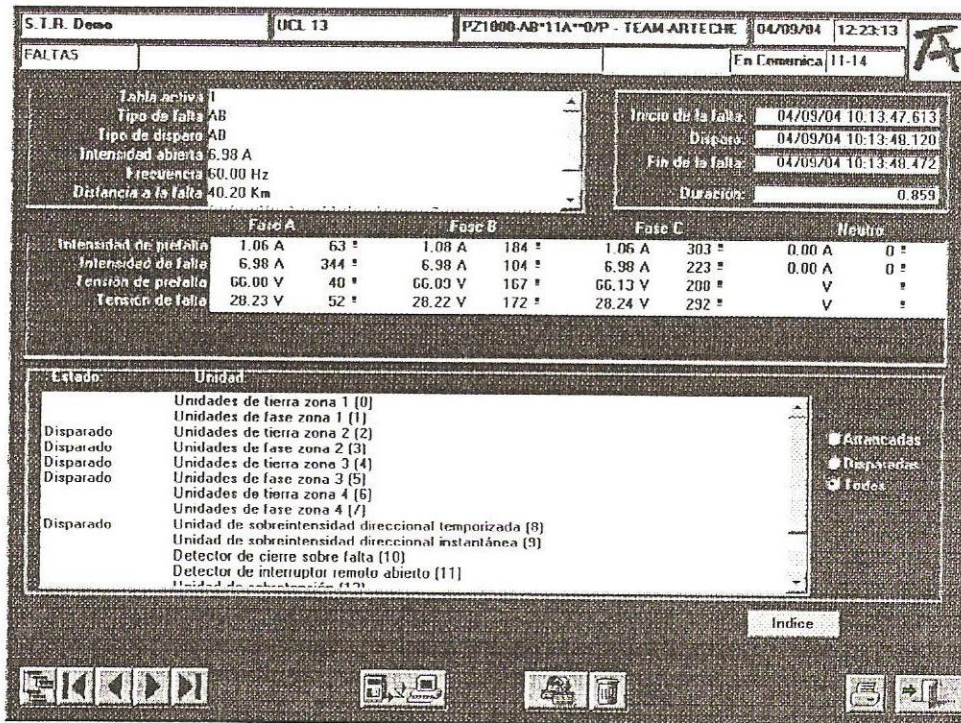


Fig. 4.26 – Falta trifásica no fim da linha, registrada pelo rele PZ1000

Em relação ao tempo de disparo (*trip* do relé), verifica-se, na tabela posicionada sob os gráficos, que este aconteceu 535,5 ms após a origem do defeito, caracterizando uma perfeita atuação do equipamento devido à falta ter

acontecido na 2ª zona de proteção do relé (ver Fig. 4.27). Novamente, os efeitos transitórios tornam-se irrelevantes, pois no tempo de abertura, o sistema já havia atingido o regime permanente.

Condição do Estado:

No	Nome	Ignorar antes	Iniciar	Parar	Tnom [s]	Tdesv- [s]	Tdesv+ [s]	treal [s]	Tdesv [s]	Aval.
1 (1)		Início da falta	Início da falta	Disparo 0>1				0,5355		o

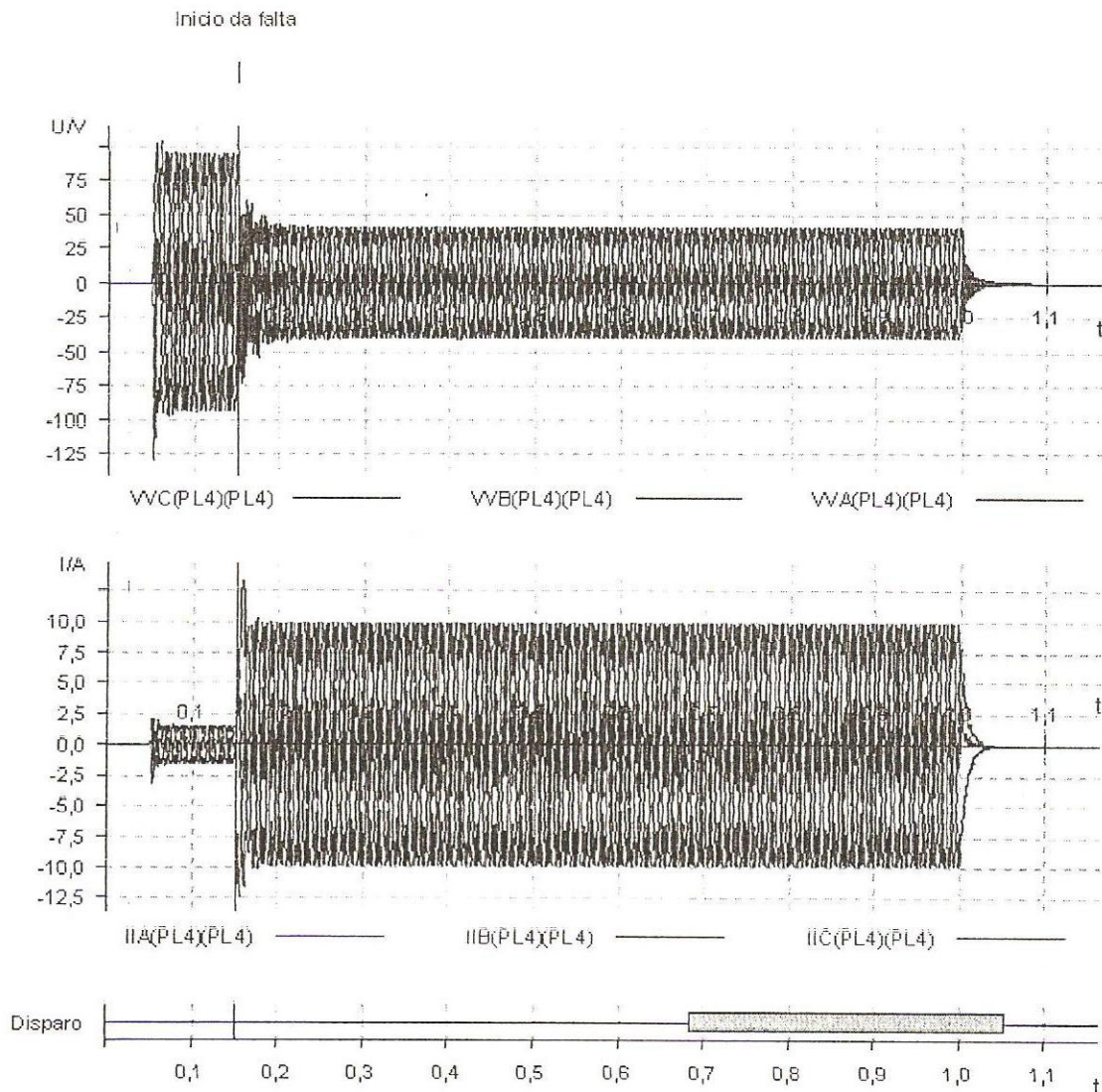


Fig. 4.27 – Registro de gráficos de tensão e corrente captados pelo programa do simulador, para uma falta hipotética trifásica no fim da LT 02F5 DSR/CRB simulada no ATP

O programa CAPE calculou, para a mesma falta trifásica simulada no ATP, um valor de corrente de curto-circuito de 6,88 A_{rms} secundários. Já o ATP calculou 6,90 A_{rms} secundários (ver Fig. 4.26). Comparando os resultados dos dois métodos, o erro apresentado é aproximadamente 0,28%.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Ao longo dos capítulos anteriores procurou-se enfatizar a importância do setor de planejamento numa empresa do setor elétrico, ressaltando que esse departamento necessita de informações e ferramentas adequadas para dar suporte a estudos como fluxo de carga e análise de curtos-circuitos. Entretanto, com a privatização das concessionárias, temas como qualidade da energia se encontram cada vez mais sedimentados nas mentes dos consumidores e novos modelos devem ser adotados para melhorar os estudos pré-operacionais das empresas.

Assim, foi concebido um modelo no ATP capaz de servir como ferramenta para analisar os critérios de regime permanente, fluxo de carga e curto-circuito, sem esquecer da abordagem transitória indispensável para averiguar a qualidade da energia. A modelagem desenvolvida proporcionou resultados satisfatórios, pois na comparação entre os resultados alcançados pelo fluxo de carga e o ATP, os erros obtidos para o fluxo de potência, em linhas de transmissão e transformadores de força, atingiram um valor máximo de 4,03%, e os erros para tensão nos barramentos das subestações alcançaram um patamar máximo de 0,86%. Com relação aos curtos-circuitos, o método empregado proporcionou grande fidelidade que pôde ser comprovada através da comparação das amplitudes das correntes de faltas geradas pelo ATP com as amplitudes das correntes de faltas reais registradas pelos relés (erros de 0,25% para falta real na LT DSR/CRB e 1,46% para falta real na LT CRB/AAF) e com as amplitudes das faltas hipotéticas simuladas no CAPE (erro

máximo de 3,43%). Além disso, um outro fator que comprovou a veracidade do modelo desenvolvido para estudos de curto-circuito foi o erro entre a distância que as faltas foram simuladas no ATP e a distância mensurada pelo relé (erro máximo de 6%). Finalmente, com a tecnologia presente na COSERN, foram pesquisadas possíveis atuações dos relés microprocessados sob condições de falta simuladas no ATP, sendo verificada a necessidade de extensão do tempo de disparo dos relés de distância, em 1ª zona, de 0 para 50 ms. Outro fator positivo é que faltas hipotéticas puderam ser simuladas, avaliando assim o desempenho dos relés, diversificando os critérios utilizados na Empresa no que diz respeito à calibração desses equipamentos protetores.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se buscar uma forma de melhorar os parâmetros envolvidos no modelo, o que pode se refletir na implementação de testes para relés de subtensão, diferenciais, etc. Além disso, vale a pena realizar simulações das condições de falta com elevada impedância, para testar o desempenho dos relés de proteção nessas condições. Finalmente, é possível desenvolver em parceria com a COSERN, um algoritmo capaz de realizar estimativa de defeitos com altíssima precisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMON, J. F.; PEREIRA, M. P. "**Atp – Alternative Transient Program. Curso Básico sobre a Utilização do Atp**", CLAUÉ - Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP, [S.l.: s.n.], 1996.

CAMINHA, A. C. **Introdução à proteção de sistemas elétricos**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 1977.

CÂMARA, P. C. S. **Implementação de um algoritmo para a análise de curtos-circuitos de alta impedância baseado no fluxo de carga soma de potências**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal: [s.n.], 2002.

COLEÇÃO DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA. **Planejamento de Sistemas de Distribuição, Volume 1**. Rio de Janeiro: Ed. CAMPUS/ELETOBRÁS, 1982.

DA SILVEIRA, P. M.; DE CARVALHO FILHO, J. M.; Guimarães, C. A. M. **Apostila de seletividade e coordenação da proteção de sistemas elétricos** da Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria – FUPAI: Itajubá, 2002.

DE ALMEIDA, M. A. D. **Apostila de proteção de sistemas elétricos**. Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal: [s.n.], 1999.

DE OLIVEIRA, J. T. **Elementos básicos de análise de sistemas de potência**. Apostila da disciplina de Análise de sistemas de potência, curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal: [s.n.], 1998.

GIGUER, S. **Proteção de Sistemas de Distribuição**. Porto Alegre: Ed. Sagra,

DE OLIVEIRA, J. T.; DA COSTA OLIVEIRA, A. V.; LIMA, C. E. G. **Transient analysis in a factory powered with inverted sequence phase**. In: INDUSCON, 5., 2002, Salvador.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 6. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2002.

MASON, C. R. **The art and science of protection relaying**. Ed. John Wiley, 1956.

MONTICELLI, A. **Fluxo de carga em redes energia elétrica**. São Paulo: CEPEL, ELETROBRÁS, Ed. Edgard Blucher, 1983.

NAIDU, S.R. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. Campina Grande: ELETROBRÁS/UFPB, Ed. Grafset, 1985.

OMICRON. **Advanced protection package**. [S.l.: s.n.], 2001.

ROBBA, E. J. **Introdução a Sistemas Elétricos de Potência: Componentes Simétricas**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 1973.

STEVESON JUNIOR, W. D. **Elementos de análise de Sistemas de Potência**. São Paulo: Ed. McGRAW-HILL, 1974.

TINNEY, W. F., HART, C. E. **Power flow solution by Newton's method**. PAS. 86. [S.I.], IEEE Transactions on power apparatus and systems, 1967.

APÊNDICE A

MODELOS DISPONÍVEIS NO ATP

A.1. ELEMENTOS CONCENTRADOS

É possível a representação de resistências, indutâncias e capacitâncias sem acoplamento entre fases, como indicado na Fig. A.1. Estes elementos podem ser conectados em qualquer disposição formando componentes de filtros, bancos de capacitores, reatores de linha, equivalentes de rede, etc.

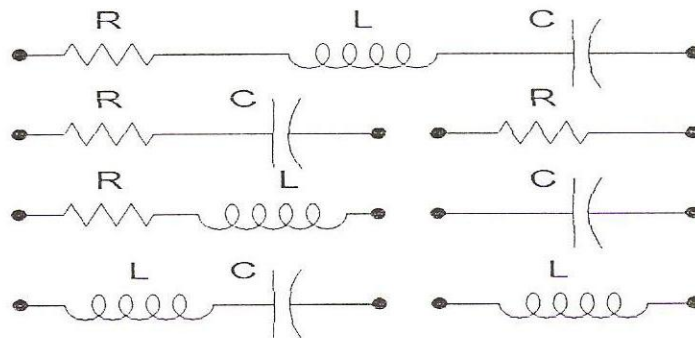


Fig. A.1 – Resistências, Indutâncias e Capacitâncias

A.2. PI -EQUIVALENTES POLIFÁSICOS

Um elemento do tipo PI - equivalente com acoplamento entre fases, para qualquer número de fases, pode ser representado, tal como indicado na Fig. A.2 para um circuito trifásico, por exemplo.

A finalidade principal do elemento PI - equivalente está na representação de linhas de transmissão onde este tipo de modelagem é aceitável.

Para utilização somente na solução de regime permanente, existe uma opção chamada de *cascaded PI*, a qual consiste na associação de vários PI's em série, sendo permitida a inclusão de elementos em série ou em derivação. Esse modelo foi desenvolvido para aplicação em estudos de circulação de correntes em cabos pára-raios, onde é necessária uma representação detalhada de cada vão de linha.

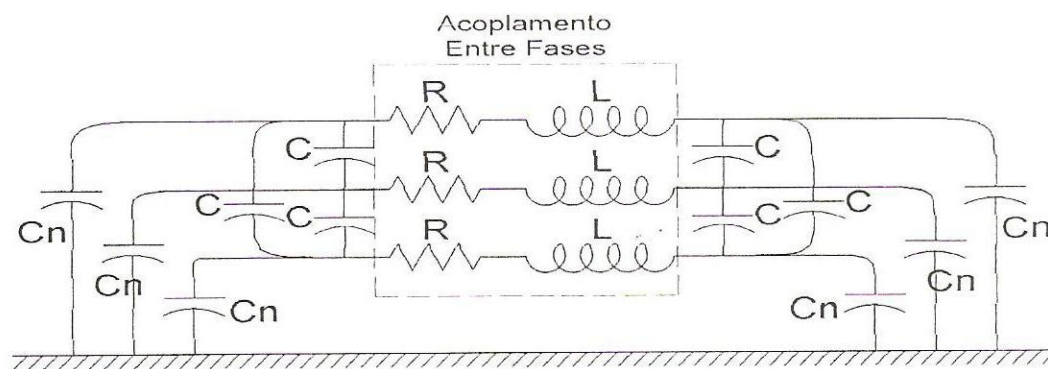


Fig. A.2 - PI - Equivalente

A.3. TRANSFORMADORES

Transformadores monofásicos com vários enrolamentos podem ser representados conforme o circuito equivalente mostrado na Fig. A.3. São representadas as impedâncias de dispersão de cada enrolamento, o ramo magnetizante com saturação e perdas no núcleo e a relação de transformação entre enrolamentos.

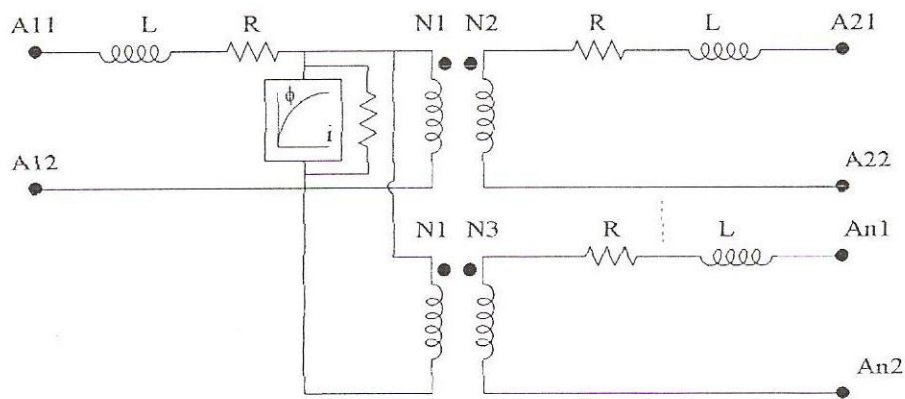


Fig. A.3 - Circuito Equivalente para um Transformador de N Enrolamentos

O ramo magnetizante pode ser ignorado e conectado em qualquer terminal utilizando-se um outro modelo do programa. Esse outro modelo pode ser conectado inclusive no mesmo ponto do circuito original e pode ser um indutor não linear ou um indutor não linear com histerese.

A característica de magnetização de transformadores é de modelagem muito difícil e se constitui num dos problemas mais complexos na simulação de transitórios eletromagnéticos, principalmente quando os resultados são fortemente dependentes da geração de harmônicos e envolvendo transitórios de longa duração. Os exemplos mais apropriados para estes tipos de transitórios são os transitórios decorrentes de energização de transformadores, ocorrência e eliminação de defeitos e rejeição de carga.

É importante ressaltar que a própria determinação de curva de histerese de um transformador é bastante complexa, seja por medições ou por cálculos, não havendo nenhuma informação disponível sobre o comportamento transitório desta característica que possa ser utilizada de forma confiável em estudos de transitórios. Estes problemas são de certa forma reduzidos na sua importância porque a relação entre o fluxo e a frequência é uma relação inversamente proporcional e, portanto, o efeito da saturação perde a sua importância à medida que a frequência aumenta.

Os transformadores monofásicos podem ser conectados de forma a constituir um transformador trifásico, inclusive respeitando-se as ligações de cada enrolamento.

A.4. LINHAS DE TRANSMISSÃO

Os modelos de linhas de transmissão disponíveis no ATP são bastante flexíveis e atendem às necessidades mais freqüentes dos estudos de transitórios.

As linhas de transmissão podem ser representadas por uma cadeia de PI's ou por parâmetros distribuídos, opção esta que pode ser desdobrada em várias alternativas.

A quantidade de seções de linhas necessárias depende do grau de distorção que pode ser admitido no estudo a ser realizado, sendo muito importante à faixa de freqüências provocada pelo fenômeno em análise. Uma quantidade maior de elementos produz menos distorção e vice-versa.

Na prática, a determinação da quantidade de seções de linha tem se baseado na grande experiência acumulada com este tipo de representação e é usual se adotar uma seção de linha a cada 15 ou 30 km, conforme o comprimento total da linha e o estudo a ser realizado.

A representação por parâmetros distribuídos pode ser efetuada com ou sem variação dos parâmetros com a freqüência.

As linhas modeladas por parâmetros distribuídos à freqüência constante podem ser do tipo "sem distorção" ou do tipo "com distorção". No primeiro tipo apenas os parâmetros L e C da linha são considerados e no segundo tipo a resistência da linha é adicional, sendo 25% em cada extremidade e 50% no meio da linha. Estudos realizados demonstraram que a subdivisão da linha em mais pontos não se mostrou necessária. Este procedimento simplifica acentuadamente as equações de propagação na linha.

Na prática, os modelos de linhas com parâmetros distribuídos apresentam resultados plenamente satisfatórios e são utilizados na maioria dos estudos de transitórios em sistemas elétricos, não sendo essencial à utilização de modelos com parâmetros variando com a freqüência.

A.5. CHAVES

O programa ATP contém uma variedade muito grande de modelos de chaves. A seqüência de chaveamento é que define o tipo de estudo a ser efetuado, inclusive no que se refere à facilidade de tratamento das informações obtidas do cálculo de transitórios propriamente dito.

Podem ser representadas chaves de tempo controlado, chaves estatísticas, chaves sistemáticas, chaves controladas por tensão ou por sinais, bem como chaves de medição.

As chaves de tempo controlado podem efetuar as operações de fechamento e de abertura em tempos especificados pelo usuário. Estas operações são realizadas uma única vez, sendo que a abertura ocorre nos zeros de corrente ou conforme uma determinada margem de corrente. Estas chaves simulam o comportamento de um disjuntor, com exceção do arco elétrico entre contatos, e podem ser dispostas de modo a representar também resistores de pré-inserção na abertura ou no fechamento.

As chaves estatísticas e as sistemáticas são utilizadas para simular o disjuntor considerando-se também a dispersão existente entre os tempos de fechamento de cada contato. As estatísticas têm os tempos de fechamento gerados conforme uma distribuição estatística do tipo normal ou do tipo uniforme, cujos parâmetros (tempo médio e desvio padrão) são definidos pelo usuário. Podem ser utilizadas para os contatos principais e para os contatos auxiliares do disjuntor. As sistemáticas executam a mesma função, porém com tempos de fechamento gerados de acordo com uma determinada lei de formação.

Tanto as chaves estatísticas quanto as chaves sistemáticas são utilizadas para uma única operação de fechamento e existe a possibilidade de uma chave estar relacionada com uma outra chave estatística (os tempos de fechamento são gerados aleatoriamente a partir dos tempos de fechamento de uma outra chave estatística). É possível ainda que a abertura de uma chave seja estatística.

As chaves controladas por tensão tem uma determinada seqüência de operação especificada pelo usuário de modo que a chave, estando originalmente aberta, feche após um tempo superior a um determinado tempo, desde que a tensão através da chave seja superior ao valor estabelecido pelo usuário. Após o fechamento é decorrido um intervalo de tempo para a abertura dentro da margem de corrente pré-fixada. Esta seqüência permanente efetiva durante a simulação.

As chaves controladas por sinais são aquelas que recebem sinais provenientes da TACS e cuja função principal se refere à simulação de diodos e tiristores.

As chaves de medição são aquelas que se encontram permanentemente fechadas e cuja finalidade é somente a de monitorar corrente e energia ou potência.

Podem ser utilizadas combinações das chaves descritas acima de diversas formas de modo a atender às necessidades do estudo.

Uma das aplicações mais interessantes é a utilização de chaves estatísticas para a determinação de uma distribuição de sobretensões decorrentes de uma determinada manobra numa linha de transmissão, energização ou religamento, sendo usual distribuições provenientes de 50 ou 100 chaveamentos. Estes números para levantamento de distribuições estatísticas normalmente requerem tempos de processamento bastante elevados.

A.6. FONTES

O programa permite representação de fontes de excitação, em tensão ou corrente, as quais são definidas analiticamente dentro do programa.

É possível a simulação de fontes de excitação com formas de onda conforme indicado na Fig. A.4.

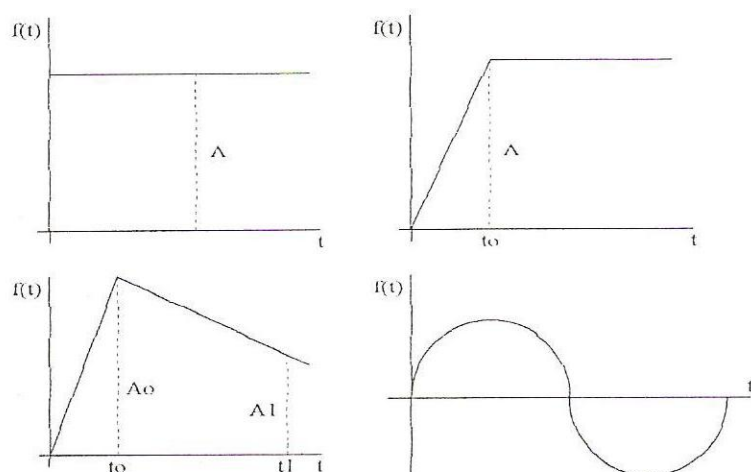


Fig. A.4 – Formas de Onda Básicas das Fontes de Excitação

A associação de duas ou mais das fontes indicadas na Figura A.4 permite a representação de uma função composta, por exemplo, como a indicada na Fig. A.5.

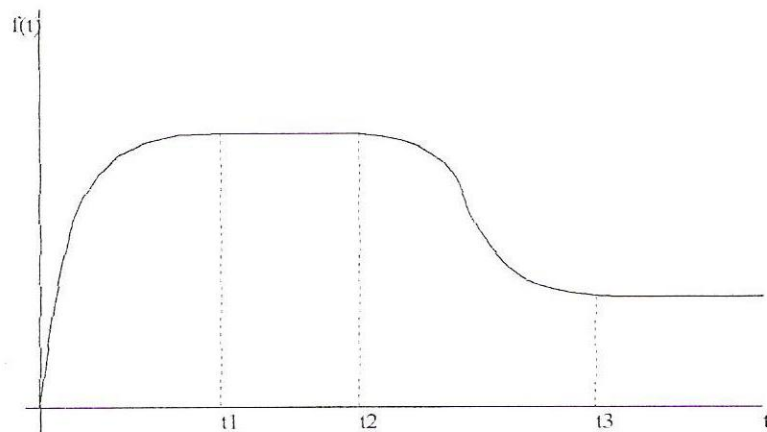


Fig. A.5 – Forma de Onda Composta

O usuário tem ainda a opção de definir suas próprias fontes de excitação, seja ponto a ponto, ou através da sub-rotina TACS ou então através de comandos em FORTRAN.

APÊNDICE B

CÁLCULO DE FLUXO DE CARGA

B.1. EQUAÇÕES BÁSICAS DE FLUXO DE CARGA

Considere o sistema apresentado na figura abaixo:

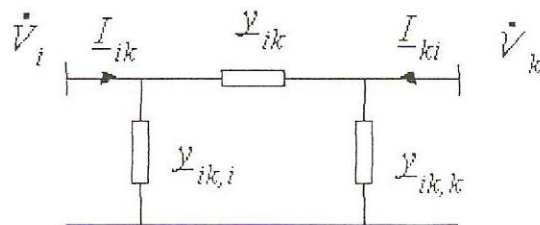


Fig. B.1 – Circuito π equivalente

Baseado em tal circuito, é possível deduzir as equações básicas de fluxo de carga. Tais expressões são:

$$P_i - jQ_i = \dot{V}_i^* \sum_{k=1}^n Y_{ik} \dot{V}_k \quad (1)$$

$$S_{ik} = \dot{V}_i \frac{\left(\dot{V}_i^* - \dot{V}_k^* \right)}{Z_{ik}^*} + \left| \dot{V}_i \right|^2 y_{ik,i}^* \quad (2)$$

Onde,

- V_i : Tensão na barra i do sistema;
 V_k : Tensão na barra k do sistema;
 Y_{ik} : Admitância entre as barras i e k ;
 $Y_{ik,i}$: Admitância entre a barra i e a terra;
 $Y_{ik,k}$: Admitância entre a barra k e a terra;
 S_{ik} : Potência aparente entre as barras i e k ;
 P_i : Potência ativa na barra i ;
 Q_i : Potência reativa na barra i ;

A partir das expressões apresentadas, é possível perceber que estas são não lineares, o que torna impossível resolvê-las usando os procedimentos diretos de análise de malhas ou de análise nodal, usuais na teoria de circuitos. Assim, é necessário utilizar processos iterativos de cálculo numérico para solucionar este problema. Como exemplo de tais processos, é possível citar: Gauss-Seidel, Newton-Raphson, Newton-Raphson desacoplado rápido, sendo apenas o segundo focado no presente trabalho.

B.2. O MÉTODO NEWTON-RAPHSON

Observe a expressão abaixo.

$$\begin{bmatrix} [\Delta P] \\ \dots \\ [\Delta Q] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [H] & \vdots & [N] \\ \dots & \dots & \dots \\ [J] & \vdots & [L] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\Delta \delta] \\ \dots \\ [\Delta V/V] \end{bmatrix}$$

O método de Newton-Raphson convergirá, quando a os resíduos ΔP e ΔQ apresentarem valores inferiores ao valor estipulado para tolerância (geralmente 0,005). Os resíduos são calculados usando as seguintes expressões:

$$\begin{cases} \Delta P = P^{esp} - P^{cal} \\ \Delta Q = Q^{esp} - Q^{cal} \end{cases}$$

Os valores de P^{esp} e Q^{esp} são constantes. Já as expressões para as potências calculadas são:

$$\begin{cases} P_i^{cal} = \sum_{k=1}^n V_i V_k (G_{ik} \cos \alpha - B_{ik} \sin \alpha) \\ Q_i^{cal} = -\sum_{k=1}^n V_i V_k (B_{ik} \cos \alpha + G_{ik} \sin \alpha) \end{cases}$$

As submatrizes [H], [N], [J] e [L] são parâmetros de sensibilidade componentes da matriz Jacobiana. As expressões para tais parâmetros diferem para cada submatriz, apresentadas abaixo.

a) Submatriz [H]

- Elementos da diagonal principal

$$H_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{k \in \Omega_i} V_i V_k (-G_{ik} \sin \alpha + B_{ik} \cos \alpha) \Rightarrow \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -V_i^2 B_{ii} - Q_i^{cal}$$

- Elementos de fora da diagonal principal

$$H_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} = +V_i V_k (G_{ik} \sin \alpha - B_{ik} \cos \alpha)$$

b) Submatriz [N]

- Elementos da diagonal principal

$$N_{ii} = V_i \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 2V_i^2 G_{ii} + \sum_{k \in \Omega_i} V_i V_k (G_{ik} \cos \alpha + B_{ik} \sin \alpha) \Rightarrow V_i \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = V_i^2 G_{ii} + P_i^{cal}$$

- Elementos de fora da diagonal principal

$$N_{ik} = V_k \frac{\partial P_i}{\partial V_k} = V_i V_k (G_{ik} \cos \alpha + B_{ik} \sin \alpha)$$

c) Submatriz [J]

- Elementos da diagonal principal

$$J_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{k \in \Omega_i} V_i V_k (G_{ik} \cos \alpha + B_{ik} \sin \alpha) \Rightarrow \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -V_i^2 G_{ii} + P_i^{cal}$$

- Elementos de fora da diagonal principal

$$J_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_k} = V_i V_k (-G_{ik} \cos \alpha - B_{ik} \sin \alpha)$$

d) Submatriz [L]

- Elementos da diagonal principal

$$L_{ii} = V_i \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -2B_{ii} V_i + \sum_{k \in \Omega_i} V_i V_k (G_{ik} \sin \alpha - B_{ik} \cos \alpha) \Rightarrow V_i \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -V_i^2 B_{ii} + Q_i^{cal}$$

- Elementos de fora da diagonal principal

$$L_{ik} = V_j \frac{\partial Q_i}{\partial V_k} = V_i V_k (G_{ik} \operatorname{sen} \alpha - B_{ik} \operatorname{cos} \alpha)$$

Uma vez apresentados elementos que compõem a matriz a Jacobiana, é possível fazer algumas considerações objetivando diminuir o tamanho desta. Originalmente a matriz Jacobiana é composta por $2n \times 2n$ elementos (onde n é o nº de barras do sistema). Considerando a existência de uma barra slack, é possível eliminar as linhas (1ª linha de ΔP e ΔQ) e a coluna referida a esta barra, uma vez que, previamente, são conhecidos os valores relativos a tensão (módulo e fase) neste componente. Se houver s barras de tensão controladas no sistema, é necessário deletar a equação correspondente a Q_k (é especificada a tensão nesse tipo de barra). Assim, a dimensão da matriz Jacobiana passa a ser $2(n-1) - s$.

O algoritmo a ser aplicado é apresentado a seguir:

- 1- Fazer $i=0$ e escolher os valores iniciais dos ângulos das tensões das barras PQ e PV ($\theta = \theta^0$), e as magnitudes das tensões das barras PQ ($V = V^0$);
- 2- Calcular $P_k(V^i, \theta^i)$ para as barras PQ e PV, e $Q_k(V^i, \theta^i)$ para as barras PQ e determinar os resíduos ΔP_k^i e ΔQ_k^i ;
- 3- Testar convergência: se $\operatorname{Max}\{|\Delta P_k^i|\} \leq \varepsilon_P$ e $\operatorname{Max}\{|\Delta Q_k^i|\} \leq \varepsilon_Q$, o processo iterativo convergiu para a solução (V^i, θ^i) ; caso contrário passar para o item 4;
- 4- Calcular a matriz Jacobiana;
- 5- Determinar a nova solução $(\underline{V}^{i+1}, \underline{\theta}^{i+1})$:

$$\underline{\theta}^{i+1} = \underline{\theta}^i + \underline{\Delta \theta}^i$$

$$\underline{V}^{i+1} = \underline{V}^i + \underline{\Delta V}^i$$

Fazer $i=i+1$ e voltar ao passo 2.

APÊNDICE C

DADOS DOS SISTEMAS UTILIZADOS PARA SIMULAÇÕES

C.1. SISTEMA REGIONAL AÇU II

Tabela C.1 – Dados das barras de cada uma das subestações do regional Açú II

Nº	Nome	Nível de Tensão (kV)	Potência ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)	Banco de Capacitores (MVar)
1	Açú II	69	0,00	0,00	0,00
2	Macau	69	0,00	0,00	15,00
3	Pendências	69	0,00	0,00	0,00
4	Estreito	69	0,00	0,00	0,00
5	Alto do Rodrigues	69	7,60	1,95	0,00
6	Ubarana	69	22,70	7,30	0,00
7	Potiporã	69	1,00	0,25	0,00
8	Macau	13,8	6,33	3,58	3,74
9	Pendências	13,8	7,38	3,14	6,12
10	Estreito	13,8	10,18	7,50	6,10

Tabela C.2 – Dados das linhas do sistema regional Açú II

Da barra Nº	Para Barra nº	R_1 (pu)	R_0 (p.u.)	X_1 (p.u.)	X_0 (p.u.)	$B_1/2$ (p.u.)	$B_0/2$ (p.u.)	Tap Trafo
1	2	0,1380	0,3788	0,6056	2,3017	0,01136	0,00631	
1	3	0,3562	0,5283	0,5246	1,7370	0,00748	0,00430	
1	4	0,1074	0,2079	0,2605	0,9679	0,00455	0,00257	
4	5	0,0463	0,0896	0,1124	0,4174	0,00196	0,00111	
5	3	0,0563	0,1090	0,1366	0,5074	0,00238	0,00135	
3	2	0,1700	0,2521	0,2504	0,8289	0,00357	0,00205	

2	6	0,1028	0,1998	0,2694	0,9532	0,00416	0,00241	
3	7	0,0549	0,1062	0,1332	0,4948	0,00232	0,00131	
2	8	0,00	0,00	0,759	0,00	0,00	0,00	0,975
2	8	0,00	0,00	1,28	0,00	0,00	0,00	0,975
3	9	0,00	0,00	0,762	0,00	0,00	0,00	0,975
3	9	0,00	0,00	1,26	0,00	0,00	0,00	0,975
4	10	0,00	0,00	0,737	0,00	0,00	0,00	1,00
4	10	0,00	0,00	1,398	0,00	0,00	0,00	1,00

C.2. SISTEMA REGIONAL MOSSORÓ II

Tabela C.3 – Dados das barras de cada uma das subestações do regional
Mossoró II

Nº	Nome	Nível de Tensão (kV)	Potência ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)	Banco de Capacitores (MVar)
01	Mossoró II	69	0,0	0,00	0,00
02	Gangorra	69	0,0	0,00	0,00
03	Gangorra	13,8	3,11	1,68	0,00
04	Grossos	69	0,00	0,00	0,00
05	Grossos	13,8	1,42	0,77	1,20
06	Mossoró I	69	0,00	0,00	0,00
07	Serra Vermelha	69	0,00	0,00	0,00
08	Serra Vermelha	13,8	5,45	2,64	4,08
09	Mossoró I	13,8	15,53	8,38	8,14
10	Mossoró III	69	0,00	0,00	0,00
11	Mossoró III	13,8	20,76	12,87	12,20
12	Baraúna	69	0,00	0,00	0,00
13	Baraúna	13,8	5,19	2,21	1,02
14	Itapetinga	69	2,20	0,45	0,00
15	Máisa	69	0,00	0,00	0,00
16	Máisa	13,8	1,27	0,62	1,02
17	Canto Amaro	69	11,99	5,81	0,00
18	D.S. Rosado	69	0,00	0,00	0,00
19	D.S. Rosado	13,8	3,77	2,24	4,08
20	Riacho. da Forquilha	69	2,86	1,39	0,00
21	Caraúbas	69	0,00	0,00	0,00
22	Caraúbas	13,8	2,82	0,57	1,02
23	Apodi	69	0,00	0,00	0,00

24	Apodi	13,8	5,66	1,65	3,60
25	Alm.Afonso	69	0,00	0,00	0,00
26	Alm.Afonso	13,8	6,29	2,07	2,40

Tabela C.4 – Dados das linhas do sistema regional Mossoró II

Da barra Nº	Para Barra nº	R_1 (p.u.)	R_0 (p.u.)	X_1 (p.u.)	X_0 (p.u.)	$B_1/2$ (p.u.)	$B_0/2$ (p.u.)	Tap Trafo
1	2	0,3193	0,4093	0,2895	0,9233	0,00375	0,00219	
2	3	0,0000	0,0000	1,3840	0,0000	0,0000	0,0000	0,95
2	4	0,2074	0,2622	0,1777	0,5443	0,00223	0,00132	
4	5	0,0000	0,0000	1,4760	0,0000	0,0000	0,0000	1,00
1	6	0,0267	0,0517	0,0649	0,2410	0,00113	0,00064	
6	7	0,3429	0,4548	0,3467	1,1356	0,00475	0,00276	
7	8	0,0000	0,0000	0,7490	0,0000	0,0000	0,0000	0,975
6	9	0,0000	0,0000	0,7500	0,0000	0,0000	0,0000	0,975
6	9	0,0000	0,0000	0,7610	0,0000	0,0000	0,0000	0,975
1	10	0,0124	0,0239	0,0297	0,1142	0,00053	0,00028	
6	10	0,0214	0,0589	0,0909	0,3643	0,00183	0,00094	
10	11	0,0000	0,0000	0,6235	0,0000	0,0000	0,0000	0,975
10	11	0,0000	0,0000	0,6490	0,0000	0,0000	0,0000	0,975
10	12	0,1317	0,2550	0,3196	1,1874	0,00558	0,0015	
12	13	0,0000	0,0000	0,7580	0,0000	0,0000	0,0000	0,975
10	14	0,0760	0,0954	0,0643	0,2010	0,00080	0,00047	
1	15	0,3947	0,4954	0,3337	1,0437	0,00415	0,00244	
15	16	0,0000	0,0000	1,476	0,0000	0,0000	0,0000	1,00
15	16	0,0000	0,0000	1,27	0,0000	0,0000	0,0000	1,00
1	17	0,3348	0,4201	0,2830	0,8852	0,00352	0,00207	
1	18	0,1611	0,3117	0,3917	1,4532	0,00683	0,00386	
18	19	0,0000	0,0000	1,366	0,0000	0,0000	0,0000	1,00
18	19	0,0000	0,0000	1,26	0,0000	0,0000	0,0000	1,00
18	20	0,0094	0,1828	0,2291	0,8513	0,0040	0,00226	
18	21	0,1612	0,3121	0,3913	1,4536	0,00683	0,00386	
21	22	0,0000	0,0000	2,860	0,0000	0,0000	0,0000	0,975
21	22	0,0000	0,0000	2,508	0,0000	0,0000	0,0000	0,975
21	23	0,4283	0,5376	0,3621	1,1326	0,0045	0,00265	
23	24	0,0000	0,0000	1,334	0,0000	0,0000	0,0000	0,975
23	24	0,0000	0,0000	1,348	0,0000	0,0000	0,0000	0,975
21	25	0,6578	0,8257	0,5561	1,7396	0,00691	0,00407	
25	26	0,0000	0,0000	0,758	0,0000	0,0000	0,0000	0,925