



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

APLICAÇÃO DO RELÉ DE DISTÂNCIA DIGITAL SEL 311-C

RAFAEL DOS SANTOS FREITAS

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO 2010

APLICAÇÃO DO RELÉ DE DISTÂNCIA DIGITAL SEL 311-C

Rafael dos Santos Freitas

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

Prof. Sebastião E. M. Oliveira, D. Sc.

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

Prof. Ivan Herszterg, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
MARÇO DE 2010

Dedicatória

Dedico este trabalho a todos os brasileiros que com os pesados tributos no qual são submetidos, custearam minha instrução em uma das maiores universidades do mundo. Manifesto através deste espaço, o orgulho da minha nacionalidade e a promessa de utilizar meu conhecimento na melhoria das condições de vida do meu país, diminuindo as desigualdades econômicas e sociais.

Dedico ainda àqueles que jamais deixaram de acreditar que é possível realizar os sonhos, independente das adversidades e do tempo necessário para tal.

Dedico também a todos os meus professores, que cumpriram e cumprem fielmente a responsabilidade de passar o bem mais precioso às gerações futuras, o bem que não pode ser roubado ou retirado de ninguém, o bem que uma vez recebido, perdura para sempre, o bem chamado conhecimento.

Em especial, dedico este trabalho ao professor Alessandro Manzoni que partiu prematuramente desta vida e certamente fará falta ao departamento.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu pais maravilhosos, Ricardo e Maria Neuma. Eles me ensinaram a importância da honestidade e da ética, a sempre perseverar e nunca se esquecer das minhas raízes. Tudo que tenho, devo a seus esforços para aumentar minhas chances de vencer.

Agradeço à minha namorada, Daniele, que me motivou com sua felicidade e acendeu em meu coração uma luz que eu não conhecia. Agradeço também aos meus amigos, Bruno Jannibelli, Raphael Alves, Rodrigo Alves e outros, que há tanto tempo estão ao meu lado sem nunca desistir da minha amizade, mesmo nos instantes em que me afastei. Foi através deles que descobri que o sentimento fraterno pode ser despertado por qualquer pessoa.

Agradeço aos meus tios, avós e primos, que sempre demonstraram o quanto sentiam orgulho de mim, e a todos os profissionais com quem trabalhei, que me mostraram a prática de engenharia e como o período de aprendizado, na realidade, nunca cessa.

Agradeço ao Professor Sebastião E. M. Oliveira por toda a orientação e auxílio que me possibilitaram desenvolver este trabalho e me deram base para ser um bom engenheiro de proteção de sistemas elétricos de potência. Agradeço a ele também pelo fornecimento de grande parte das fontes de pesquisa por mim utilizadas.

Resumo

O trabalho apresentado a seguir demonstra as vantagens da substituição de relés eletromecânicos por relés digitais. Essas melhorias, dentre outras características, permitem a operação da proteção com maior eficácia no desligamento de áreas defeituosas.

O relé analisado é o SEL 311-C do fabricante Schweitzer Electric. Embora esse equipamento permita a concentração de várias funções, aqui será avaliada apenas a sua operação nas funções de distância (função 21 pela norma ANSI), característica principal do relé, e em adição as funções de sobrecorrente direcional temporizada (função 67-51 pela norma ANSI) e proteção contra falha de disjuntor (função 50-62 pela norma ANSI). O equipamento foi ensaiado em bancada com aparelhos altamente precisos, capazes de simular qualquer situação, de modo que os dados apresentados adiante são extremamente confiáveis.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo	3
1.2. Descrição Preliminar do Texto	4
CAPÍTULO 2: CURTOS-CIRCUITOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	6
2.1. Natureza da Corrente de Curto-Circuito	6
2.2. Componentes Simétricas	9
2.3. Tipos de Curto-Circuito	19
2.3.1. Curto-Circuito Trifásico.....	21
2.3.2. Curto-Circuito Monofásico para a Terra	24
2.3.3. Curto-Circuito Bifásico.....	27
2.3.4. Curto-Circuito Bifásico para a Terra	30
2.4. Matrizes de Equações Nodais.....	35
2.4.1. Matriz de Admitâncias Y_{barra}	36
2.4.2. Matriz de Impedâncias Z_{barra}	38
CAPÍTULO 3: RELÉS DE DISTÂNCIA ELETROMECHANICOS	41
3.1. Relé de Impedância.....	41
3.1.1. Ajuste das Zonas de Operação	44
3.2. Relé de Admitância.....	45
3.2.1. Ajuste das Zonas de Operação	49
3.3. Relé de Reatância.....	51
3.3.1. Ajuste das Zonas de Operação	53
CAPÍTULO 4: RELÉ DIGITAL SEL 311-C.....	55
4.1. Funções de Proteção.....	57
4.2. Funções de Medição.....	58
4.3. Funções de Monitoramento	58
4.4. Funções de Controle.....	59
CAPÍTULO 5: EQUIPAMENTOS DE TESTE AUXILIARES	60
5.1. Fonte de Alimentação Trifásica Omicron.....	60
5.1.1. Características Físicas da Mala Omicron CMC 256-6.....	60
5.1.2. Omicron Test Universe	63
5.1.3. Execução de Ensaios com a Omicron CMC 256-6	68
5.1.4. Procedimento para a Geração de Sinais pela Mala CMC 256-6 a Partir de Arquivo Comtrade	69
5.2. Caixa de Simulação de Subestações Triel TRR-01	74
5.2.1. Características Físicas da Caixa Triel TRR-01	74
CAPÍTULO 6: TESTES EM BANCADA DO RELÉ SEL 311-C	77
6.1. Parametrização do Relé SEL 311-C	77
6.2. Execução dos Ensaios	80
6.2.1. Operação da Função de Distância com Simulação de Defeito na Primeira Zona de Atuação do Relé 1	82

6.2.2. Operação da Função de Distância com Simulação de Defeito na Segunda Zona Acelerada de Atuação do Relé 1	88
6.2.3. Operação da Função de Sobrecorrente Direcional do Relé 1	91
6.2.4. Operação da Função de Proteção Contra Falha de Disjuntor do Relé 1	93
6.2.5. Operação da Função de Distância com Simulação de Defeito na Segunda Zona de Atuação do Relé 1 e da Terceira Zona ou Zona Reversa de Atuação do Relé 2	94
CAPÍTULO 7: CONCLUSÃO	100
CAPÍTULO 8: ANEXOS.....	102

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Em um país de dimensões continentais, como o Brasil, a existência de um Sistema Elétrico de Potência (SEP), interligado propicia inúmeros benefícios. Esse sistema é chamado de Sistema Interligado Nacional (SIN) e conecta basicamente todas as regiões do país, tornando assim possível o fluxo de potência de regiões com reserva energética para regiões em sobrecarga. Entretanto, para se obter um funcionamento satisfatório de um sistema deste porte, é necessária não só a coordenação precisa da proteção, mas também a disponibilidade de equipamentos capazes de respondê-la e respeitá-la fielmente.

Uma notável característica do SIN é o fato dos grandes parques geradores localizarem-se afastados dos grandes centros consumidores. Isto ocorre principalmente pelas características da matriz energética nacional, constituída principalmente pela hidroeletricidade. A construção de usinas hidrelétricas depende da disponibilidade hidrográfica de modo que estas podem somente ser construídas nos rios apropriados, mesmo que estes sejam separados centenas de quilômetros de onde a energia será consumida.

A grande extensão das linhas de transmissão acarreta uma exposição maior a fatores externos, como intempéries, que freqüentemente ocasionam problemas como curtos-circuitos. Essas perturbações podem se propagar por todo o sistema, o que provavelmente resultaria na violação de alguma de suas restrições de operação, e conseqüentemente, desligamento de um grande número de consumidores .

Atualmente, as concessionárias responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica são fiscalizadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A função desta agência reguladora é garantir a qualidade dos serviços de concessão, multando as prestadoras quando os indicadores de qualidade do fornecimento não satisfazem a regulamentação. Alguns desses

índices são a tensão e a frequência de fornecimento, o DEC que representa em horas, o tempo médio que cada consumidor ficou privado do fornecimento de energia elétrica e o FEC que representa o número de interrupções, em média, que cada consumidor foi submetido. É interessante então, que as concessionárias dispensem recursos no desenvolvimento de filosofias de proteção eficazes, capazes de desligar o trecho defeituoso e isolar a falta.

A eficácia de um sistema de proteção pode ser mensurada através de cinco princípios:

- **Velocidade** – tempo necessário para o disparo da proteção de acordo com o que foi pré-definido;
- **Seletividade e Coordenação** – capacidade da proteção em isolar o defeito com as menores fronteiras possíveis impedindo que a falta interfira em outros trechos da rede elétrica;
- **Segurança** – redução dos danos oriundos da falta, comumente curtos-circuitos, pela atuação da proteção, reduzindo o risco oferecido a qualquer pessoa em contato ou próxima ao SEP;
- **Sensibilidade** – garantia da operação da proteção em qualquer situação anormal para o qual foi projetado;
- **Confiabilidade** – convicção da operação precisa e correta da proteção unicamente nas condições para o qual foi projetado.

O advento da microeletrônica proporcionou o rápido desenvolvimento da tecnologia digital, onde processos são controlados por programas de computador (softwares e firmwares). Tal avanço permitiu a criação de equipamentos, como relés digitais, que gradativamente ganham espaço e começam a substituir seus antecessores eletromecânicos.

A utilização de relés digitais confere ao esquema de proteção uma melhora significativa em seu desempenho, pois estes tornam possível a otimização de cada uma das

cinco características citadas anteriormente. Além da superioridade operacional destes dispositivos, eles possuem ainda uma série de funções adicionais como o mostrado a seguir:

- Operação como oscilógrafo, que possibilita a análise das grandezas elétricas principais do sistema (tensão, corrente e frequência), antes, durante e após as faltas;
- Monitoramento de estado das chaves seccionadoras e disjuntores;
- Conexão com Unidades Centrais de Controle (UCC), equipamento responsável pela concentração de todas as informações da subestação;
- Comunicação com outros relés similares;
- Medição da tensão, corrente, frequência e potência.

Embora não haja dúvidas sobre as vantagens desses equipamentos, antes de utilizá-los é necessário conhecer o seu funcionamento, pois este já não é intuitivo como nos relés mais antigos. Assim, é importante a realização de ensaios e a produção de fontes de pesquisa sobre o assunto, para que sejam fornecidas a experiência e informação necessárias aos profissionais, para que se utilizem dessa nova tecnologia.

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar a atuação do relé digital SEL 311-C do fabricante Schweitzer Electric, nas funções de distância (função 21 pela norma ANSI), característica principal do relé; sobrecorrente direcional temporizada (função 67-51 pela norma ANSI) e proteção contra falha de disjuntor (função 50-62 pela norma ANSI), visando avaliar a sua confiabilidade e observar as vantagens de sua implantação.

A partir deste projeto, será possível entender as características básicas de funcionamento deste equipamento e serão apresentadas suas possíveis aplicações. Em adição, serão indicados exemplos de aplicação desse relé em subestações reais.

É intuito ainda desta obra apresentar um resumo do processo de programação deste dispositivo, de modo que seja produzido um manual simplificado, permitindo a qualquer leigo operá-lo dentro de sua função básica de proteção.

1.2. Descrição Preliminar do Texto

Esta seção é dedicada a uma descrição da literatura que será desenvolvida neste trabalho, indicando o assunto principal de cada capítulo e suas respectivas referências bibliográficas.

O capítulo 2 faz uma breve apresentação da teoria que envolve os curtos-circuitos em SEPs. Nele é descrita a natureza das correntes de curto-circuito, bem como sua classificação. Também são comentados o método das componentes simétricas e as matrizes de equações nodais, necessários no processo de análise deste tipo de falta. Este segmento do trabalho foi elaborado tomando com base as referências [1], [2], [3], [4] e [5].

No capítulo 3 são apresentados os princípios básicos de funcionamento dos relés de distância eletromecânicos. Nesta seção, estes equipamentos são classificados e são demonstrados os métodos de ajuste de suas zonas de operação conforme as referências [6], [7] e [8].

O objetivo do capítulo 4 é descrever as características físicas e operacionais do relé digital SEL 311-C. As funções de proteção, medição, monitoramento e controle destes dispositivos são sucintamente descritas neste capítulo, com o intuito de possibilitar a

comparação deste com os relés apresentados no capítulo anterior. A informação presente no texto pode ser encontrada na referência [9].

O capítulo 5 disserta sobre os principais equipamentos utilizados nos testes de bancada, a mala de teste Omicron CMC 256-6 e a caixa de simulação de disjuntores Triel TRR-01. A maior parte da informação presente neste capítulo está relacionada à mala CMC 256-6, pois esta retém o maior grau de complexidade na sua operação e sua presença é imprescindível na execução de testes em bancada de relés digitais. É apresentado ainda um roteiro para a execução de testes básicos a partir do software *Omicron Test Universe* e seus aplicativos. Esse capítulo faz referência a três outras publicações: [10], [11] e [12].

Os testes que dão título a este trabalho são descritos no capítulo 6. Nele estão contidos o procedimento experimental e os resultados obtidos nos ensaios do relé SEL 311-C sob ocorrência de defeito monofásico, e ainda o método simplificado de configuração deste equipamento.

CAPÍTULO 2: CURTOS-CIRCUITOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Dentre os tipos de defeito mais comuns nos sistemas elétricos de potência, encontram-se os curtos-circuitos. Eles podem ser ocasionados por inúmeros fatores, o que torna quase todo circuito elétrico vulnerável à sua ocorrência.

Um curto-circuito caracteriza-se pela aplicação de uma diferença de potencial, em Volts, entre dois pontos, relativamente alta quando comparada com a impedância, em Ohms, entre esses mesmos pontos. Este evento acarreta a circulação de elevadas correntes elétricas, da ordem de milhares de Ampéres em se tratando de linhas de transmissão. Tais correntes resultam em efeitos indesejáveis ao sistema como superaquecimento dos condutores e sobrecarga nas estruturas dos circuitos devido aos esforços mecânicos gerados pela atração magnética.

Embora apresentem natureza danosa, os curtos-circuitos apresentam alguma funcionalidade. Através deles é possível a detecção de falhas como a queda de condutores ao solo, que é indicada pela ocorrência de um curto-circuito de uma ou mais fases com a terra.

2.1. Natureza da Corrente de Curto-Circuito

Como já citado, a corrente de curto-circuito atinge elevados valores de acordo com as características da falta. Esses valores são maiores imediatamente após a ocorrência e decrescem com o tempo até atingir o regime permanente.

Para descrever o comportamento da corrente durante a falha, admite-se por hipótese o circuito trifásico equilibrado, representado de maneira unifilar na Figura 2.1.

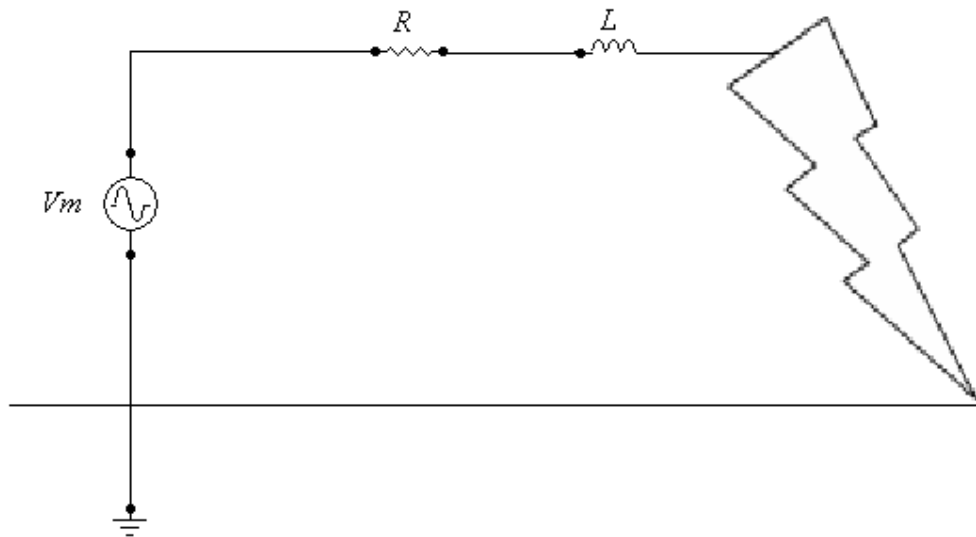


Figura 2.1 – Circuito trifásico em diagrama unifilar sob condição de falta.

A corrente de curto-circuito no ponto indicado será constituída de dois termos: um alternado, correspondente a corrente em regime permanente e outro que decresce exponencialmente que corresponde a uma corrente contínua transitória de acordo com a Equação 2.1.

$$i_{cc}(t) = \underbrace{\frac{V_m}{|Z|} \text{sen}(\omega \times t + \alpha - \theta)}_{\text{componente alternada}} - \underbrace{\frac{V_m}{|Z|} \text{sen}(\alpha - \theta) e^{\frac{-R}{L}t}}_{\text{componente contínua}}, \quad (2.1)$$

componente alternada componente contínua

sendo V_m a amplitude da tensão fornecida ao circuito, Z a impedância do curto-circuito, ω a frequência angular de oscilação da tensão alternada, α o ângulo de fase da tensão do gerador, θ o ângulo da impedância, R e L a resistência e indutância do curto-circuito respectivamente e t o tempo.

Observando-se melhor, pode-se perceber que:

$$\alpha - \theta = \pm 90 \rightarrow i_{dc} = \frac{V_m}{|Z|} \quad (2.2)$$

E:

$$\alpha - \theta = 0 \rightarrow i_{dc} = 0 \quad (2.3)$$

Como i_{dc} é a componente contínua da corrente de curto-circuito, conclui-se que a máxima amplitude da corrente de falta ocorre quando o ângulo de fase da tensão do gerador está em quadratura com o ângulo da impedância. De maneira análoga, a mínima amplitude é atingida quando esses ângulos são iguais. Graficamente, estes dois casos estão representados respectivamente nas Figura 2.2 e Figura 2.3.

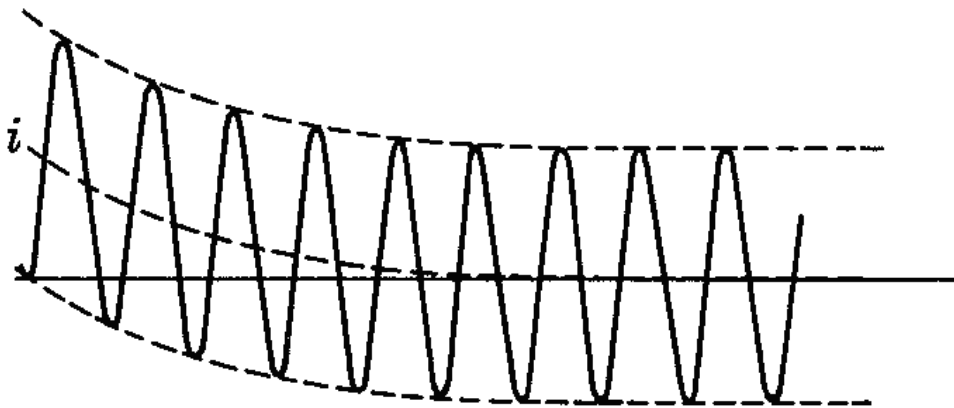


Figura 2.2 – Comportamento da corrente de curto-circuito no tempo, com ângulos da tensão do gerador e da impedância em quadratura.

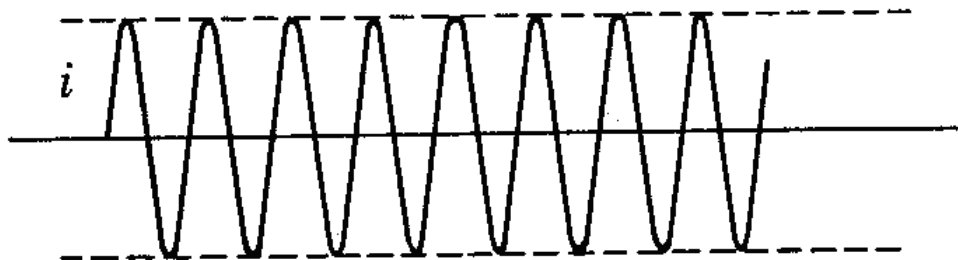


Figura 2.3 – Comportamento da corrente de curto-circuito no tempo, com os ângulos da tensão do gerador e da impedância iguais.

Esse comportamento resulta na utilização de três valores de corrente de defeito no dimensionamento da proteção:

- Imediatamente após a falta;
- Alguns ciclos após a falta;
- De regime permanente.

2.2. Componentes Simétricas

O método das componentes simétricas foi criado em 1918, por C. L. Fortescue, durante a observação do funcionamento de motores de indução operando em condições desequilibradas. Pela aplicação desta ferramenta, é possível a análise de circuitos polifásicos desbalanceados, transformando-os em equivalentes monofásicos desacoplados entre si.

Em um sistema elétrico de potência trifásico, a seqüência das fases é determinada pela passagem dos máximos consecutivos das ondas senoidais de tensão. Por convenção, o máximo de referência pertence à fase *A*, o seu sucessor temporal pertence à fase *B* e o restante e mais atrasado pertence à fase *C*, todos defasados de 120° e com fasores girando no sentido anti-horário. Esse sistema é dito equilibrado quando as impedâncias conectadas às três fases

são iguais, o que implica na circulação de três correntes de mesma amplitude e igualmente defasadas de acordo com as tensões. Intuitivamente, quando as cargas conectadas às fases diferem, o circuito trifásico é desequilibrado.

De acordo com Fortescue, qualquer sistema de n fasores pode ser decomposto em n sistemas equilibrados, as componentes simétricas. Assim, um sistema desequilibrado de três fasores $\bar{V}_a$, $\bar{V}_b$ e $\bar{V}_c$, conforme a Figura 2.4, pode ser separado em suas três componentes simétricas ou componentes de seqüência, como são usualmente conhecidas para circuitos trifásicos:

- Seqüência positiva ou seqüência 1: Formada por três fasores de mesma amplitude, com rotação no sentido anti-horário. Seus elementos são definidos como:

$$\bar{V}_a^{(1)} = V_a^{(1)} \angle 0 \quad (2.4)$$

$$\bar{V}_b^{(1)} = V_a^{(1)} \angle 240 \quad (2.5)$$

$$\bar{V}_c^{(1)} = V_a^{(1)} \angle 120 \quad (2.6)$$

- Seqüência negativa ou seqüência 2: Formada por três fasores de mesma amplitude, com rotação no sentido horário. Seus elementos são definidos como:

$$\bar{V}_a^{(2)} = V_a^{(2)} \angle 0 \quad (2.7)$$

$$\bar{V}_b^{(2)} = V_a^{(2)} \angle 120 \quad (2.8)$$

$$\bar{V}_c^{(2)} = V_a^{(2)} \angle 240 \quad (2.9)$$

- Seqüência 0: Formada por três fasores de mesma amplitude e em fase. Seus elementos são definidos como:

$$\bar{V}_a^{(0)} = V_a^{(0)} \angle 0 \quad (2.10)$$

$$\bar{V}_b^{(0)} = V_a^{(0)} \angle 0 \quad (2.11)$$

$$\bar{V}_c^{(0)} = V_a^{(0)} \angle 0 \quad (2.12)$$

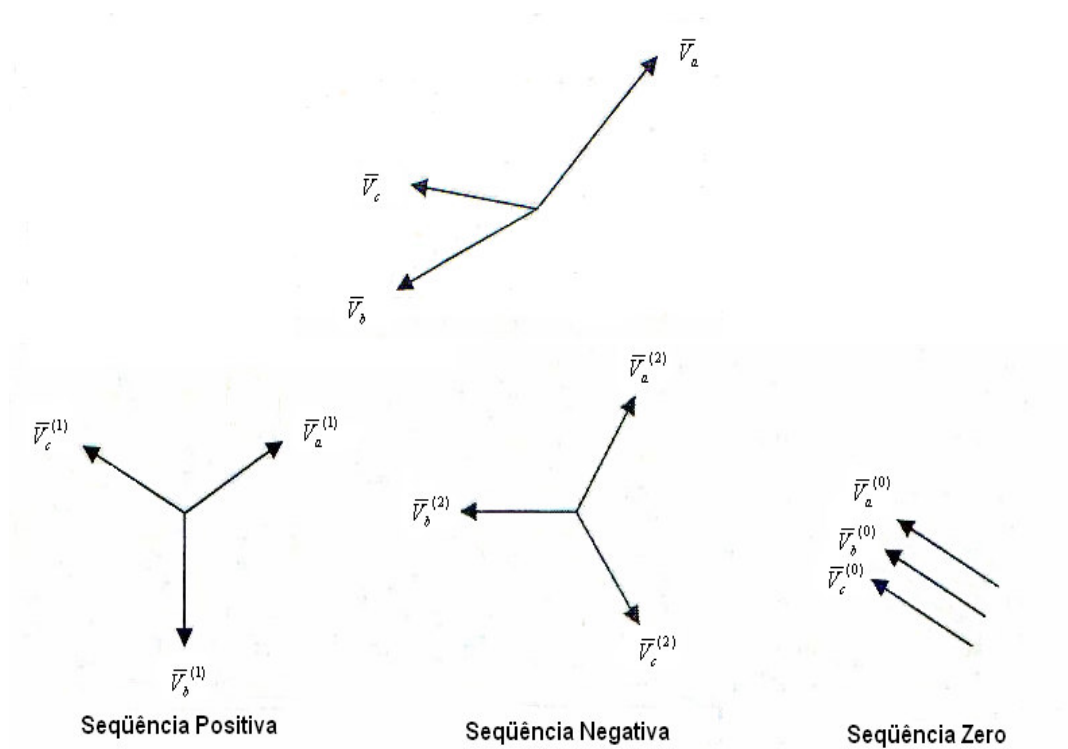


Figura 2.4 – Sistema desequilibrado e sua decomposição em componentes simétricas.

Combinando-se fasorialmente as componentes simétricas, obtêm-se os fasores do sistema original:

$$\bar{V}_a = \bar{V}_a^{(1)} + \bar{V}_a^{(2)} + \bar{V}_a^{(0)} \quad (2.13)$$

$$\bar{V}_b = \bar{V}_b^{(1)} + \bar{V}_b^{(2)} + \bar{V}_b^{(0)} \quad (2.14)$$

$$\bar{V}_c = \bar{V}_c^{(1)} + \bar{V}_c^{(2)} + \bar{V}_c^{(0)} \quad (2.15)$$

A Figura 2.5 permite a visualização das equações anteriormente citadas. Utilizando-se do método do polígono, que permite a soma de fasores graficamente, torna-se simples a confirmação do método determinado por Fortescue.

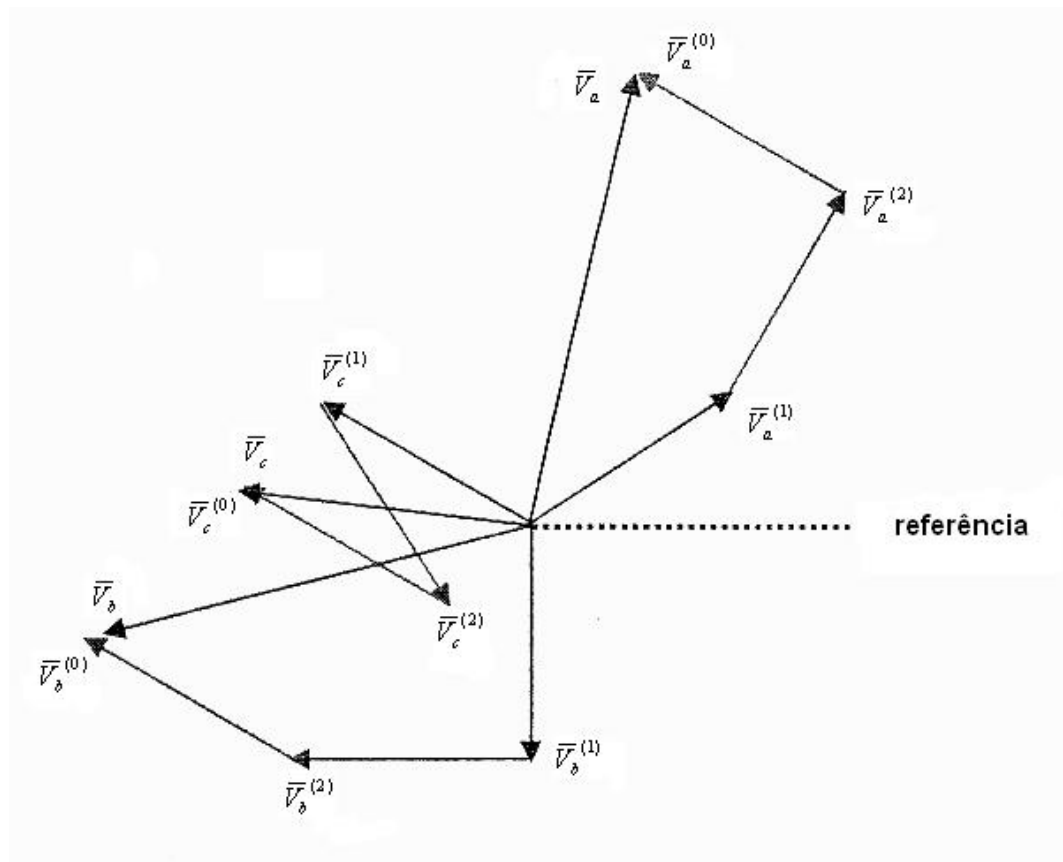


Figura 2.5 – Soma fasorial das componentes simétricas para obtenção do conjunto de fasores original.

Durante o processo de decomposição do sistema em suas componentes simétricas, faz-se útil a utilização de um operador comumente representado pela letra a . A multiplicação deste operador por qualquer fasor provoca a rotação deste em 120° . Assim, pode-se definir o operador a como:

$$a = 1\angle 120^\circ = 1 \times e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.16)$$

$$a^2 = 1\angle 240^\circ = 1 \times e^{j4\pi/3} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.17)$$

$$a^3 = 1\angle 360^\circ = 1 \times e^{j2\pi} = 1 + j0 \quad (2.18)$$

Note que:

$$a + a^2 + a^3 = 0 \quad (2.19)$$

Substituindo-se o operador a nas Equações 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11 e 2.12, e posteriormente nas Equações 2.13, 2.14 e 2.15, obtém-se:

$$\bar{V}_a = \bar{V}_a^{(1)} + \bar{V}_a^{(2)} + \bar{V}_a^{(0)} \quad (2.20)$$

$$\bar{V}_b = a^2 \bar{V}_a^{(1)} + a \bar{V}_a^{(2)} + \bar{V}_a^{(0)} \quad (2.21)$$

$$\bar{V}_c = a \bar{V}_a^{(1)} + a^2 \bar{V}_a^{(2)} + \bar{V}_a^{(0)} \quad (2.22)$$

Representando-se em forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_a \\ \overline{V}_b \\ \overline{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \overline{V}_a^{(0)} \\ \overline{V}_a^{(1)} \\ \overline{V}_a^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Sendo:

$$T_{seq} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

A Matriz 2.24 é conhecida como Matriz Transformada em Componentes de Seqüência ou Matriz Transformada de Fortescue. Multiplicando-se pela esquerda os dois lados da Equação 2.23 pela inversa da Matriz Transformada de Fortescue, resulta na obtenção das componentes simétricas em função do conjunto inicial de fasores:

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_a^{(0)} \\ \overline{V}_a^{(1)} \\ \overline{V}_a^{(2)} \end{bmatrix} = T_{seq}^{-1} \times \begin{bmatrix} \overline{V}_a \\ \overline{V}_b \\ \overline{V}_c \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Como:

$$T_{seq}^{-1} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Tem-se que:

$$\bar{V}_a^{(0)} = \frac{1}{3} \times (\bar{V}_a + \bar{V}_b + \bar{V}_c) \quad (2.27)$$

$$\bar{V}_a^{(1)} = \frac{1}{3} \times (\bar{V}_a + a\bar{V}_b + a^2\bar{V}_c) \quad (2.28)$$

$$\bar{V}_a^{(2)} = \frac{1}{3} \times (\bar{V}_a + a^2\bar{V}_b + a\bar{V}_c) \quad (2.29)$$

Como pode ser observado, em um sistema elétrico de potência, trifásico e equilibrado, as componentes simétricas 0 e 2 são nulas.

A partir das grandezas fasoriais de tensão e corrente elétrica, transformadas em componentes de sequência, é possível encontrar a mesma representação das demais grandezas como as impedâncias e a potência do sistema. Considerando-se o esquema da Figura 2.6, as impedâncias próprias e mútuas do circuito, bem como sua potência aparente podem ser calculadas desenvolvendo-se as Leis de Kirchhoff como mostram as equações a seguir:

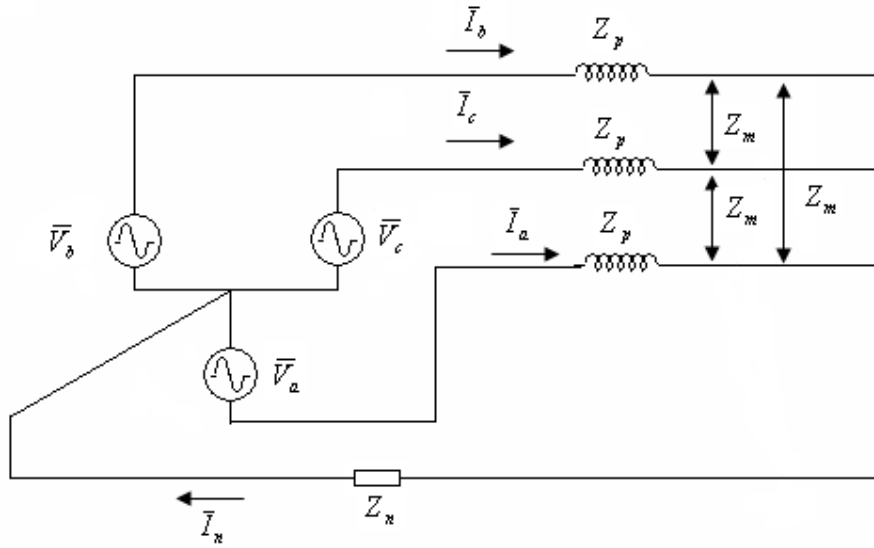


Figura 2.6 – Sistema trifásico de potência em componentes de fase abc.

$$\bar{V}_a = Z_p \bar{I}_a + Z_m \bar{I}_b + Z_m \bar{I}_c + Z_n \bar{I}_n \quad (2.30)$$

$$\bar{V}_b = Z_m \bar{I}_a + Z_p \bar{I}_b + Z_m \bar{I}_c + Z_n \bar{I}_n \quad (2.31)$$

$$\bar{V}_c = Z_m \bar{I}_a + Z_m \bar{I}_b + Z_p \bar{I}_c + Z_n \bar{I}_n \quad (2.32)$$

Como a corrente de neutro é dada por:

$$\bar{I}_n = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c, \quad (2.33)$$

as tensões podem ser escritas matricialmente em função das correntes de fase:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p + Z_n & Z_m + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_p + Z_n & Z_m + Z_n \\ Z_m + Z_n & Z_m + Z_n & Z_p + Z_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Para facilitar a análise, será utilizada a notação:

$$\bar{V}_{abc} = Z_{abc} \times \bar{I}_{abc} \quad (2.35)$$

Escrevendo a equação acima em componente de seqüência, tem-se:

$$T_{seq} \times \bar{V}_{012} = Z_{abc} \times T_{seq} \times \bar{I}_{012} , \quad (2.36)$$

sendo $\bar{V}_{012}$ e $\bar{I}_{012}$ as matrizes de componentes simétricas de tensão e de corrente elétrica respectivamente.

Multiplicando-se a Equação 2.36 pela esquerda pela inversa da matriz T_{seq} :

$$T_{seq}^{-1} \times T_{seq} \times \bar{V}_{012} = T_{seq}^{-1} \times Z_{abc} \times T_{seq} \times \bar{I}_{012} \quad (2.37)$$

$$\bar{V}_{012} = T_{seq}^{-1} \times Z_{abc} \times T_{seq} \times \bar{I}_{012} \quad (2.38)$$

Então, conclui-se que a matriz de impedâncias em componentes de seqüência é dada por:

$$Z_{012} = T_{seq}^{-1} \times Z_{abc} \times T_{seq} \quad (2.39)$$

Escrevendo-se a Equação 2.39 em forma matricial:

$$\begin{bmatrix} Z_0 \\ Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p + 2Z_m + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_p - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_p - Z_m \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Caso não haja impedância mútua entre as fases:

$$\begin{bmatrix} Z_0 \\ Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p + 3Z_n & 0 & 0 \\ 0 & Z_p & 0 \\ 0 & 0 & Z_p \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Pode-se observar que neste último caso, a impedância de seqüência positiva é a impedância de fase. Conseqüentemente, é necessária apenas a análise de uma fase para descrever o sistema.

Outra observação a ser feita é o fato da matriz de impedâncias em seqüência de fase ser cheia. Por efeito, mesmo que não haja corrente em alguma das fases, haverá tensão em todas elas, originada pela interação entre as mesmas. Entretanto, a matriz de impedâncias em componentes simétricas é diagonal, não havendo assim interação entre as tensões e correntes de fases distintas. Logo, ficam comprovadas a validade e a utilidade da proposição de Fortescue, que permite a separação do circuito trifásico em três circuitos monofásicos independentes.

Ao realizar a separação dos circuitos trifásicos em circuitos de seqüência, deve-se atentar para o comportamento destas componentes de acordo com as conexões dos fios. Em um circuito conectado em delta, ocorre um aprisionamento da corrente de seqüência 0 dentro do próprio delta, não sendo permitida a propagação desta corrente adiante. Quando a conexão é estrela aterrado, com ou sem impedância, a seqüência 0 circula livremente por todos os elementos do circuito. Entretanto, quando a conexão trifásica é feita em estrela isolado, não existe seqüência 0 em nenhum ponto do sistema. Para as demais seqüências, 1 e 2, não há interferência do tipo de conexão dos cabos.

Exemplificando o que foi exposto no parágrafo anterior, considere um sistema elétrico representado de forma unifilar de acordo com a Figura 2.7, e a separação do circuito de seqüência 0 representada no esquema da Figura 2.8.

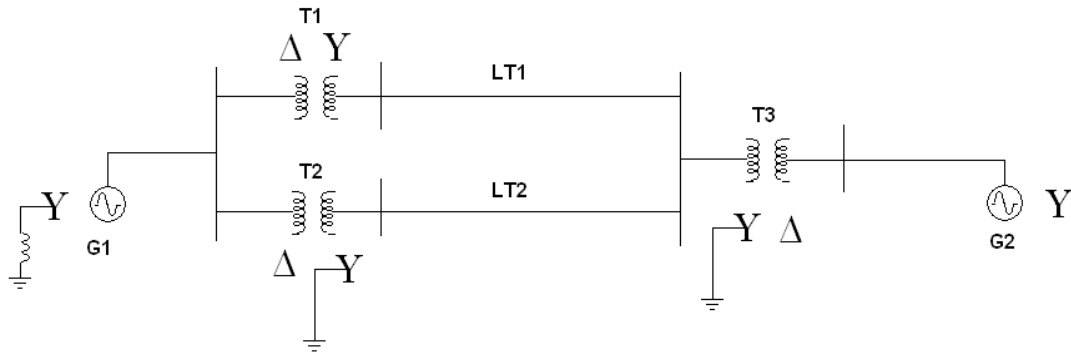


Figura 2.7 – Diagrama unifilar de um sistema trifásico de potência com transformadores e geradores conectados em delta, estrela aterrado e estrela isolado.

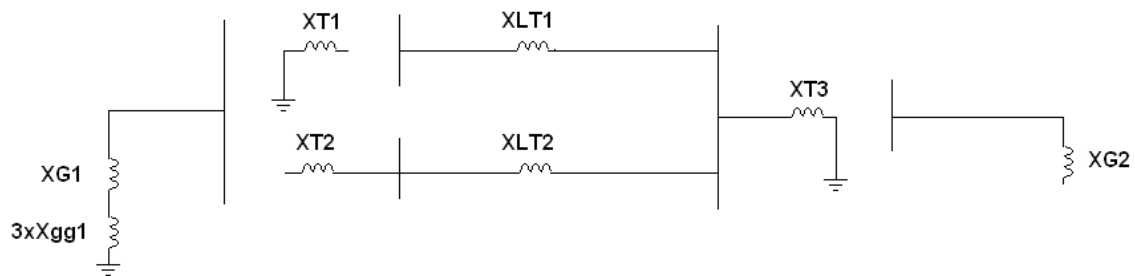


Figura 2.8 – Diagrama do circuito de seqüência 0.

2.3. Tipos de Curto-Circuito

Um curto-circuito ocorre quando há rompimento do isolamento entre dois ou mais condutores. Em um sistema trifásico, há então quatro possibilidades de curto-circuito:

- Trifásico;
- Monofásico para a terra;
- Bifásico;
- Bifásico para a terra.

Cada um destes tipos de curto-circuito apresenta características particulares e um método específico para análise.

Antes de realizar qualquer estudo é interessante que sejam definidos os modelos matemáticos para os principais elementos presentes nos sistemas elétricos de potência. Conforme a Figura 2.9, Figura 2.10, Figura 2.11 e Figura 2.12, nesta ordem, são mostradas as representações do gerador e motor, transformador, linha de transmissão e carga.

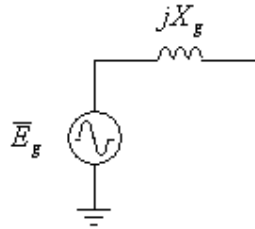


Figura 2.9 – Modelo matemático do gerador e do motor síncrono.

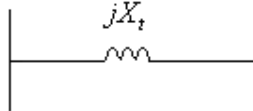


Figura 2.10 – Modelo matemático do transformador.

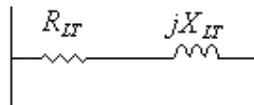


Figura 2.11 – Modelo matemático da linha de transmissão.

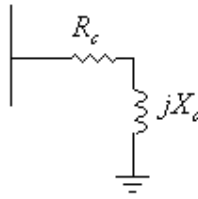


Figura 2.12 – Modelo matemático da carga.

Atualmente, há inúmeros programas de computador, dotados de métodos computacionais que permitem o cálculo das correntes de curto-circuito. Entretanto, nenhum deles é escopo deste trabalho. Assim, algumas hipóteses simplificadoras são úteis durante a realização desse cálculo:

- Parâmetros em paralelo (shunt) e resistências em série das linhas de transmissão serão ignorados;
- Cargas serão desprezadas, excetuando-se os motores;
- Transformadores sempre no tap nominal;
- Impedâncias iguais nas três componentes de sequência.

A seguir, será feita uma breve apresentação dos métodos manuais de análise das faltas, pois este estudo é necessário no ajuste da proteção.

2.3.1. Curto-Circuito Trifásico

O curto-circuito trifásico ou simétrico, como também é conhecido, é o mais severo dentre os tipos de falta. Entretanto, a probabilidade de sua ocorrência é muito pequena. O diagrama trifilar da Figura 2.13 representa esta configuração de falta.

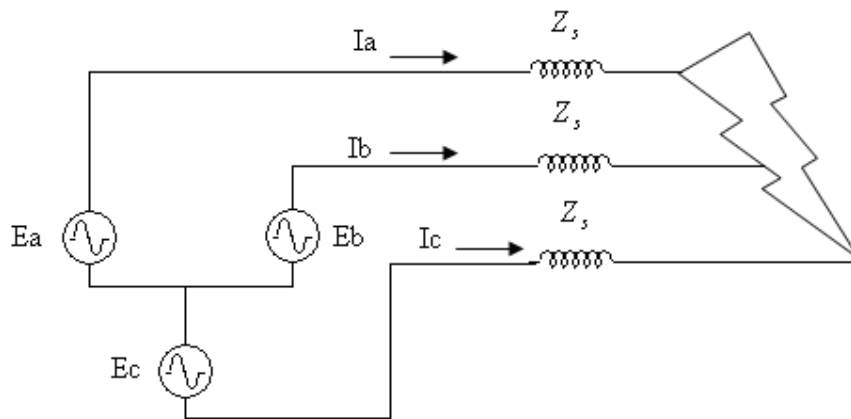


Figura 2.13 – Curto-circuito trifásico em um sistema elétrico de potência.

Quando ocorre um curto-circuito franco, as tensões nos pontos de falta são nulas pois a ausência de uma impedância entre as fases iguala o potencial deste ponto ao potencial da referência do gerador (ponto neutro no centro da ligação em estrela). Os geradores só produzem tensões em seqüência positiva e como os circuitos são equilibrados, apenas a análise do curto-circuito nesta seqüência é suficiente. Desta forma, os módulos das correntes circulantes nas fases são iguais e elas são defasadas de 120° elétricos entre si, na seqüência “abc”, justificando assim a nomenclatura de “curto-circuito simétrico” atribuída às faltas trifásicas.

Considerando um sistema composto de um gerador, uma linha de transmissão, um motor e uma carga estática conforme o diagrama equivalente monofásico da Figura 2.14, pode-se calcular a corrente de falta no ponto indicado a partir do conhecimento das tensões internas dos elementos dinâmicos, o motor e o gerador.

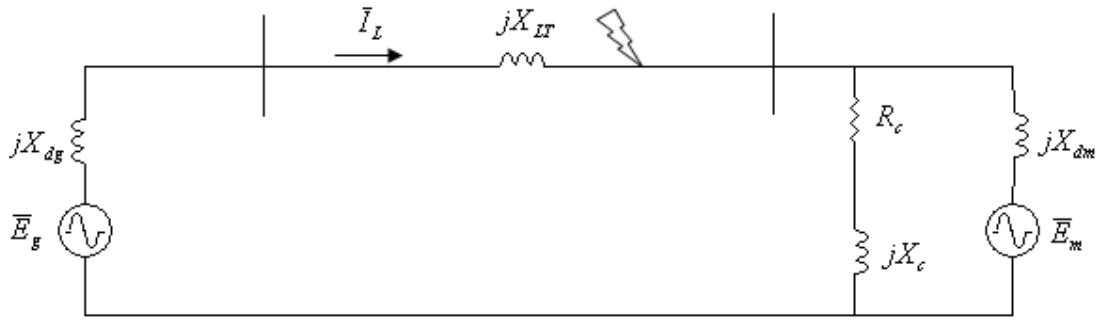


Figura 2.14 - Sistema elétrico trifásico e equilibrado imediatamente antes da falta trifásica no ponto indicado.

Após a falta, a corrente de carga é desprezada juntamente com o resistor e a reatância em paralelo conforme a Figura 2.15.

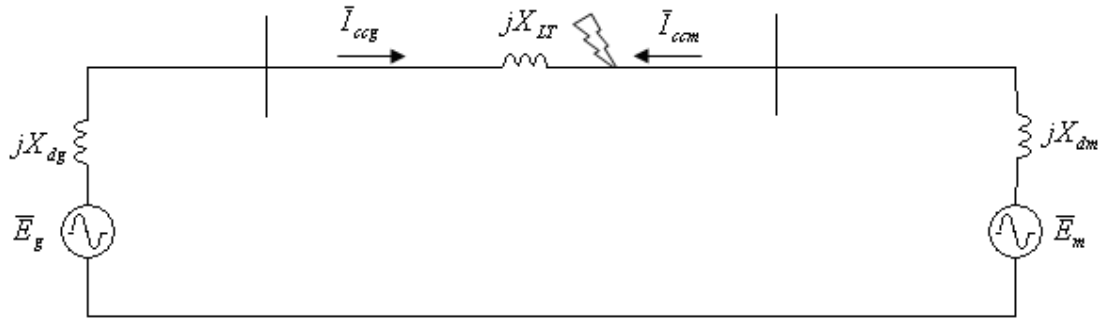


Figura 2.15 - Sistema elétrico da Figura 2.14 após a ocorrência da falta.

A corrente de falta, caso haja alguma impedância Z_{falta} entre as fases é:

$$\bar{I}_{cc} = \bar{I}_{ccg} + \bar{I}_{ccm} \quad (2.42)$$

Sendo:

$$\bar{I}_{ccg} = \frac{\bar{E}_g}{jX_{dg} + jX_{LT} + Z_{falta}} \quad (2.43)$$

E:

$$\bar{I}_{ccm} = \frac{\bar{E}_m}{jX_{dm} + Z_{falta}} \quad (2.44)$$

2.3.2. Curto-Circuito Monofásico para a Terra

Este tipo de falta é o mais freqüente e ocorre quando um único condutor do sistema entra em contato com o solo, propriamente ou através de uma impedância. A dimensão de sua corrente de defeito é a menor dentre as faltas, o que em determinados casos, dificulta sua detecção. A Figura 2.16 representa um sistema sob a ocorrência deste curto-circuito.

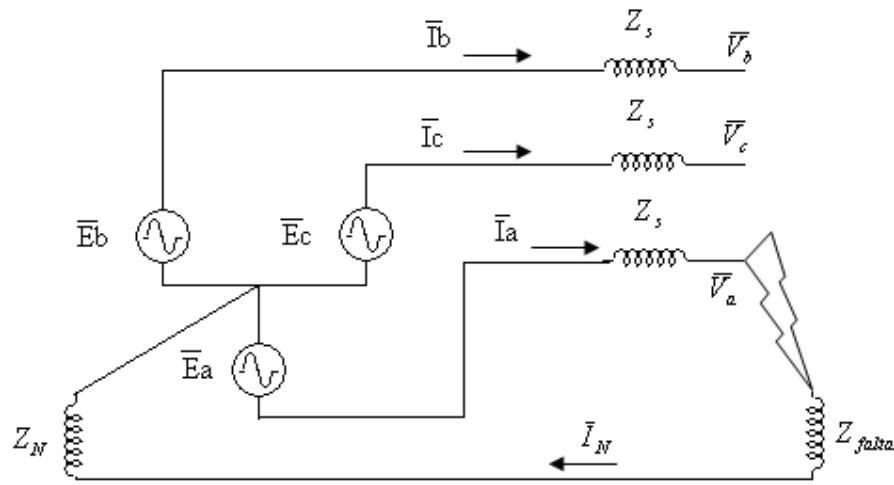


Figura 2.16 – Curto-circuito monofásico para a terra em um sistema elétrico de potência.

Desprezando-se a corrente de carga, é utilizado o modelo de gerador operando em vazio. Assim, as correntes $\bar{I}_b$ e $\bar{I}_c$ das fases B e C consecutivamente serão zero e pode-se concluir que o potencial no ponto da falta $\bar{V}_a$ é nulo se não houver uma impedância de curto-circuito Z_{falta} e uma impedância de neutro Z_N . Caso contrário, ocorrerá que:

$$\bar{V}_a = (Z_{falta} + Z_N) \times \bar{I}_a \quad (2.45)$$

Aplicando-se a transformada de Fortescue no circuito obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}^{(0)} \\ \bar{I}^{(1)} \\ \bar{I}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Então:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}^{(0)} \\ \bar{I}^{(1)} \\ \bar{I}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_a \\ \bar{I}_a \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Escrevendo-se os vetores em forma de equações, temos:

$$\bar{I}^{(0)} = \frac{1}{3} \times \bar{I}_a \quad (2.48)$$

$$\bar{I}^{(1)} = \frac{1}{3} \times \bar{I}_a \quad (2.49)$$

$$\bar{I}^{(2)} = \frac{1}{3} \times \bar{I}_a \quad (2.50)$$

Logo:

$$\bar{I}^{(0)} = \bar{I}^{(1)} = \bar{I}^{(2)} \quad (2.51)$$

$$\bar{I}_a = 3 \times \bar{I}^{(0)} \quad (2.52)$$

Observando a Equação 2.51, nota-se que os circuitos equivalentes monofásicos das componentes de seqüência durante o defeito estão em série conforme a Figura 2.17.

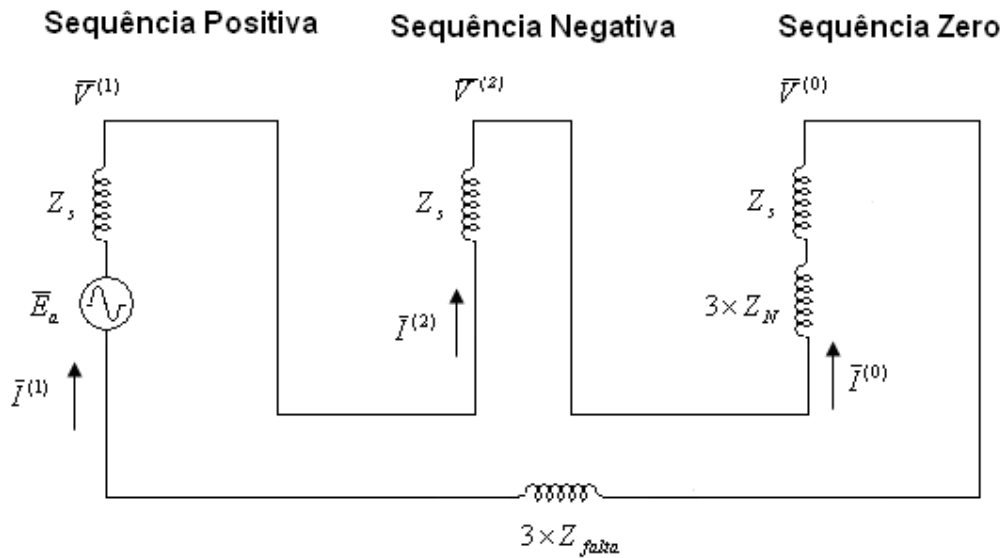


Figura 2.17 – Circuito equivalente de Thèvenin em componentes de seqüência no instante da falta monofásica para a terra.

Aplicando as teorias de resolução de circuitos elétricos tem-se:

$$\bar{E}_a - \bar{I}^{(1)} \times Z_s - \bar{I}^{(2)} \times Z_s - \bar{I}^{(0)} (Z_s + 3 \times Z_N + 3 \times Z_{falta}) = 0 \quad (2.53)$$

Substituindo-se a Equação 2.51 na Equação 2.53 e através de manipulações matemáticas, o resultado é:

$$\bar{I}^{(0)} = \frac{\bar{E}_a}{Z_s + Z_s + Z_s + 3 \times Z_N + 3 \times Z_{falta}} \quad (2.54)$$

O valor da corrente de defeito pode, desta forma, ser calculado através da Equação 2.52.

2.3.3. Curto-Circuito Bifásico

O curto-circuito bifásico ocorre em geral através do contato de algum objeto com dois condutores de fases distintas do sistema elétrico de potência. Devido ao grande número de redes de transmissão e distribuição aéreas no Brasil, este tipo de defeito está entre os tipos mais comuns de falta, seja pela interferência de animais, acidentes de trânsito, quedas de árvores etc. A Figura 2.18 representa um sistema trifásico sob falta bifásica.

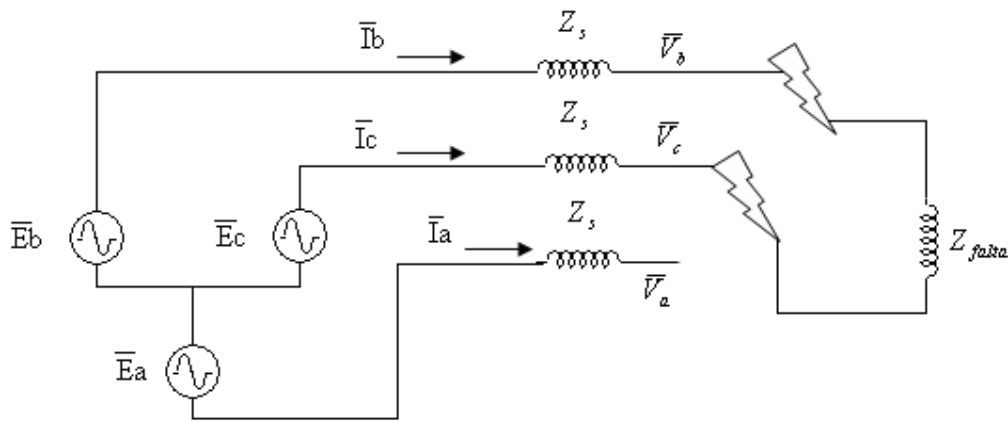


Figura 2.18 – Curto-circuito bifásico em um sistema elétrico de potência.

Pelo modelo de gerador operando em vazio, a corrente $\bar{I}_a$ da fase A é zero e pode-se concluir que os potenciais no ponto da falta $\bar{V}_b$ e $\bar{V}_c$ são iguais, na ausência de uma impedância de curto-circuito Z_{falta} . Caso contrário, ocorrerá que:

$$\bar{V}_b = Z_{falta} \times \bar{I}_b + \bar{V}_c \quad (2.55)$$

Como a fase B está em série com a fase C durante o curto-circuito, é válida a relação adiante:

$$\bar{I}_c = -\bar{I}_b \quad (2.56)$$

Separando-se o sistema em suas componentes de seqüência:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}^{(0)} \\ \bar{I}^{(1)} \\ \bar{I}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{I}_b \\ -\bar{I}_b \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Assim:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}^{(0)} \\ \bar{I}^{(1)} \\ \bar{I}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 0 \\ (a - a^2) \times \bar{I}_b \\ -(a - a^2) \bar{I}_b \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

Separando-se as equações contidas nas matrizes acima:

$$\bar{I}^{(0)} = 0 \quad (2.59)$$

$$\bar{I}^{(1)} = \frac{(a - a^2)}{3} \times \bar{I}_b \quad (2.60)$$

$$\bar{I}^{(2)} = -\frac{(a - a^2)}{3} \times \bar{I}_b \quad (2.61)$$

Logo:

$$\bar{I}^{(2)} = -\bar{I}^{(1)} \quad (2.62)$$

Com base nas três equações acima, observa-se que o circuito equivalente de Thèvenin em componentes de seqüência será formado pela conexão em série das seqüências positiva e negativa e pela conexão em aberto da seqüência zero, pois esta não existe em um curto-circuito bifásico. A Figura 2.19 denota como fica este circuito.

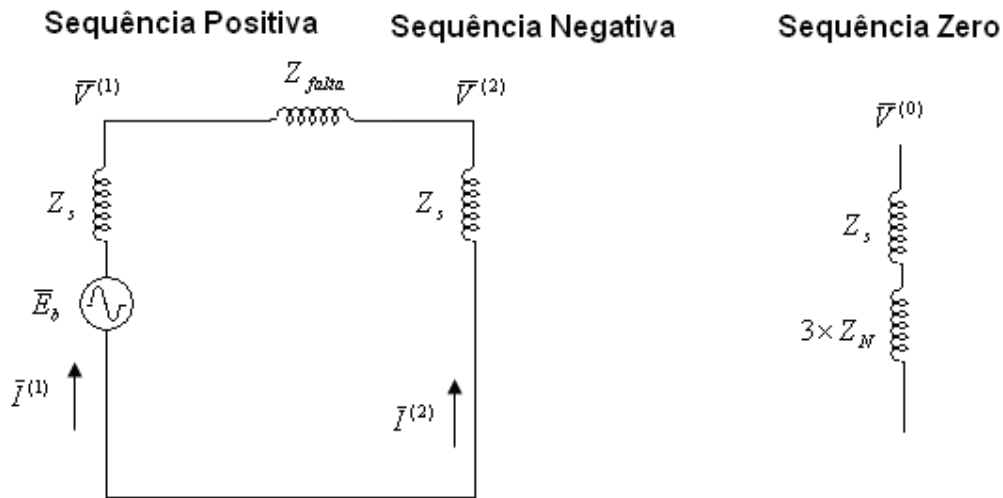


Figura 2.19 – Circuito equivalente de Thèvenin em componentes de seqüência no instante da falta bifásica.

Pela lei das tensões de Kirchhoff é retirada do circuito da Figura 2.19 a seguinte relação:

$$\bar{E}_b - \bar{I}^{(1)} \times Z_s - \bar{I}^{(1)} \times Z_{falta} + \bar{I}^{(2)} \times Z_s = 0 \quad (2.63)$$

Substituindo-se a Equação 2.62 na Equação 2.63 e manipulando-se matematicamente:

$$\bar{I}^{(1)} = \frac{\bar{E}_b}{Z_s + Z_s + Z_{falta}} \quad (2.64)$$

A corrente de defeito em componentes de fase pode ser calculada através da substituição do resultado encontrado na Equação 2.64, na Equação 2.60 e posteriormente na Equação 2.56.

2.3.4. Curto-Circuito Bifásico para a Terra

O curto-circuito bifásico para a terra caracteriza-se pelo contato dos condutores de duas das fases do sistema elétrico com o solo ou ponto aterrado. Dificilmente este tipo de falta ocorre pela dificuldade de se ocasionar uma falha de isolamento entre duas fases, simultaneamente com a terra. Para entendimento, um circuito elétrico trifásico sob falta bifásica para a terra está representado na Figura 2.20.

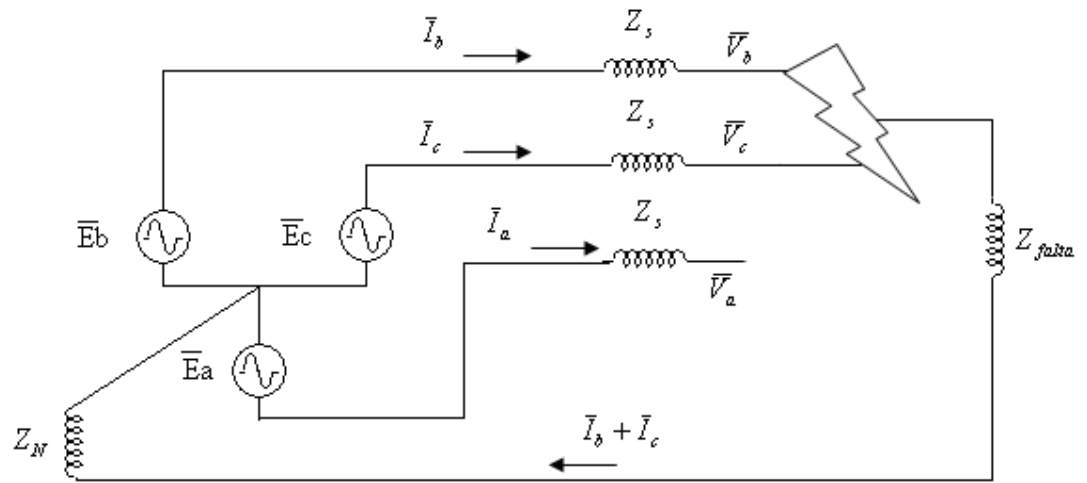


Figura 2.20 – Curto-circuito bifásico para a terra em um sistema elétrico de potência.

Pode ser observado que as tensões no ponto de falta $\bar{V}_b$ e $\bar{V}_c$, das fases A e B respectivamente são iguais. E ainda, seu valor pode ser obtido pela Equação 2.65.

$$\bar{V}_b = \bar{V}_c = (Z_{falta} + Z_N) \times (\bar{I}_b + \bar{I}_c) \quad (2.65)$$

Como a corrente de fase $\bar{I}_a$ é nula, através da transformação em componentes simétricas conclui-se que:

$$\bar{I}_a = 0 = \bar{I}^{(0)} + \bar{I}^{(1)} + \bar{I}^{(2)} \quad (2.66)$$

Aplicando-se a transformação em componentes de seqüência nos fasores de tensão obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}^{(0)} \\ \bar{V}^{(1)} \\ \bar{V}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_b \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

Desenvolvendo-se as relações presentes na Equação 2.67 tem-se:

$$\bar{V}^{(0)} = \frac{1}{3} \times (\bar{V}_a + \bar{V}_b + \bar{V}_b) \quad (2.68)$$

$$\bar{V}^{(1)} = \frac{1}{3} \times (\bar{V}_a + a \times \bar{V}_b + a^2 \times \bar{V}_b) \quad (2.69)$$

$$\bar{V}^{(2)} = \frac{1}{3} \times (\bar{V}_a + a^2 \times \bar{V}_b + a \times \bar{V}_b) \quad (2.70)$$

Manipulando-se algebricamente as Equações 2.68, 2.69 e 2.70:

$$3 \times \bar{V}^{(0)} = \bar{V}_a + 2 \times \bar{V}_b \quad (2.71)$$

$$3 \times \bar{V}^{(1)} = \bar{V}_a + (a + a^2) \times \bar{V}_b \quad (2.72)$$

$$3 \times \bar{V}^{(2)} = \bar{V}_a + (a^2 + a) \times \bar{V}_b \quad (2.73)$$

Da comparação entre a Equação 2.72 e a Equação 2.73 vem a relação:

$$\bar{V}^{(1)} = \bar{V}^{(2)} \quad (2.74)$$

Aplicando-se o conceito da transformada de Fortescue na Equação 2.71 e aproveitando-se as relações da Equação 2.74 e da Equação 2.65 resulta em:

$$3 \times \bar{V}^{(0)} = (\bar{V}^{(0)} + \bar{V}^{(1)} + \bar{V}^{(1)}) + 2 \times [(Z_{falta} + Z_N) \times (\bar{I}_b + \bar{I}_c)] \quad (2.75)$$

Separando-se os termos $\bar{I}_b$ e $\bar{I}_c$ em suas componentes de seqüência e ajustando-os algebricamente:

$$\bar{V}^{(0)} = \bar{V}^{(1)} + (Z_{falta} + Z_N) \times [2 \times \bar{I}^{(0)} + (a^2 + a) \times \bar{I}^{(1)} + (a^2 + a) \times \bar{I}^{(2)}] \quad (2.76)$$

Como:

$$(a^2 + a) = -1 \quad (2.77)$$

Ocorre que:

$$\bar{V}^{(0)} = \bar{V}^{(1)} + (Z_{falta} + Z_N) \times (3 \times \bar{I}^{(0)} - \bar{I}^{(0)} - \bar{I}^{(1)} - \bar{I}^{(2)}) \quad (2.78)$$

Substituindo-se a Equação 2.66 na Equação 2.78:

$$\bar{V}^{(0)} = \bar{V}^{(1)} + (Z_{falta} + Z_N) \times 3 \times \bar{I}^{(0)} \quad (2.79)$$

Através da Equação 2.66, da Equação 2.74 e da Equação 2.79, conclui-se que os circuitos equivalentes de Thevenin das componentes de seqüência do sistema em questão estão conectados em paralelo conforme a Figura 2.21.

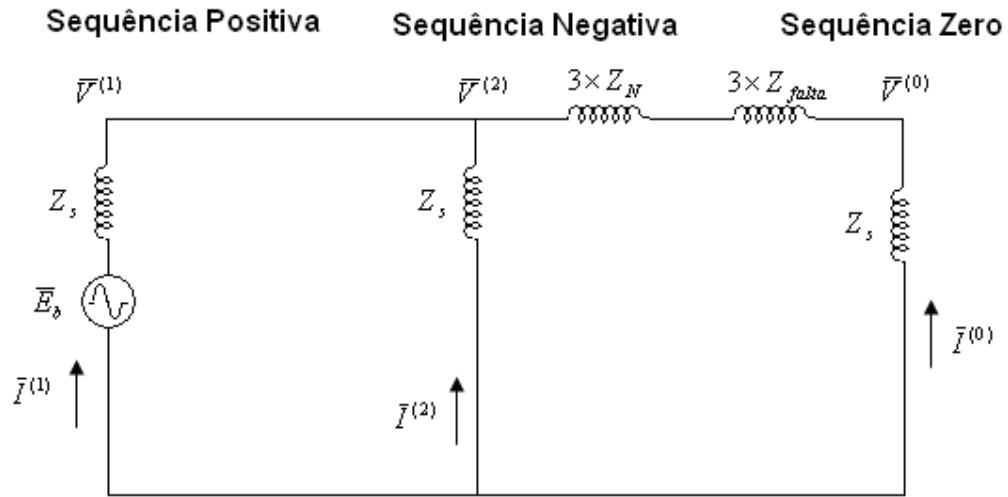


Figura 2.21 – Circuito equivalente de Thèvenin em componentes de seqüência no instante da falha bifásica para a terra.

Utilizando-se as teorias de resolução de circuitos elétricos podem ser calculadas as correntes em componentes simétricas:

$$\bar{I}^{(1)} = \frac{\bar{E}_b}{Z_s + \frac{Z_s \times [3 \times (Z_{falha} + Z_N) + Z_s]}{Z_s + [3 \times (Z_{falha} + Z_N) + Z_s]}} \quad (2.80)$$

$$\bar{I}^{(2)} = -\bar{I}^{(1)} \left[\frac{3 \times (Z_{falha} + Z_N) + Z_s}{Z_s + 3 \times (Z_{falha} + Z_N) + Z_s} \right] \quad (2.81)$$

$$\bar{I}^{(0)} = -\bar{I}^{(1)} \left[\frac{Z_s}{Z_s + 3 \times (Z_{falha} + Z_N) + Z_s} \right] \quad (2.82)$$

Através da utilização da matriz T_{seq} as correntes de curto-circuito em componente de fase podem ser encontradas.

2.4. Matrizes de Equações Nodais

Os sistemas elétricos de potência podem ser descritos de acordo com equações nodais que relacionam as correntes, tensões e impedâncias e/ou admitâncias entre barras que o compõem. Essa forma de representação é de extrema utilidade quando o sistema em questão é de grande porte, como o SIN.

Quando as equações nodais que descrevem um sistema são escritas em forma matricial, a interação entre suas barras pode ser observada. Em consequência, o fluxo de potência entre elas pode ser calculado e ainda, eventuais correntes de curto-circuito.

Como já comentado anteriormente, os sistemas podem ser modelados por admitância ou por impedância. Embora mais usual, a representação de uma rede elétrica de grande porte através de sua matriz de impedâncias Z_{barra} é de extrema complexidade. Para contornar este problema, foram desenvolvidos métodos de confecção da matriz de impedâncias de modo que os esforços computacionais dispensados nessa atividade fossem reduzidos. Serão apresentadas adiante as matrizes de admitâncias Y_{barra} e de impedâncias Z_{barra} , e os procedimentos referentes à sua montagem.

2.4.1. Matriz de Admitâncias Y_{barra}

A matriz de admitâncias Y_{barra} é composta pelas admitâncias próprias de curto-circuito de cada barra posicionadas na diagonal e pelas admitâncias de transferência de curto-circuito entre as barras, posicionadas fora da diagonal. A Figura 2.22 representa um sistema de três barras, alimentadas por transformadores conectados a motores ou geradores síncronos, que será modelado através de suas admitâncias de acordo com a Figura 2.23.

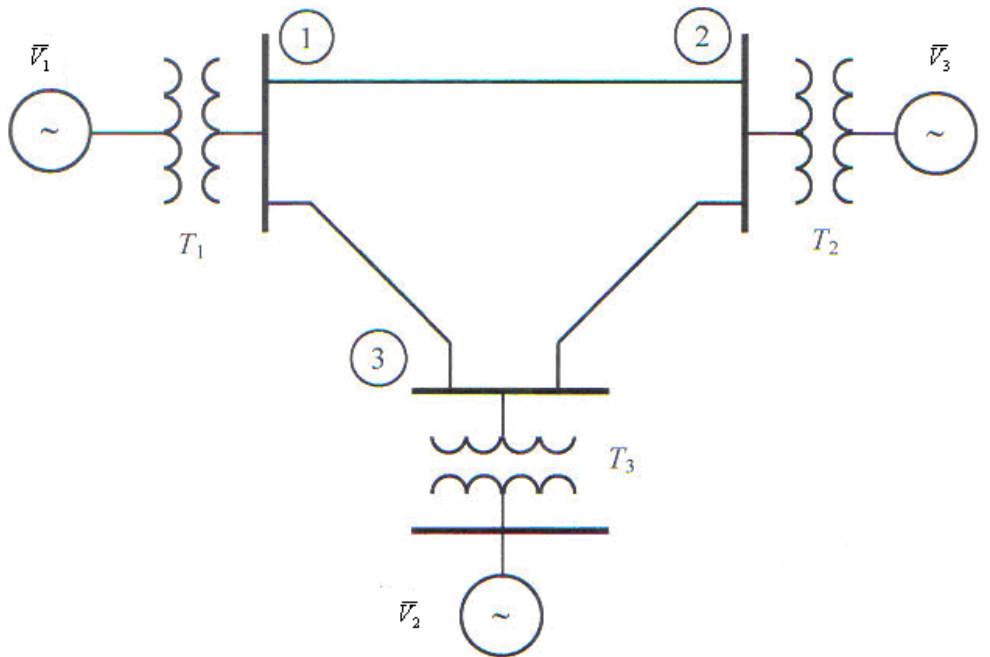


Figura 2.22 – Sistema elétrico de potência constituído de três barras.

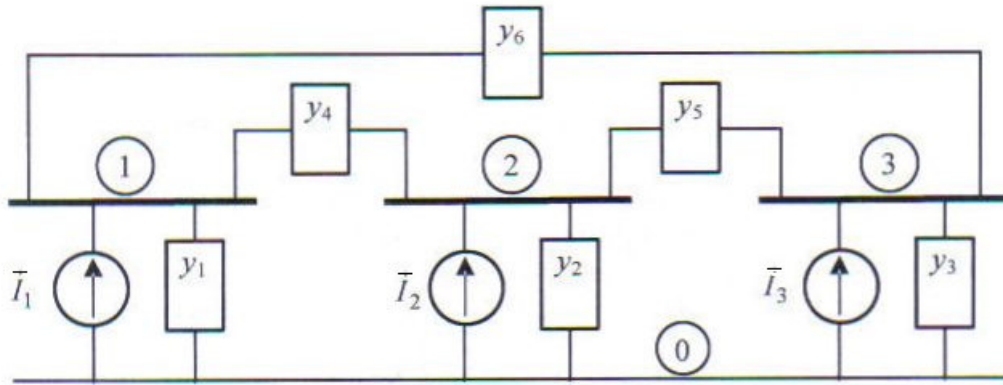


Figura 2.23 – Sistema elétrico de potência constituído de três barras, modelado por suas admitâncias.

A partir dos fasores das correntes injetadas em cada barra $\bar{I}_1$, $\bar{I}_2$ e $\bar{I}_3$ e das admitâncias que as conectam entre si e com a terra y_1 , y_2 , y_3 , y_4 , y_5 e y_6 , pode-se escrever que:

$$\bar{I}_1 = (y_1 + y_4 + y_6) \times \bar{V}_1 - y_4 \times \bar{V}_2 - y_6 \times \bar{V}_3 \quad (2.83)$$

$$\bar{I}_2 = -y_4 \times \bar{V}_1 + (y_2 + y_4 + y_5) \times \bar{V}_2 - y_5 \times \bar{V}_3 \quad (2.84)$$

$$\bar{I}_3 = -y_6 \times \bar{V}_1 - y_5 \times \bar{V}_2 + (y_3 + y_5 + y_6) \times \bar{V}_3 \quad (2.85)$$

Escrevendo-se as equações acima matricialmente obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 + y_4 + y_6 & -y_4 & -y_6 \\ -y_4 & y_2 + y_4 + y_5 & -y_5 \\ -y_6 & -y_5 & y_3 + y_5 + y_6 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix} \quad (2.86)$$

A Matriz 2.86 relaciona os vetores de corrente e tensão do sistema e é conhecida como matriz Y_{barra} . Em redes elétricas complexas, ela apresenta as características a seguir:

- Simétrica;
- Composta por números complexos;
- Quadrada e de dimensão n , sendo este o número de barras do sistema, desconsiderando a barra de referência, comumente a terra;
- Esparsa, ou seja, mais de 95% de seus elementos são nulos;
- Os elementos da diagonal principal Y_{kk} são positivos e seu cálculo é feito pelo somatório de todas as admitâncias ligadas à barra k ;
- Os elementos fora da diagonal principal Y_{kj} são negativos e são o simétrico da admitância entre a barra k e a barra j .

As duas últimas características permitem a montagem da matriz Y_{barra} pela simples inspeção visual da rede.

2.4.2. Matriz de Impedâncias Z_{barra}

A matriz Z_{barra} é composta pelas impedâncias próprias de circuito aberto de cada barra posicionadas na diagonal principal e pelas impedâncias mútuas de circuito aberto entre as barras, localizadas nas demais posições. Esta matriz também relaciona os vetores de corrente e de tensão nas barras do sistema conforme a Matriz 2.87.

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix} \quad (2.87)$$

Conclui-se então que:

$$Y_{barra} = Z_{barra}^{-1} \quad (2.88)$$

Como já mencionado, a montagem direta da matriz de impedâncias de barra é uma tarefa complicada, mas a relação da Equação 2.88 permite a obtenção de seus elementos através unicamente de cálculos algébricos. Entretanto, os recursos computacionais necessários na execução do processo de inversão matricial são proporcionais à dimensão da matriz invertida. A solução proposta para estudos de curto-circuito em grandes sistemas é o cálculo apenas da coluna de interesse da matriz Z_{barra} . O procedimento executado será mostrado a seguir.

Multiplicando-se a matriz de impedâncias de barra por um vetor l_k formado por zeros e um número um na linha k obtém-se a coluna k desta matriz:

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1k} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & \cdots & Z_{2k} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nk} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1k} \\ Z_{2k} \\ \vdots \\ \vdots \\ Z_{nk} \end{bmatrix} \quad (2.89)$$

Reescrevendo:

$$Z_{barra} \times l_k = Z_{barra}^{(k)} \quad (2.90)$$

Multiplicando-se a Equação 2.90 pela esquerda pela matriz Y_{barra} :

$$Y_{barra} \times Z_{barra} \times l_k = Y_{barra} \times Z_{barra}^{(k)} \quad (2.91)$$

$$l_k = Y_{barra} \times Z_{barra}^{(k)} \quad (2.92)$$

Para se resolver a equação acima, utiliza-se a fatoração da matriz Y_{barra} em LU :

$$Y_{barra} = L \times U \quad (2.93)$$

$$L \times U \times Z_{barra}^{(k)} = l_k \quad (2.94)$$

Fazendo:

$$U \times Z_{barra}^{(k)} = H \quad (2.95)$$

$$L \times H = l_k \quad (2.96)$$

Solucionando-se a Equação 2.96 e substituindo-se na Equação 2.95, será obtida a coluna desejada.

As matrizes de impedâncias de barra apresentam algumas características comuns.

Todas as matrizes Z_{barra} são:

- Simétricas;
- Compostas por números complexos;
- Quadradas e de dimensão n , sendo este o número de barras do sistema, desconsiderando a barra de referência, comumente a terra;
- Matrizes sem elementos nulos.

CAPÍTULO 3: RELÉS DE DISTÂNCIA ELETROMECHANICOS

As redes elétricas estão em constante mudança, ora pela adição de novas unidades consumidoras, ora pela conexão ao sistema de novos parques geradores ou ainda pela realização de manobras. A cada variação na configuração do sistema, é necessária a reconfiguração dos relés de proteção, de modo que estes não atuem com a operação da linha protegida em sua capacidade nominal e sejam sensibilizados em qualquer situação de falta ou sobrecarga desta mesma linha. A fim de evitar a tarefa constante de parametrização dos relés, é utilizado o relé de distância, que não atua conforme os níveis de tensão e corrente da linha protegida, mas funciona baseado na comparação dessas grandezas em forma de impedância, admitância ou reatância.

Nas seções posteriores serão apresentadas as características básicas de funcionamento dos relés de distância eletromecânicos de acordo com a forma que relacionam as medidas de tensão e corrente das linhas que protegem e do barramento no qual estas linhas estão conectadas.

3.1. Relé de Impedância

O relé de impedância é composto basicamente de um eixo com liberdade de rotação, sobre a influência de duas bobinas, uma conectada ao enrolamento do transformador de potencial da linha que restringe a operação do relé e outra conectada ao transformador de corrente responsável pela atuação do relé. Quando a condição de operação é atingida, o torque proveniente da bobina de corrente do relé $K_1 I^2$ supera os torques da mola de restrição K_m e o torque gerado pela bobina de tensão $K_2 V^2$ de forma que o torque resultante τ_{motor} é regido pela equação:

$$\tau_{motor} = K_1 I^2 - K_2 V^2 - K_m \quad (3.1)$$

No limiar de operação do relé, o torque resultante é nulo:

$$0 = K_1 I^2 - K_2 V^2 - K_m \quad (3.2)$$

$$K_2 V^2 = K_1 I^2 - K_m \quad (3.3)$$

Dividindo a Equação 3.3 por $K_2 I^2$:

$$\frac{K_2 V^2}{K_2 I^2} = \frac{K_1 I^2}{K_2 I^2} - \frac{K_m}{K_2 I^2} \quad (3.4)$$

$$\left(\frac{V}{I}\right)^2 = \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_m}{K_2 I^2} \quad (3.5)$$

Sabe-se que a impedância é dada pela relação:

$$Z = \frac{V}{I} \quad (3.6)$$

Substituindo-se a Equação 3.6 na Equação 3.5:

$$Z^2 = \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_m}{K_2 I^2} \quad (3.7)$$

Durante a ocorrência do curto-circuito o termo abaixo é praticamente nulo:

$$\frac{K_m}{K_2 I^2} \cong 0 \quad (3.8)$$

Então a Equação 3.7 fica:

$$Z^2 = \frac{K_1}{K_2} = R^2 + X^2, \quad (3.9)$$

sendo R a resistência que compõe a impedância e X a reatância.

Pela observação da Equação 3.9, conclui-se que o lugar geométrico das regiões de operação do relé no plano complexo das impedâncias é um círculo de raio K conforme a Figura 3.1, de modo que:

$$K = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} \quad (3.10)$$

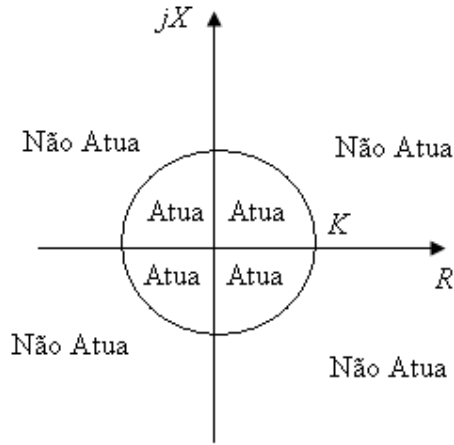


Figura 3.1 - Lugar geométrico das impedâncias de operação do relé no plano complexo.

Este relé opera tanto para defeitos a jusante quanto para defeitos a montante e necessita ser combinado com um relé direcional. O diagrama da zona de atuação resultante desta combinação pode ser observado na Figura 3.2, onde o relé atua somente na região azul.

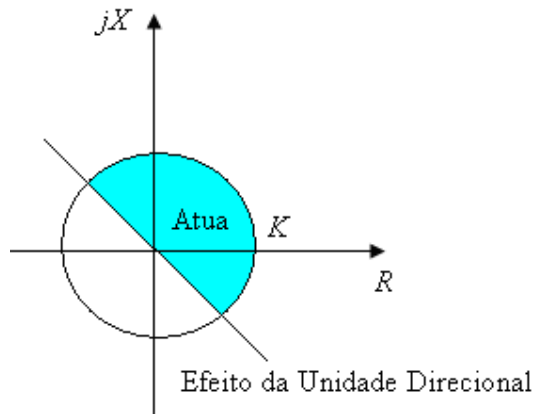


Figura 3.2 – Lugar geométrico das impedâncias de operação do relé combinado com a unidade direcional no plano complexo.

3.1.1. Ajuste das Zonas de Operação

Durante o processo de ajuste das zonas de operação, deve-se levar em consideração a transformação no valor da impedância real da linha pela ação dos transformadores de corrente e transformadores de potencial. Esta correção nos valores das impedâncias de configuração no relé é necessária pela relação de transformação de corrente e de potencial: RTC e RTP respectivamente, e pode ser realizada pelos cálculos demonstrados a diante.

$$Z_{secundária} = \frac{V_{secundária}}{I_{secundária}} \quad (3.11)$$

Como:

$$V_{secundária} = \frac{V_{primária}}{RTP} \quad (3.12)$$

E:

$$I_{secundária} = \frac{I_{primária}}{RTC} \quad (3.13)$$

Pode-se reescrever a Equação 3.11:

$$Z_{secundária} = \frac{V_{primária}}{I_{primária}} \times \frac{RTC}{RTP} \quad (3.14)$$

Logo:

$$Z_{secundária} = Z_{primária} \times \frac{RTC}{RTP} \quad (3.15)$$

De forma que $Z_{secundária}$ é a impedância que será ajustada no relé e será o raio da circunferência do limiar de operação do mesmo, $V_{secundária}$ e $I_{secundária}$ são a tensão e a corrente presentes nos secundários do transformador de corrente e do transformador de potencial respectivamente, e $V_{primária}$ e $I_{primária}$ são a tensão e corrente presentes em seus enrolamentos primários.

Usualmente em companhias de distribuição como a Light S.E.S.A., a primeira zona de operação é limitada a 80% da linha de transmissão protegida, a segunda zona cobre 100% da linha e 20% da linha seguinte, a terceira zona é conhecida como zona reversa e protege contra faltas à montante e a quarta zona é a zona partida por ser a maior de todas e apresentar a maior temporização de atuação.

3.2. Relé de Admitância

O relé de admitância é constituído de um cilindro de indução movido pela interação dos fluxos gerados pela bobina de tensão alimentada pelo transformador de potencial da linha

e pela bobina de corrente alimentada pelo transformador de corrente. Ele também é conhecido como relé *Mho*, que vem da inscrição da palavra *Ohm* de trás para frente.

Neste relé, a tensão de polarização do relé é utilizada como grandeza de restrição e a corrente da linha como grandeza de operação conforme a Equação 3.16.

$$T_{motor} = k_d \times E \times I \times \cos(r - \theta) - k_v \times E^2, \quad (3.16)$$

de modo que T_{motor} é o torque motor do cilindro, k_d e k_v são constantes provenientes dos ajustes do relé, E é a tensão eficaz de polarização do relé, I é a corrente efetiva de operação do relé, r é ângulo de máximo torque do relé e θ é o ângulo de defasagem entre a tensão de polarização e esta corrente.

Considerando-se o relé no limiar de operação e desprezando-se o efeito da mola de retenção, a Equação 3.16 fica:

$$0 = k_d \times E \times I \times \cos(r - \theta) - k_v \times E^2 \quad (3.17)$$

Dividindo por $k_d \times E^2$:

$$\frac{k_d \times E \times I \times \cos(r - \theta)}{k_d \times E^2} = \frac{k_v \times E^2}{k_d \times E^2} \quad (3.18)$$

Como I/E é a admitância y , tem-se que:

$$y \times \cos(r - \theta) = \frac{k_v}{k_d} \quad (3.19)$$

Sabendo-se que:

$$y = G + jB = y \times \cos(-\theta) + jy \times \text{sen}(-\theta) \quad (3.20)$$

$$\cos(r - \theta) = \cos(r) \times \cos(\theta) + \text{sen}(r) \times \text{sen}(\theta) \quad (3.21)$$

$$\cos(\theta) = \cos(-\theta) \quad (3.22)$$

$$\text{sen}(\theta) = -\text{sen}(-\theta), \quad (3.23)$$

e aplicando-se as relações das Equações 3.20, 3.21, 3.22 e 3.23 na Equação 3.19, obtém-se no plano complexo da admitância:

$$G \times \cos(r) - jB \times \text{sen}(r) = \frac{k_v}{k_d} \quad (3.24)$$

Então:

$$jB = \frac{G \times \cos(r)}{\text{sen}(r)} - \frac{k_v}{k_d \times \text{sen}(r)} \quad (3.25)$$

A Equação 3.25 é uma reta que pode mostrar o lugar geométrico das admitâncias de operação do relé de acordo com a Figura 3.3.

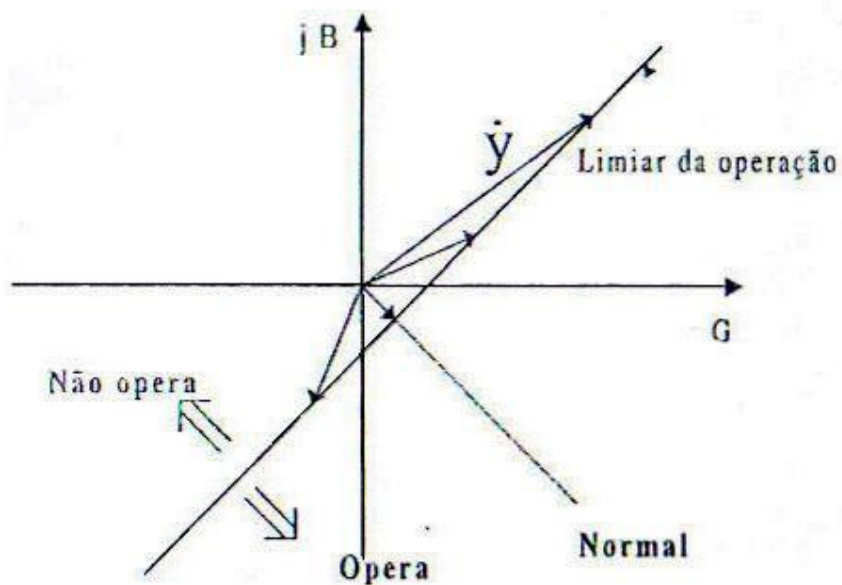


Figura 3.3 – Lugar geométrico das admitâncias de operação do relé no plano complexo.

Como é mais intuitivo ajustar as zonas de operação do relé através da impedância, a Equação 3.19 pode ser reescrita substituindo-se o termo que representa a admitância pelo inverso da impedância:

$$\frac{1}{z} \times \cos(r - \theta) = \frac{k_v}{k_d} \quad (3.26)$$

$$z = \frac{k_d}{k_v} \times \cos(r - \theta) \quad (3.27)$$

Traçando-se o lugar geométrico das impedâncias em que atua o relé no plano complexo obtém-se a Figura 3.4.

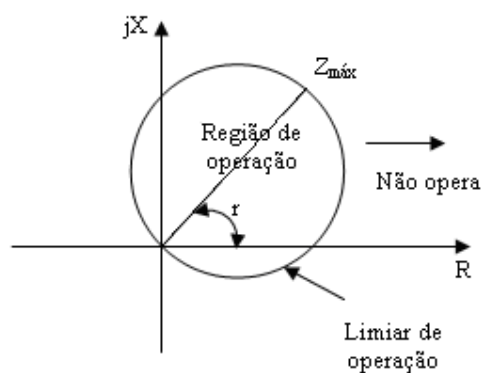


Figura 3.4 – Lugar geométrico das impedâncias de operação do relé no plano complexo.

de modo que:

$$Z_{máx} = \frac{k_d}{k_v} \quad (3.28)$$

Fica clara então a característica de direcionalidade deste relé, que permite a seletividade da proteção nos sistemas em anel sem a necessidade da combinação deste relé com uma unidade direcional. Frequentemente os relés de admitância eletromecânicos possuem três zonas de atuação a jusante: uma instantânea e duas temporizadas.

3.2.1. Ajuste das Zonas de Operação

O ajuste das zonas de operação é realizado de acordo com um algoritmo simples que utiliza as propriedades dos números complexos. Tal configuração é realizada através da combinação do diagrama da Figura 3.4 com a representação das características físicas das linhas de transmissão conforme a Figura 3.5. Nesta figura, estão representadas por retas duas linhas de transmissão consecutivas, uma que vai da barra *A* a barra *B* com ângulo da impedância de θ_{AB} e outra que vai da barra *B* à barra *C* com ângulo da impedância de θ_{BC} .

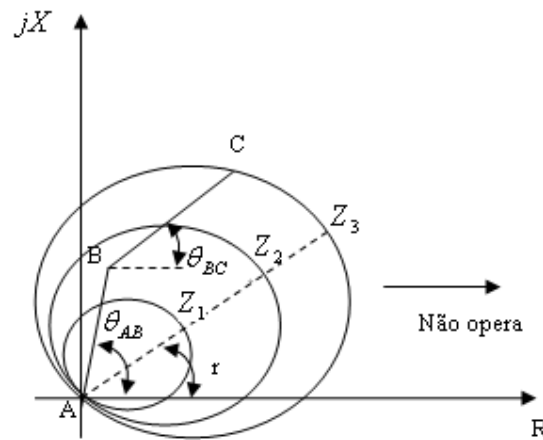


Figura 3.5 – Zonas de atuação do relé de admitância sobrepostas às linhas de transmissão no plano complexo de impedância.

Serão utilizados novamente como parâmetros os ajustes habituais da Light S.E.S.A.. Sendo o seguimento de 80% da linha de transmissão AB uma corda da circunferência da primeira zona, a reta perpendicular a esta linha traçada a partir de seu ponto médio passa pelo centro O desta circunferência de acordo com a Figura 3.6.

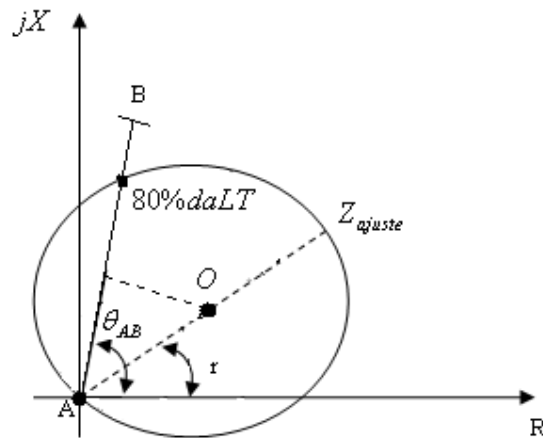


Figura 3.6 – Detalhamento do diagrama da impedância da linha de transmissão protegida pela primeira zona do relé de admitância.

Então é permitido escrever:

$$\frac{Z_{80\%LTAB}}{2} = \overline{OA} \times \cos(\theta_{AB} - r) \quad (3.29)$$

$$\frac{Z_{80\%LTAB}}{2} = \frac{Z_{ajuste}}{2} \times \cos(\theta_{AB} - r) \quad (3.30)$$

$$Z_{ajuste} = \frac{Z_{80\%LTAB}}{\cos(\theta_{AB} - r)} \quad (3.31)$$

Para ajustar a segunda zona, faz-se o cálculo complexo:

$$\bar{Z} = \bar{Z}_{20\%LTBC} + \bar{Z}_{100\%LTAB} = Z \angle \theta_z \quad (3.32)$$

Repetindo-se agora o procedimento realizado para o ajuste da primeira zona, utilizando o módulo e o ângulo da impedância fornecidos pela Equação 3.32, a impedância de ajuste da segunda zona é calculada. A configuração da terceira zona é feita similarmente à da segunda zona.

3.3. Relé de Reatância

O relé de reatância, como o próprio nome informa, atua baseado na reatância medida pelos transformadores de potencial e de corrente relacionados ao circuito protegido. Esta característica de operação é definida através da equação do torque motor do disco deste relé:

$$\tau_{motor} = K_I \times I^2 - K_E \times E \times I \times \sin \theta - K \quad (3.33)$$

Considerando-se que K_I é uma constante de ajuste do relé relacionada à bobina de corrente, K_E é outra constante de ajuste do relé relacionada à bobina de tensão e K é o torque gerado pela mola de restrição.

Conhecendo-se que no limiar de operação o torque motor é nulo, a Equação 3.33 fica:

$$0 = K_I \times I^2 - K_E \times E \times I \times \sin \theta - K \quad (3.34)$$

Dividindo-se por I^2 e através de alguma manipulação:

$$\frac{E}{I} \times \sin \theta = \frac{K_I}{K_E} - \frac{K}{K_E \times I^2} \quad (3.35)$$

Durante a falta, o termo I^2 assume um valor extremamente elevado, transformando a Equação 3.35 em:

$$\frac{E}{I} \times \sin \theta = \frac{K_I}{K_E} \quad (3.36)$$

Pelas conhecidas Equações 3.37 e 3.38, está provada a atuação do relé conforme a reatância medida da linha de transmissão.

$$Z = \frac{E}{I} \quad (3.37)$$

$$X = Z \times \sin \theta \quad (3.38)$$

Devido a suas características de operação, o relé de reatância é utilizado para proteger o sistema contra efeitos similares aos produzidos por arcos elétricos, que estão presentes em praticamente todas as ocorrências de curto-circuito e tem impedância predominantemente

resistiva. O lugar geométrico das impedâncias que operam o relé está representado na Figura 3.7.

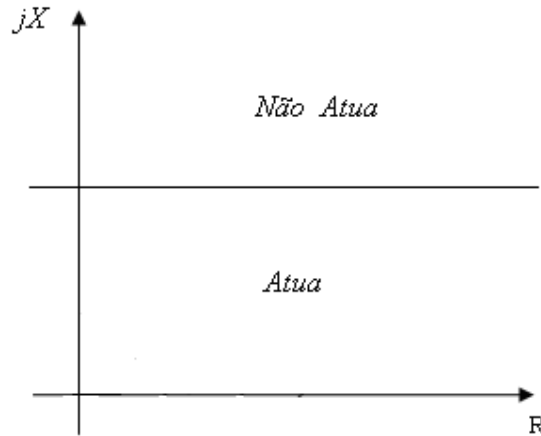


Figura 3.7 – Lugar geométrico das impedâncias de operação do relé de reatância.

Este tipo de relé dever ser sempre combinado com um relé de admitância ou outro dispositivo capaz de bloquear sua operação indevidamente. Caso a carga alimentada pela linha de transmissão protegida apresente fator de potência capacitivo ou elevado fator de potência indutivo, como a maioria dos casos, o relé pode enxergar uma falta e atuar.

3.3.1. Ajuste das Zonas de Operação

O relé de reatância é normalmente ajustado para operar com a reatância de 80% da linha de transmissão protegida, combinada com uma zona de operação do relé de admitância de grande alcance e com característica temporizada. Com a operação definida desta forma, está garantida a interrupção do circuito durante qualquer falta mesmo com a presença de arcos elétricos, pois a impedância de curto-circuito não sairá da circunferência do limiar de operação do relé de admitância. Está garantida também a continuidade do serviço em condições normais, pois a unidade de admitância não permitirá a operação do relé de

impedância independente do fator de potência da carga alimentada pela linha de transmissão. A combinação destes dois tipos de relé de distância proporciona a atuação da proteção somente na região azul da Figura 3.8.

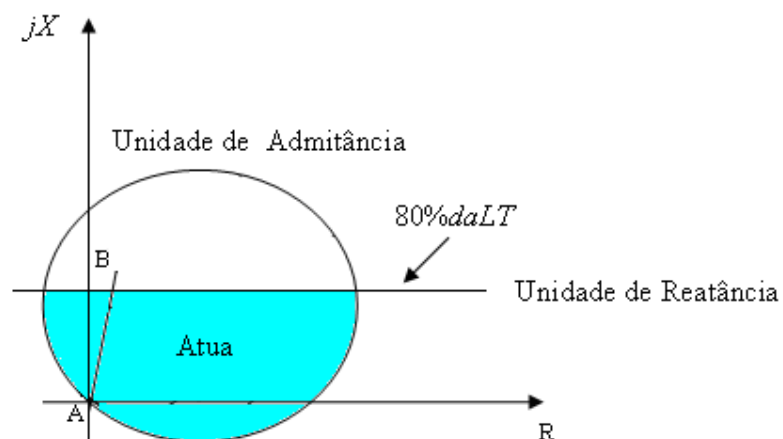


Figura 3.8 – Lugar geométrico das impedâncias de operação do relé de reatância combinado com uma unidade de admitância.

CAPÍTULO 4: RELÉ DIGITAL SEL 311-C

Os relés do tipo SEL 311-C são fabricados pela Schweitzer Engineering Laboratories (SEL) e encontram-se dentre os mais utilizados equipamentos de proteção digital.

O SEL 311-C possui seis canais de entrada para tensão e oito para corrente, contando ainda com 12 canais de entrada opcionais. Esse equipamento comunica-se com os demais através de 1 porta serial EIA-232 frontal, 2 portas seriais semelhantes e 1 porta serial EIA-485 no painel posterior, com sincronização através de IRIG-B. A vista frontal e a pinagem traseira deste relé podem ser observados na Figura 4.1 e na Figura 4.2 respectivamente. Ele pode conduzir continuamente 6A com picos de 30A durante a energização, e pode interromper correntes de até 0,3A, sendo possível o funcionamento com tensões contínuas de 24V, 48V ou 125V e tensões alternadas de 48V, 125V ou 250V. São ainda projetados para suportarem temperaturas variando de -40°C a 80°C.

Cada relé deste tipo apresenta funções de proteção, medição e monitoramento e ainda algumas propriedades adicionais como compensação do tempo de fechamento do disjuntor na lógica de proteção, consideração de trecho morto (stub bus), energização sob falta, detecção de transitórios etc. São equipamentos de alto desempenho que dispensam qualquer mecanismo ou lógica programável para comunicação com outros relés, controle e para a teleproteção. A interface com o equipamento é realizada através de um software bem simples e amigável a qualquer usuário, o AcSELerator.



Figura 4.1 – Relé SEL 311-C.

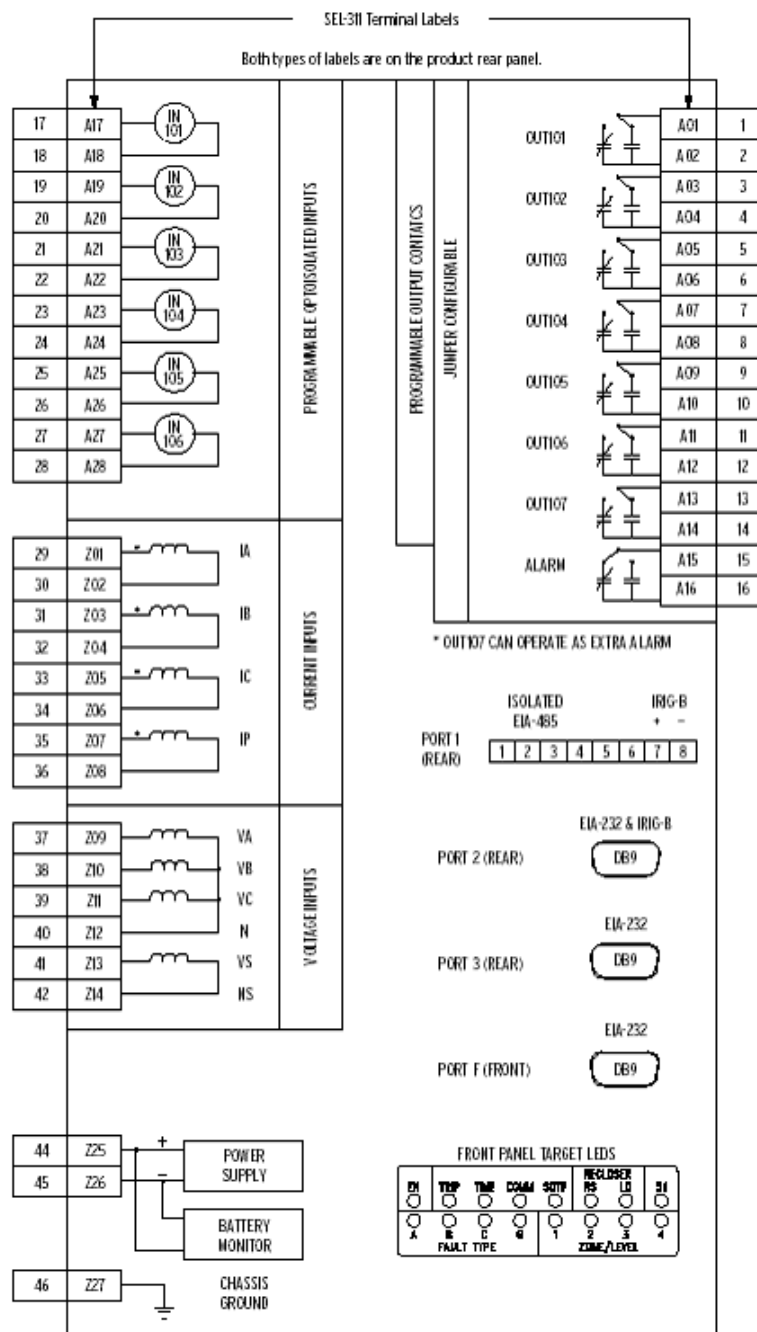


Figura 4.2 – Pinagem do painel traseiro do relé SEL 311-C.

4.1. Funções de Proteção

O relé SEL 311-C destina-se à proteção de linhas de transmissão, incorporando várias funções de proteção alinhadas de forma a atingir uma operação eficiente. Tais funções estão listadas a seguir:

- 50/51 – Proteção instantânea e temporizada contra sobrecorrente de fase;
- 50/51G – Proteção instantânea e temporizada contra sobrecorrente residual;
- 50/51Q (46) – Proteção instantânea e temporizada contra sobrecorrente de sequência negativa;
- 21 – Proteção de distância de fase por admitância dividida em quatro zonas de tipo Mho;
- 21G – Proteção de distância de neutro por admitância com quatro zonas do tipo Mho e quatro zonas do tipo quadrilateral;
- 67G – Proteção direcional contra sobrecorrente de neutro, polarizada por corrente ou tensão;
- 67Q – Proteção direcional contra sequência negativa;
- 85 – Esquemas de controle ou teleproteção (PUTT, POTT, DCUB, DCB, DTT, etc. ou lógica programável);
- 78/68 – Disparo e bloqueio por oscilação de potência;
- 79 – Religamento automático tripolar, com até quatro tentativas;
- 25 – Verificação de sincronismo;
- 27/59 – Proteção contra subtensão e sobretensão entre as fases e em relação ao neutro;
- 59G – Proteção contra sobretensão de neutro;
- 59Q – Proteção contra sobretensão de sequência negativa;
- 50/62BF – Proteção contra falha de disjuntor;

- 60 – Proteção contra perda de potencial;
- 81 – Proteção contra subfrequência e sobrefrequência e contra alta taxa de variação de frequência.

A sensibilidade e as faixas de detecção do relé às grandezas elétricas para as quais as funções acima podem ser ajustadas estão presentes na página 102, no Capítulo 8.

4.2. Funções de Medição

Este relé possui ainda funções de medição das grandezas elétricas no trecho protegido, como as correntes e tensões de fase, de sequência positiva, negativa e zero, correntes de neutro e tensões de sincronismo. Realiza ainda medições de potência ativa e reativa, trifásica ou por fase, nos quatro quadrantes, juntamente com o fator de potência trifásico e de cada fase.

4.3. Funções de Monitoramento

Este relé monitora a linha de transmissão como um oscilógrafo com capacidade de armazenamento de até 13s e gravação dos 512 últimos eventos. Ele possui ainda um sistema Localizador De Falhas (LDF) que pode funcionar com medidas em km ou em porcentagem da linha.

Ele monitora ainda outros equipamentos como as baterias pertencentes ao banco de alimentação CC auxiliar, podendo soar alarmes para sub e sobretensão. Verifica o desgaste

dos contatos dos disjuntores por pólo, monitora suas bobinas por programação lógica e ainda conta o número de operações realizadas por estes.

4.4. Funções de Controle

O relé SEL 311-C incorpora na sua lógica de controle as funções apresentadas abaixo:

- 6 entradas e 8 saídas digitais;
- Comandos para abrir e fechar disjuntores e chaves seccionadoras, locais ou remotos;
- 16 relés auxiliares e temporizadores, 16 chaves biestáveis, 16 chaves de controle local e remoto;
- Display programável com capacidade de exibição de até 16 mensagens;
- 6 grupos de ajustes;
- Seletividade lógica;
- Controle de torque das funções de sobrecorrente;
- Possui ainda anunciador, inibição de fechamento e retenção de sinal de disparo.

CAPÍTULO 5: EQUIPAMENTOS DE TESTE AUXILIARES

As vantagens de uma subestação automatizada e assistida por sistemas digitais são indiscutíveis, entretanto, as falhas em seus equipamentos raramente podem ser diagnosticadas por meras inspeções visuais. Há então, a necessidade da realização de testes em bancada desses dispositivos, com ferramentas compatíveis em matéria de tecnologia, que possam identificar defeitos e avaliar o seu funcionamento simulando as condições reais. Algumas dessas ferramentas são a mala de teste CMC 256-6 do fabricante Omicron e a caixa de simulação de subestações TRR-01 do fabricante Triel.

5.1. Fonte de Alimentação Trifásica Omicron

A mala CMC 256-6 funciona como uma fonte de alimentação, permitindo a aplicação de tensões alternadas monofásicas, bifásicas e trifásicas, com ou sem neutro, tensões contínuas, aplicação de correntes de qualquer tipo e ainda possui saídas binárias que permitem a realização de testes de comandos lógicos. O grande número de recursos deste equipamento habilita ensaios de praticamente todas as funções dos relés digitais.

5.1.1. Características Físicas da Mala Omicron CMC 256-6

Esta mala de testes possui as características listadas a seguir conforme a Figura 5.1.



Figura 5.1 – Visão frontal da mala de teste CMC 256-6 da Omicron.

5.1.1.1. Saídas de Tensão

São quatro saídas independentes e isoladas galvanicamente, com faixas de variação de 0 a 150V e de 0 a 300V, amplificadas linearmente com acoplamento CC.

5.1.1.2. Saídas de Corrente

São seis saídas independentes e isoladas galvanicamente, com faixas de variação de 0 a 1,25A e 0 a 12,5A, amplificadas linearmente com acoplamento CC. A mala possui ainda uma saída auxiliar de corrente contínua.

5.1.1.3. Saídas Binárias

São quatro saídas binárias independentes, que podem ser utilizadas como contato sem potencial dos relés.

5.1.1.4. Entradas de Corrente e Tensão

São duas entradas, uma de corrente, protegida por fusível, e outra de tensão, de alta precisão. A entrada de corrente apresenta duas faixas de variação, até ± 1 mA e até ± 20 mA, e a de tensão suporta até ± 10 V.

5.1.1.5. Entradas Binárias ou Analógicas

Elas são separadas em grupos de duas, isolados galvanicamente entre si. Estas entradas podem ser ajustadas como contatos binários secos (sem potencial) ou molhados (com potencial) conforme a necessidade através do programa que rege a operação da mala, o *Omicron Test Universe*. Cada uma delas pode ser utilizada como contador de frequência, com capacidade de contagem de até 3 kHz.

A sua adaptação como entradas analógicas de medição é realizada através da opção de operação *EnerLyser* da mala CMC 256-6. Funcionando deste modo, as dez entradas possuem capacidade de aquisição de sinais de até 10 kHz e são isoladas galvanicamente. As faixas possíveis de tensão de entrada eficaz são de 100 mV, 1 V, 10 V, 100 V e 600 V. Para a utilização das entradas como canais de corrente, esta pode variar até 80 A.

Com processamento DSP (Processador Digital de Sinal com Ponto Flutuante), além da medição, grandezas como potência, podem ser calculadas e mostradas em tempo real. Podem ser mostrados ainda todo o espectro harmônico dos sinais periódicos, os sinais transitórios com várias taxas de amostragem possíveis e inúmeras opções de trigger para a captura destes sinais.

5.1.1.6. Fonte Auxiliar de Corrente Contínua

É uma saída auxiliar de tensão contínua cuja função é alimentar o equipamento a ser testado. Esta saída é equipada com um led indicador de segurança cujo objetivo é alertar para a presença de tensões perigosas, acima de 42 V.

5.1.2. Omicron Test Universe

O *Omicron Test Universe* é o programa de computador que permite o controle e a coordenação da operação da mala de teste Omicron CMC 256-6. Através dele, toda a configuração da mala é realizada, bem como as amplitudes das ondas de tensão e corrente dos canais de saída, a forma dessas ondas, a frequência etc.

De acordo com a Figura 5.2, ao abrir o programa o usuário tem acesso a 7 menus principais, subdivididos em outras opções a serem selecionadas conforme o ensaio realizado:

- Módulos de Teste: Onde é configurada a partida autônoma da mala de teste;
- Control Center: Onde é possível criar projetos de ensaios multifuncionais ou abrir projetos já existentes;
- Administração de Teste: Funciona com um banco de dados do relé e de outros testes realizados;
- Ferramentas de Teste: São funções adicionais, oferecidas pela CMC 256-6 que podem ser incluídas no teste;
- Setup: São as configurações do equipamento;
- Suporte: Consiste na documentação e assistência técnica que pode ser consultada em caso de dúvida;
- Usuário: Onde são encontradas as ferramentas pessoais do usuário.

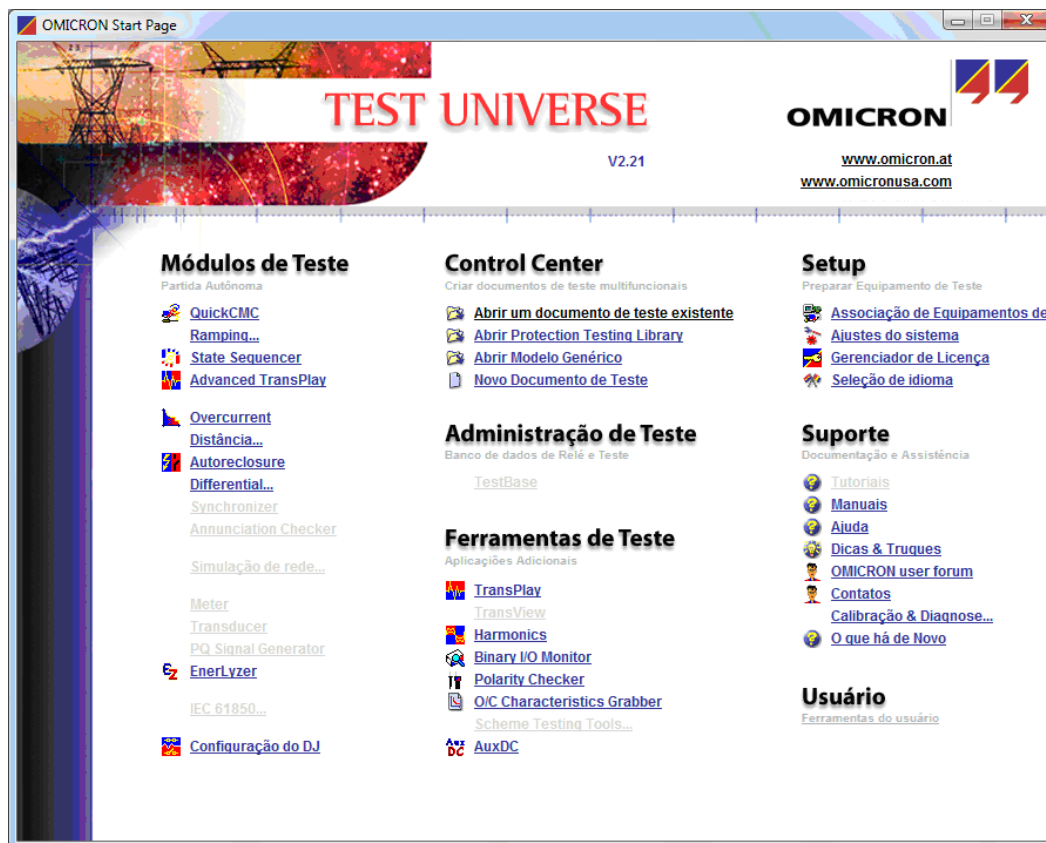


Figura 5.2 – Tela inicial do programa *Omicron Test Universe*.

É de utilidade neste trabalho apenas as opções presentes no menu “Módulos de Teste”, assim, somente elas serão comentadas.

5.1.2.1. Quick CMC

Através desta ferramenta praticamente todas as funções da mala de teste podem ser utilizadas. Ela funciona como uma opção de inicialização rápida, onde o ensaio é definido de modo simples e claro.

Quando essa opção é selecionada, a tela mostrada na Figura 5.3 é aberta, possibilitando a definição e alteração de qualquer um dos parâmetros do teste antes ou durante a sua realização. É possível definir os fasores de tensões e correntes de alimentação, se as

entradas binárias serão utilizadas como disparo ou não, se o acréscimo dos sinais aplicados na saída será em rampa com passo manual ou automático etc.

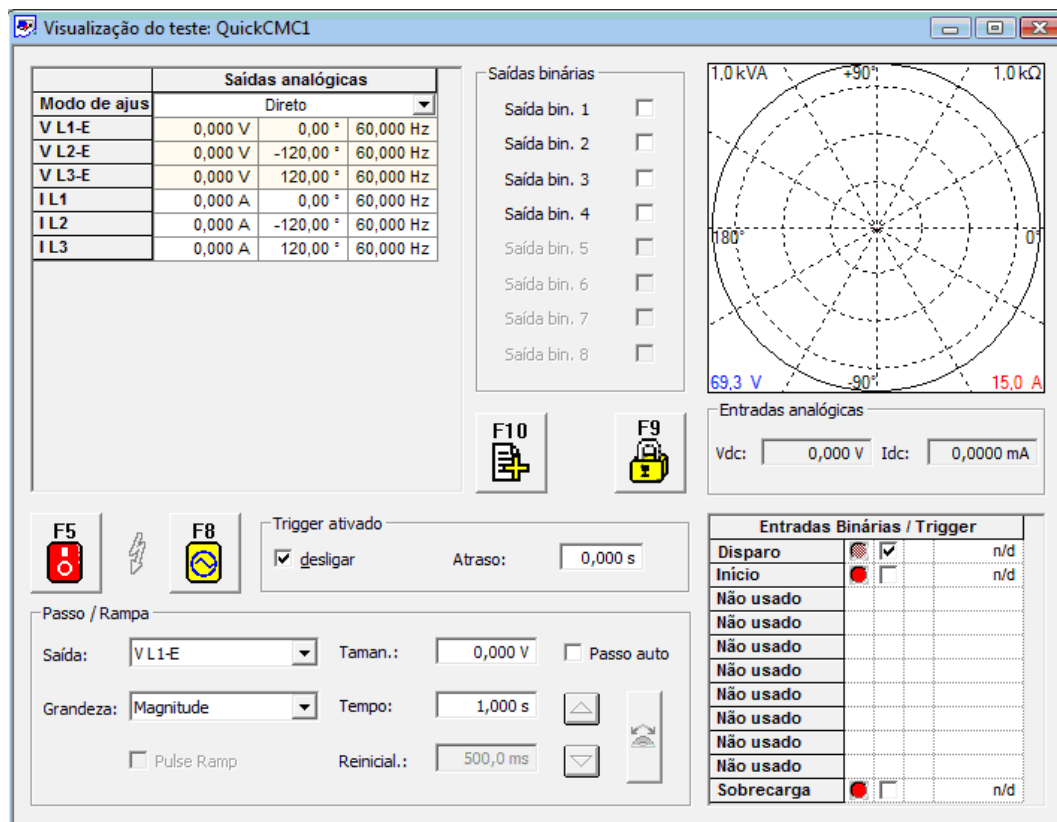


Figura 5.3 – Tela da ferramenta *Quick CMC*.

Executando-se testes a partir desta ferramenta, é possível a obtenção das correntes e tensões de operação dos relés, tempos de abertura e fechamento dos disjuntores comandados por relés instantâneos ou temporizados.

5.1.2.2. Ramping

A ferramenta *Ramping* é caracterizada pelas mesmas funções que a ferramenta *Quick CMC*, porém, ela tem um recurso adicional que permite a aplicação de sinais de tensão e corrente com rampas de amplitude, frequência e fase. Podem ser geradas rampas de até duas

variáveis distintas simultaneamente, com capacidade de execução de cinco segmentos consecutivos de rampa.

5.1.2.3. State Sequencer

Esta ferramenta é um seqüenciador de estados que permite a simulação de qualquer tipo de curto-circuito ou efeito transitório. Contando com 12 canais independentes de saída, que podem ter seus valores de tensão, corrente e frequência escolhidos, os defeitos são facilmente reproduzidos. A Figura 5.4 mostra a tela de interface desta ferramenta.

O período de duração dos estados pode ser definido pelo executante dos testes ou pela utilização das entradas binárias da mala de teste. Desta forma, os tempos de atuação do relé para ocorrência de faltas sucessivas podem ser obtidos. As condições de cada estado são definidas para os instantes pré-falta, durante a falta e pós-falta, de modo que uma oscilografia do evento é gerada para auxiliar a análise. Há ainda a possibilidade da inserção dos tempos de atuação definidos para o relé, o que permite a comparação do tempo real com o tempo de atuação desejado.

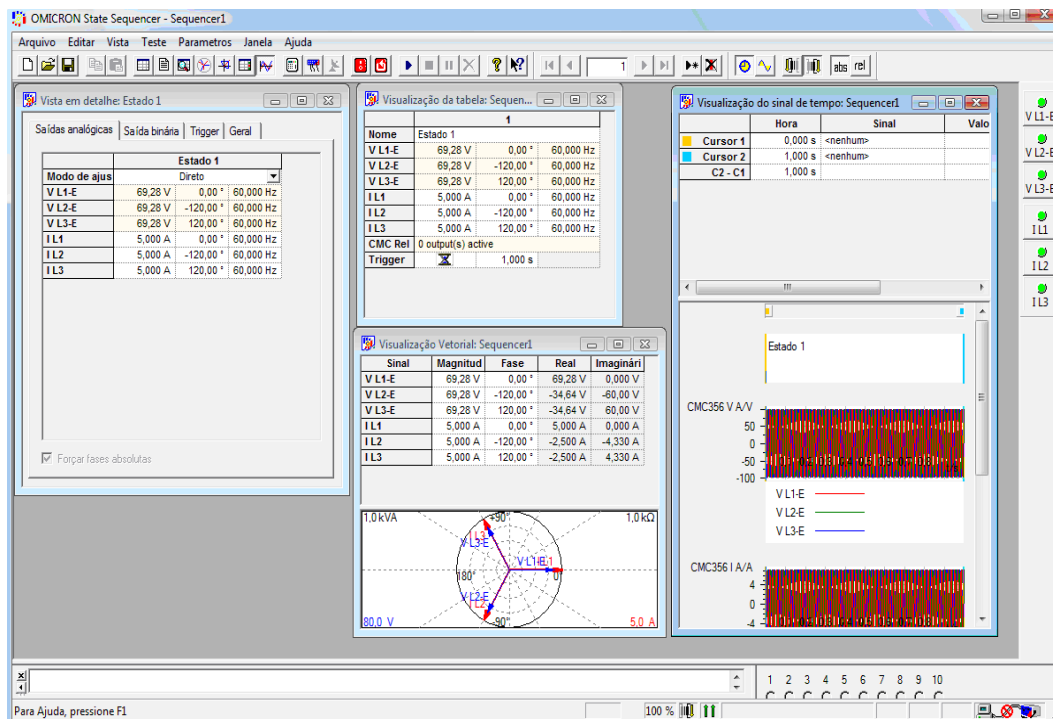


Figura 5.4 – Tela da ferramenta *State Sequencer*.

5.1.2.4. Advanced Transplay

O aplicativo *Advance Transplay* permite a aplicação de sinais pré-definidos no equipamento testado, a partir de um arquivo de oscilografia. Esta ferramenta é extremamente útil quando se deseja repetir em laboratório os efeitos de uma falta real, já ocorrida no sistema e gravada através de um oscilógrafo.

5.1.2.5. Testes de Funções Padronizadas

Estas ferramentas são utilizadas para testes das funções mais comuns em relés de proteção como o listado a seguir:

- *Overcurrent* – utilizado para testar as funções de sobrecorrente instantânea e temporizada (função 50/51) dos relés;
- *Distância* – utilizado para testar a função de distância (função 21) dos relés;
- *Differential* – utilizado para testar a função diferencial (função 87) dos relés.

5.1.3. Execução de Ensaios com a Omicron CMC 256-6

Para a realização de ensaios com a CMC 256-6 são necessários cabos de conexão com terminal “banana” para a comunicação e alimentação do equipamento testado, cabo com conexão “paralela” ou “ethernet” para a comunicação com o computador e um computador para coordenação da mala de teste.

Os primeiros passos para realizar o teste com o auxílio da mala são conectá-la ao computador e ao equipamento a ser testado. Ao ser iniciado no computador, o programa *Omicron Test Universe* fará um diagnóstico da comunicação entre o computador e a CMC 256-6 e caso haja algum problema, será mostrada uma mensagem de erro. Para contornar esse problema, deve-se clicar no ícone “setup” do *Omicron Test Universe* e em seguida “Associação de Equipamentos”. Depois da inicialização, aparecerá no campo “estado” a mensagem a seguir: “Configuração de IP do equipamento de teste e PC são incompatíveis”. Prosseguindo, deve-se clicar no ícone “configuração de IP”, e depois clicar em “sim” e “ok”, entrando em seguida com o endereço de IP do computador, mudando apenas seu último dígito. Em seguida, pressionar o ícone “associar” e apertar manualmente o botão “associate” na traseira da mala de teste. Clicando em “ok”, aparecerá no campo “estado” a mensagem: “Equipamento de teste está pronto para uso e comunicando”. Então, é só fechar o aplicativo e iniciar o ensaio desejado.

5.1.4. Procedimento para a Geração de Sinais pela Mala CMC 256-6 a Partir de Arquivo Comtrade

Quando há alguma ocorrência de atuação de um relé digital, quando programado para tal, este retira a oscilografia da falta e guarda em um padrão internacional chamado *Comtrade*. Estes arquivos podem ser gerados também por oscilógrafos e são gravados no formato *cfg*.

Depois de iniciado o programa *Omicron Test Universe* e a mala ser conectada ao computador, o aplicativo *Advanced Transplay* citado na Seção 5.1.2.4 deve ser aberto. Feito isso, todas as janelas abertas que não são do programa devem ser fechadas e aquelas que não puderem, devem ser minimizadas. Então, o usuário deve conferir se no canto inferior da tela aparecerá uma mensagem “CMC256-6 (BJ615F) conectado ao PC” conforme a Figura 5.5. Esta mensagem indica que há comunicação entre o micro e a mala de teste. Caso ela não apareça ou apareça alguma mensagem de erro, reinicie o programa e verifique os cabos de conexão, ou ainda se outro programa esteja utilizando ou já tenha utilizado as portas do computador.

Acessando o menu “Arquivo” e posteriormente a opção “Abrir”, um arquivo *.cfg* poderá ser selecionado através de um clique duplo.

O passo seguinte é abrir a janela “Visualização do sinal no tempo...” pelo menu “Vista” e através da escolha da opção “Sinal de tempo”. Maximizando essa janela, no campo “Modo” selecione a opção “Expanded” e no campo “Sinais” a opção “One Signal per Diagram”. A partir disso, todos os sinais de tensão e corrente presentes no arquivo *Comtrade* serão visualizados e poderão ser escolhidos qual ou quais deles serão aplicados na bancada de teste. A Figura 5.6 dá um exemplo da visualização dos sinais de um arquivo de oscilografia.

Prosseguindo no teste, o menu “Parâmetros” deve ser aberto e deve ser escolhida a opção “Configuração de hardware...”. A seguir, na opção “Geral”, clique no ícone “Detalhes”. Será aberta uma janela “Detalhes da configuração de saída” conforme a Figura 5.7. Escolha a configuração mais compatível com os sinais a serem aplicados atentando para:

- Características de aplicação de tensão e corrente;
- Níveis dos sinais aplicados;
- Números de sinais simultâneos nos canais;
- Potência requerida.

Após efetuar a configuração, clicar em “Ok”.

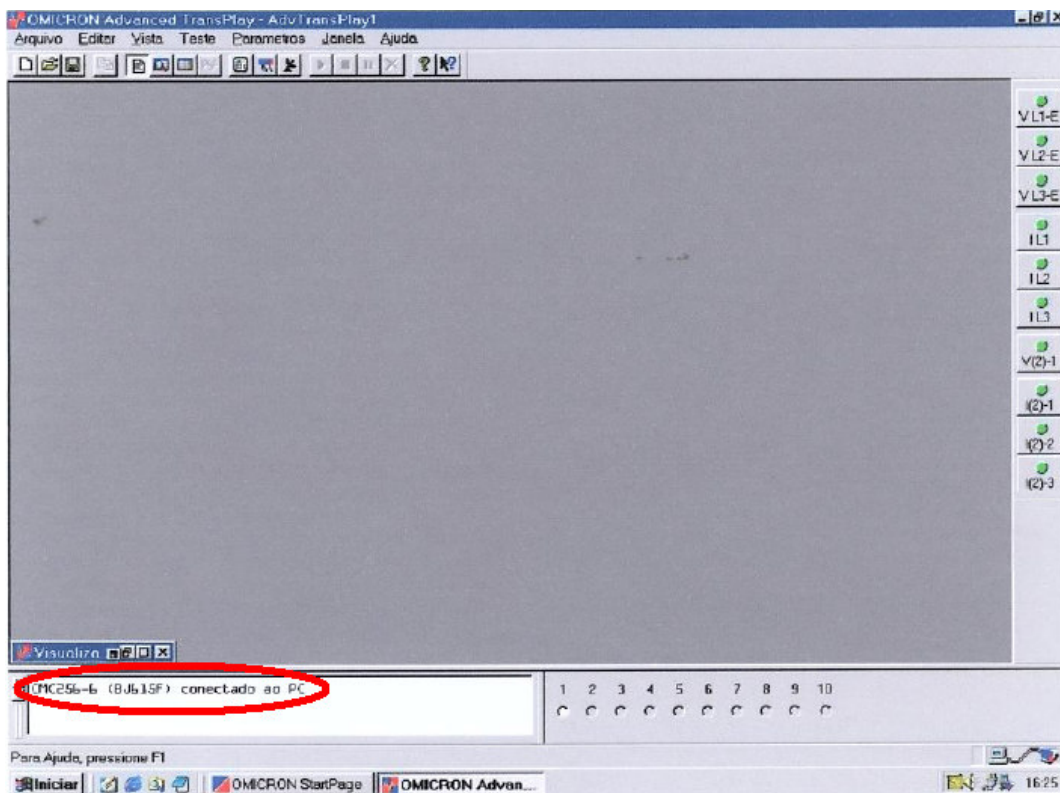


Figura 5.5 – Tela inicial do aplicativo *Advanced Transplay* na situação de comunicação normal entre a mala de teste e o computador.

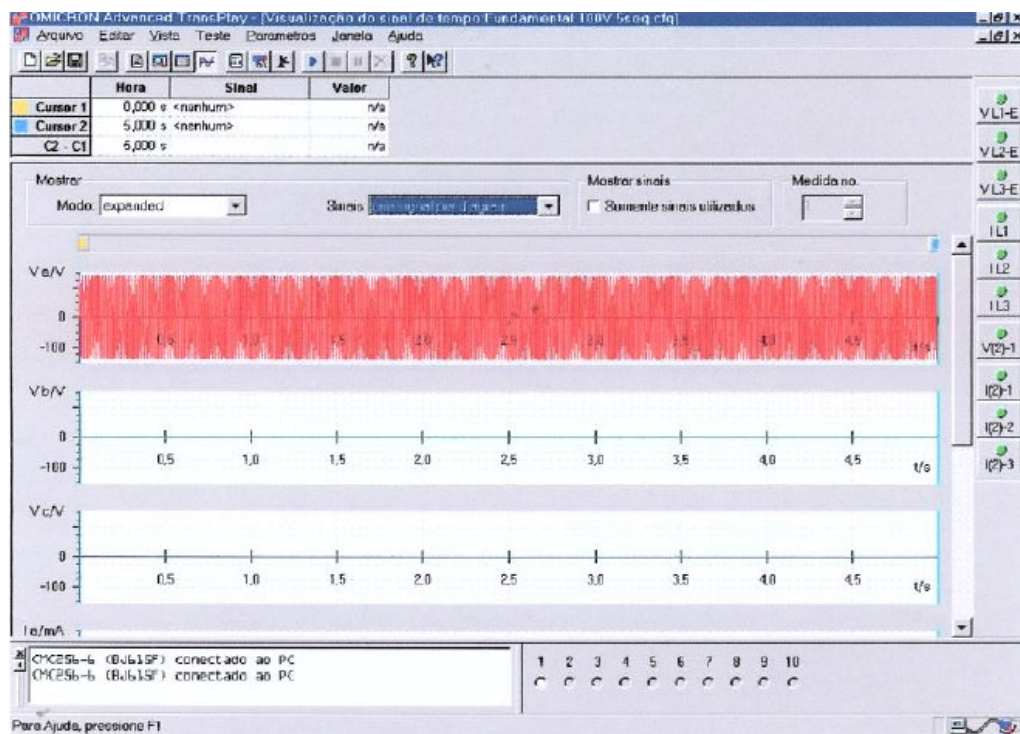


Figura 5.6 – Sinais de oscilografia observados através do aplicativo *Advanced Transplay*.

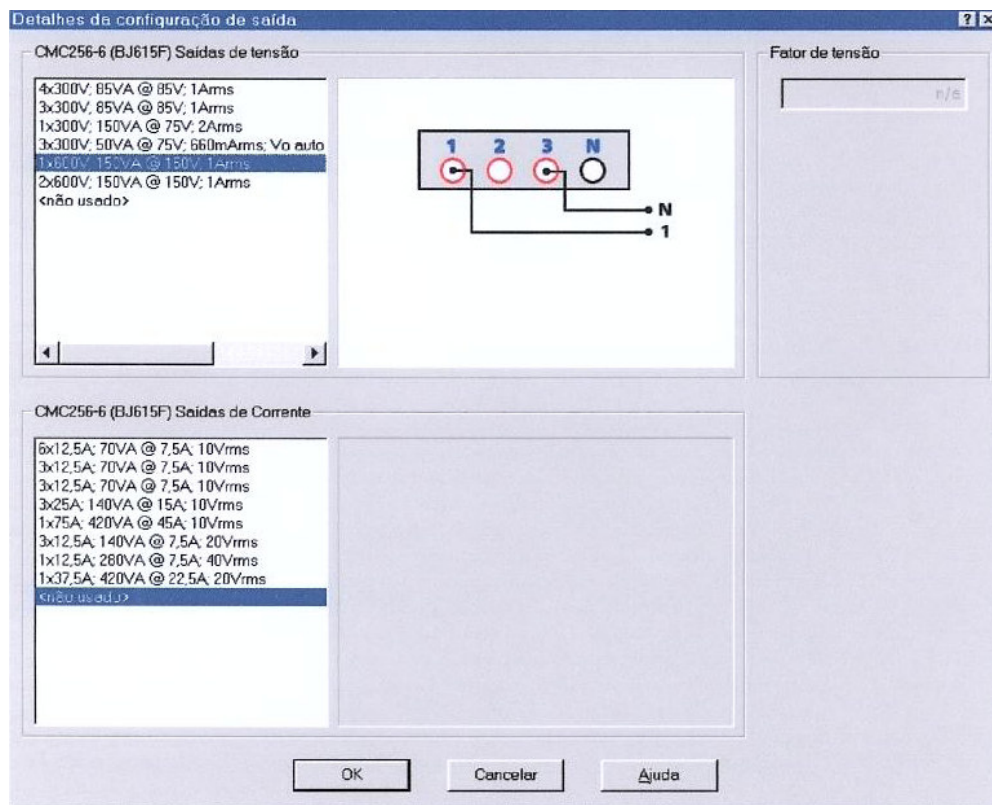


Figura 5.7 – Tela de configuração de hardware para o ensaio.

É importante a coerência da configuração com os sinais que se pretende aplicar, caso contrário o ensaio não funcionará. Por exemplo, uma falha ocorreria caso se desejasse aplicar três tensões defasadas em 120° e o equipamento estivesse configurado para apenas um canal de tensão.

Selecionando em seguida a opção “Ok”, a janela “Configuração de hardware” será fechada. Então, através do menu “Vista”, a opção “Detalhe” deve ser selecionada. Será aberta uma janela com uma aba chamada “Saídas analógicas”, que ao ser selecionada, proporcionará a visualização de uma tabela similar ao MS-Excel, onde serão definidos quais sinais sairão pelos canais configurados anteriormente como pode ser visto na Figura 5.8.

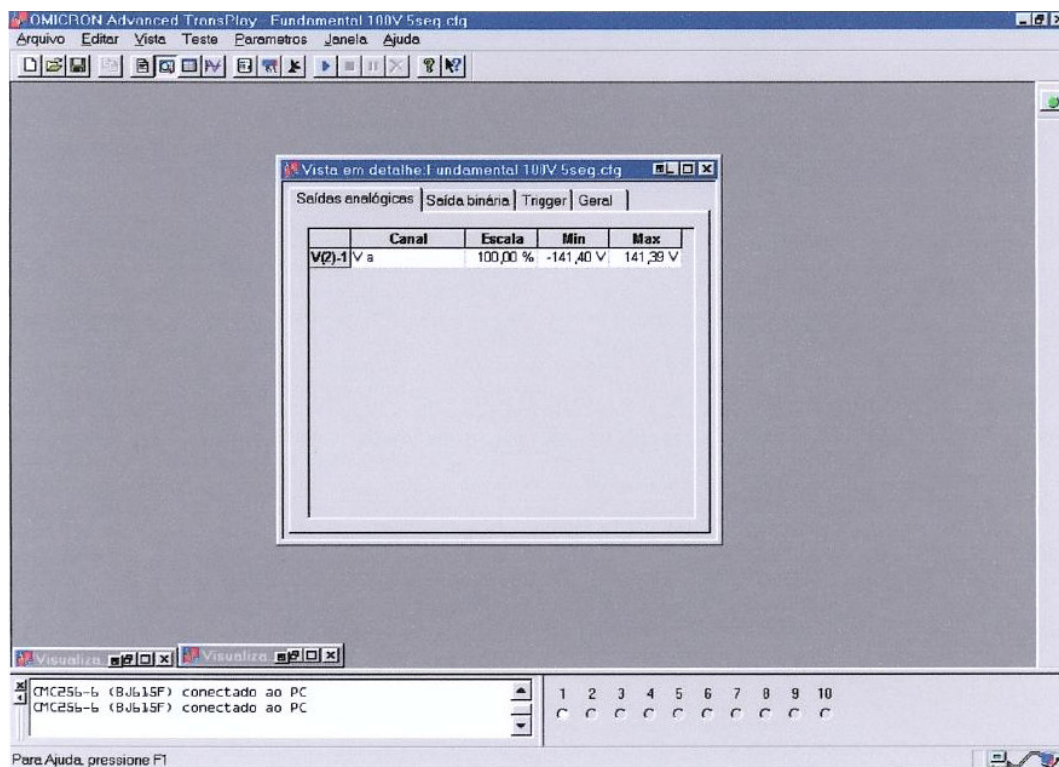


Figura 5.8 – Tela de definição dos canais onde serão aplicados os sinais de tensão e corrente.

Na coluna “Canal”, poderão ser escolhidos os sinais colhidos dos arquivos de oscilografia. Caso haja a indisponibilidade do sinal desejado, provavelmente a configuração dos canais foi realizada de modo errôneo. Haverá ainda uma coluna chamada “Escala”, onde os sinais de tensão e corrente aplicados podem ter seus valores alterados. Deve-se sempre atentar que um sinal amplificado pode sobrecarregar a mala de teste, danificando-a ou ainda distorcer as formas de onda e conseqüentemente gerando perda na fidelidade do ensaio com o evento registrado em *Comtrade*. Há ainda a possibilidade de se configurar o número de repetições de cada sinal e o intervalo dessas repetições pela aba “Geral”.

Para início da aplicação dos sinais, minimize a janela “Vista em detalhe” e maximize a janela “Visualização do sinal no tempo:...”. O ensaio começará quando a opção “Iniciar/Continuar” no menu “Teste” for selecionada. Ao fim do teste, aparecerão no canto esquerdo inferior as mensagens “Teste iniciado” e “Teste terminado”, sem mensagens de erro caso o ensaio tenha decorrido como desejado, e uma tela mostrando em destaque o sinal aplicado de acordo com Figura 5.9.

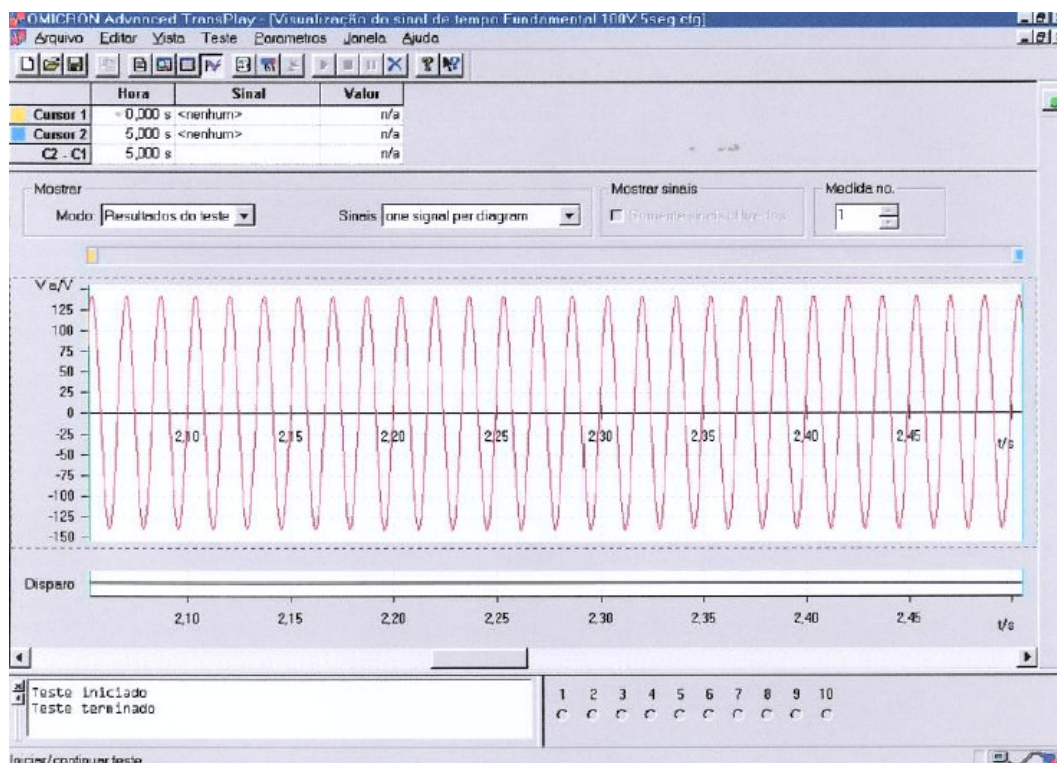


Figura 5.9 – Visualização do sinal aplicado durante o ensaio.

5.2. Caixa de Simulação de Subestações Triel TRR-01

Visando a simulação de falhas e defeitos nos componentes mecânicos das subestações, como os disjuntores, é utilizada a caixa de simulação TRR-01. Este dispositivo pode representar vários tipos de falha, até mesmo rompimento dos condutores de controle.

5.2.1. Características Físicas da Caixa Triel TRR-01

A caixa Triel TRR-01 contém contatos Normalmente Abertos (NA) e Normalmente Fechados (NF) que podem simular a operação de chaves contadoras, chaves biestáveis e os sinais de abertura e fechamentos dos disjuntores como pode ser observado na Figura 5.10.

Cada um destes contatos é acionado por uma entrada binária cujo sinal de entrada provém do relé.

O equipamento possui ainda um seletor de tempo de religamento do trecho protegido, que equivale à defasagem temporal entre o envio do comando de abertura e a execução do mesmo. Ele possui um simulador de defeito de operação do disjuntor, seja por rompimento de algum cabo de comando ou por falha em sua bobina de abertura. O tempo de carregamento das molas também pode ser simulado, e caso haja necessidade, a caixa TRR-01 possui fontes auxiliares de alimentação CA e CC.



Figura 5.10 – Visualização frontal da caixa Triel TRR-01.

CAPÍTULO 6: TESTES EM BANCADA DO RELÉ SEL 311-C

Cada vez que um novo relé é adquirido, é necessária a realização de ensaios de homologação. Esses ensaios permitem a detecção de falhas e ainda a observação das limitações do equipamento, possibilitando a análise da viabilidade de aplicação do mesmo na função almejada.

Serão apresentados neste capítulo ensaios das funções de distância nas zonas 1, 2 e 3, função de sobrecorrente direcional temporizada e função de proteção contra falha de disjuntor. Cada um desses testes será realizado utilizando dois relés SEL 311-C simulando a proteção de uma linha em barras opostas.

6.1. Parametrização do Relé SEL 311-C

Os ajustes do relé são enviados através do software de parametrização *AcSELerator*. Este programa permite a configuração do relé e a aquisição de dados em tempo real, como medidas de tensão e corrente da linha protegida. É possível ainda obtenção de oscilografias e listas de eventos armazenados no SEL 311-C.

Ao abrir o programa, aparecerá uma janela inicial onde é escolhida a opção do projeto conforme a Figura 6.1. Para criar uma nova parametrização do relé, foi selecionada a opção “New”. Será aberta então uma janela onde será selecionado o equipamento a ser testado. Na coluna “Device Family” deve ser selecionada a opção “SEL-311”, na coluna “Device Model” a opção “SEL-311C” e na coluna “Version” a opção “5” de acordo com a Figura 6.2. Clicando-se em “OK”, uma janela de configurações primárias será aberta, vide a Figura 6.3.

As configurações primárias são construtivas do equipamento e caracterizam-se pela interface com o usuário, as relações de corrente de entrada, as placas de entrada e saída e os

protocolos de comunicação. Clicando-se em “OK”, aparecerão os grupos de ajustes a serem configurados. Seguindo o caminho “Group 1\Set 1\...” conforme a Figura 6.4, o relé é parametrizado.

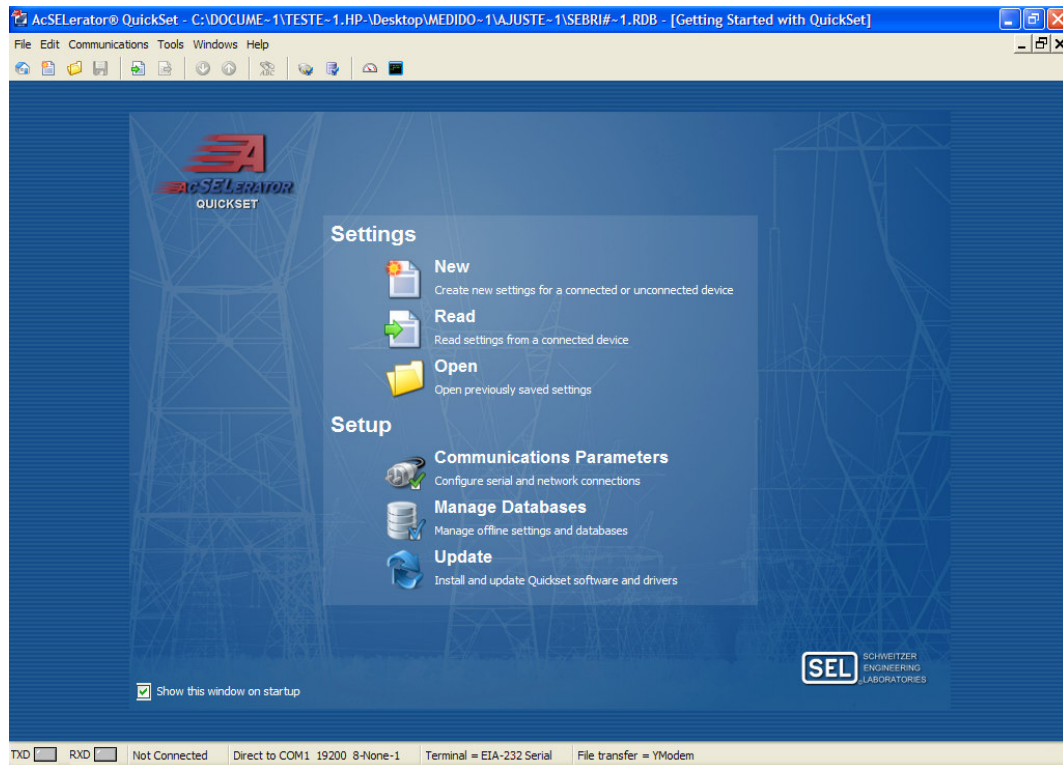


Figura 6.1 – Tela inicial do programa AcSELeRator.

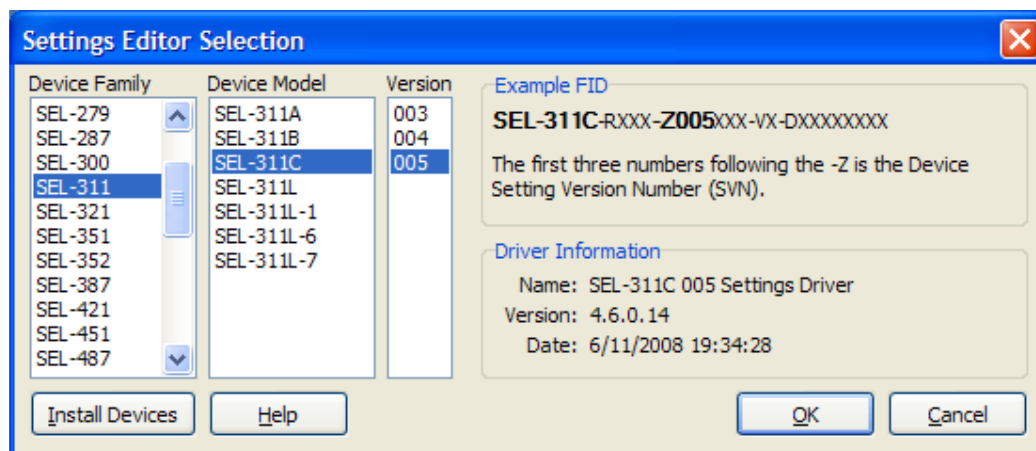


Figura 6.2 – Definição do equipamento utilizado pelo programa AcSELeRator.

Device Part Number

Part Number: 0311C * * * 2 * * 5 * X X * *

User Interface
 2 = LCD and Targets

Secondary Input Current
 5 = 5 Amp Phase and Neutral

I/O Board
 X = No Additional I/O

Communications Protocol
 X = Standard

OK

Figura 6.3 – Tela de entrada das características construtivas do relé no software AcSELeRator.

AcSELeRator® QuickSet - C:\DOCUME~1\TESTE~1\HP\Desktop\MEDIDO~1\AJUSTE~1\SEBRI#~1.RDB - [Settings Editor - New Settings 1 (SEL-311C 005 ...]

File Edit Communications Tools Windows Help

Group 1
 Set 1
 General Settings
 Line Settings and Fault Locator
 Phase Distance
 Ground Distance
 Phase Instantaneous Overcurrent
 Residual Ground Instantaneous Overcurrent
 Negative-Sequence Instantaneous Overcurrent
 Phase Time-Overcurrent
 Residual Ground Time-Overcurrent
 Negative-Sequence Time-Overcurrent
 Out-of-Step Settings
 Load-Encroachment
 Directional Elements
 Voltage Elements
 Synchronism Check
 Frequency Elements
 Redosing Relay
 Switch-On-to-Fault
 Comm. Assisted Trip Schemes
 Mirrored Bit Transmit and Receive
 Zone 1 Extension Settings
 Demand Metering
 Other Settings
 SELogic Control Equation Variable Timers
 Logic 1
 Graphical Logic 1
 Logic Simulator 1
 Group 2
 Group 3
 Group 4
 Group 5
 Group 6
 Global
 SER
 Text

General Settings

Relay Identifier Labels

RID Relay Identifier (30 chars)
 SEL-311C POTT

TID Terminal Identifier (30 chars)
 EXAMPLE: BUS B, BREAKER 3

Current and Potential Transformer Ratios

CTR Phase (A,B,C) CT Ratio, CTR:1
 200 Range = 1 to 6000

CTRP Polarizing (IPOL) CT Ratio, CTRP:1
 200 Range = 1 to 6000

PTR Phase (A,B,C) PT Ratio, PTR:1
 2000.00 Range = 1,00 to 10000,00

PTRS Synch. Voltage (VS) PT Ratio, PTRS:1
 2000.00 Range = 1,00 to 10000,00

Application Settings

APP Application
 311C Select: 311C, 221G, 221G5, 221H, 221F, 221F3, 221C, 221-16, 2PG10

EADVS Advanced Settings Enable
 N Select: Y, N

SEL-311C 005 Settings Driver Driver Version: 4.6.0.14 Date: 6/11/2008 19:34:28 Part #: 0311C00H24254000X Group 1: General Settings

TXD RXD Not Connected Direct to COM1 19200 8-None-1 Terminal = EIA-232 Serial File transfer = YModem

Figura 6.4 – Parametrização do relé pelo software AcSELeRator.

6.2. Execução dos Ensaios

As faltas foram simuladas pelo aplicativo *State Sequencer* da mala Omicron CMC 256-6, embora este equipamento já possua um aplicativo direcionado a testes da função distância. Os ensaios foram realizados desta forma, para que houvesse uma liberdade maior na definição dos parâmetros das faltas simuladas, sem nenhuma configuração automática da mala de teste.

Foram utilizados dois relés, ambos simulando a proteção da mesma linha, porém, localizados em extremidades opostas conforme a Figura 6.5. A linha de transmissão protegida foi parametrizada com 11km de extensão e impedância de $0,21\Omega$, com ângulo de $85,85^\circ$, simulando a linha que conecta a Subestação Zona Industrial da Light S.E.S.A., em Santa Cruz, à Subestação Santa Cruz da empresa Furnas Centrais Elétricas S.A., sendo a linha a jusante desta, com impedância de $17,45\Omega$. A Tabela 6.1 mostra as zonas de admitância configuradas no equipamento. As zonas 1, 2 e 4 foram ajustadas para proteger contra falhas a jusante enquanto a zona 3 é a zona reversa do equipamento.

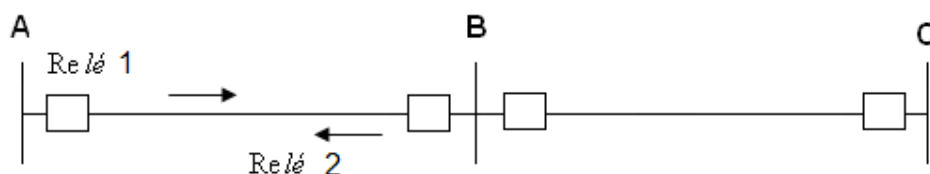


Figura 6.5 – Situação simulada exclusivamente para os ensaios nos relés SEL 311-C

Tabela 6.1 – Parametrização das zonas de admitância do relé.

Zona	Impedância de Atuação (Ω)	Porcentagem da Linha
1	0,17	80% da Linha AB
2	3,7	100% da Linha AB + 20% da Linha BC
3	8,64	50% da Linha BC Reversamente
4	3,7	100% da Linha AB + 20% da Linha BC

Há uma subdivisão da segunda zona que corresponde à região entre 80% e 100% da linha protegida. Esta subdivisão é conhecida como “Segunda Zona Acelerada” e tem este nome devido ao curto período de atuação do relé. Neste caso, não há a necessidade do tempo de abertura do disjuntor ser alto, pois em curtos-circuitos na linha protegida, não haverá sinal de bloqueio advindo do relé da outra extremidade.

Outra função de proteção habilitada nos equipamentos foi a de sobrecorrente direcional. Esta função protege a linha contra faltas de alta impedância que não sensibilizam nenhuma das zonas da função de distância. A unidade de sobrecorrente direcional foi parametrizada para atuar com correntes iguais ou superiores a 5A.

Para proteção contra falha na operação do disjuntor, foi programada uma ação de reenvio do comando de abertura da linha pela saída binária OUT203 do relé. Os demais comandos de abertura foram programados para serem enviados pela saída OUT103.

Comumente, as faltas são originadas por interferências externas temporárias, como a galhos de árvores movidos pelo vento, linhas de pipa etc. Para evitar que as linhas permaneçam desligadas desnecessariamente, o relé foi programado também para disparar o religamento automático (função 79 pela norma ANSI).

O equipamento foi programado para religar a linha 3 segundos após a abertura dos disjuntores para faltas na primeira zona de distância do relé. Após a interrupção do circuito pelos disjuntores, o relé checa a tensão das fases C da barra e da linha, obtidas através dos transformadores de potencial, estão com diferença máxima em seu valor eficaz de 10V, até 30° elétricos de defasagem e variação limite na frequência de 200mHz. Caso alguma dessas condições não seja atendida o religamento automático é bloqueado. Esta função de religamento é bloqueada também caso ocorra outro defeito em um tempo menor que 60

segundos após o primeiro religamento da linha. O canal de saída do sinal de religamento programado nos relés foi o OUT101.

6.2.1. Operação da Função de Distância com Simulação de Defeito na Primeira Zona de Atuação do Relé 1

Para realizar este ensaio, foram configurados três estados operacionais consecutivos, aplicados pela mala de teste de acordo com a Figura 6.6. Cada um destes estados teve seus parâmetros de tensão e corrente definidos de modo que diferentes impedâncias fossem simuladas.

O primeiro estado simula uma situação normal de operação, simulando tensões de 66,4V defasadas em 120° na sequência ABC, fornecidas pelos transformadores de potencial das fases da linha a jusante e correntes de 1A fornecidas pelos transformadores de corrente destas fases igualmente defasadas. Sua duração foi definida em 5s, tempo mais do que necessário para a simulação de um estado pré-falta.

O segundo estado simula uma falta grave trifásica, onde as tensões fornecidas pelos transformadores de potencial são reduzidas a 300mV e as correntes fornecidas pelos transformadores de corrente foram aumentadas para 5A defasadas em $-85,85^\circ$ das tensões. Desta forma, a impedância da falta por fase é de $0,06\angle 85,85^\circ \Omega$. A execução deste estado é interrompida pelo pulso binário advindo da caixa de simulação de disjuntores.

O terceiro e último estado desta simulação representa os instantes pós-falta. Nele as tensões iniciais são restabelecidas e as correntes das fases são nulas devido à abertura virtual do disjuntor. Sua duração é de 10s.

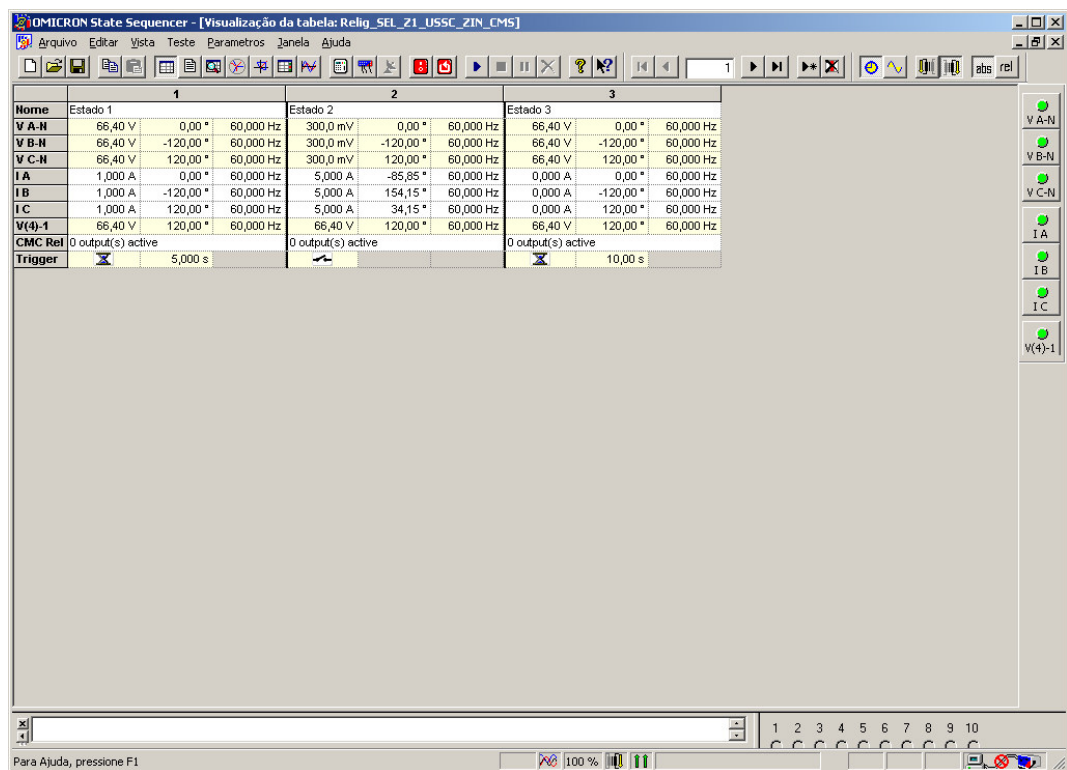


Figura 6.6 – Estados do ensaio da operação da função de distância com simulação de defeito na primeira zona de atuação do relé 1.

A configuração do término dos estados 1, 2 e 3 pode ser observada nas Figuras Figura 6.7, Figura 6.8 e Figura 6.9 respectivamente, e foi feita através da opção “Vista em Detalhe” dos estados.

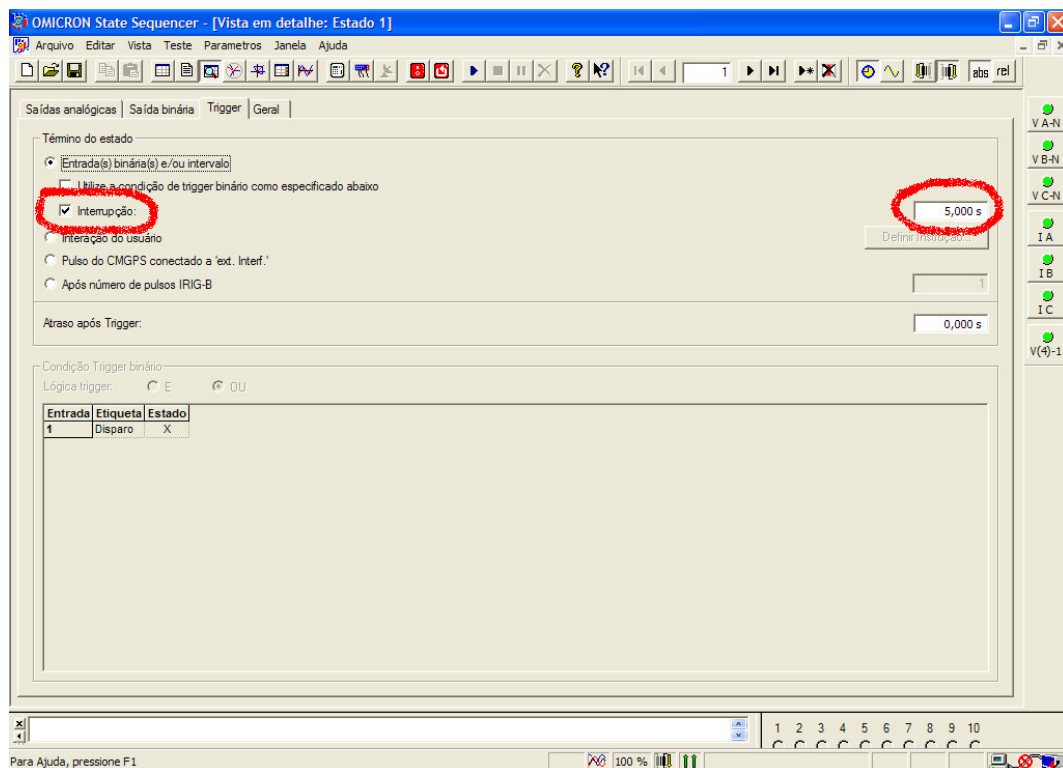


Figura 6.7 – Configuração do término do estado 1 no State Sequencer.

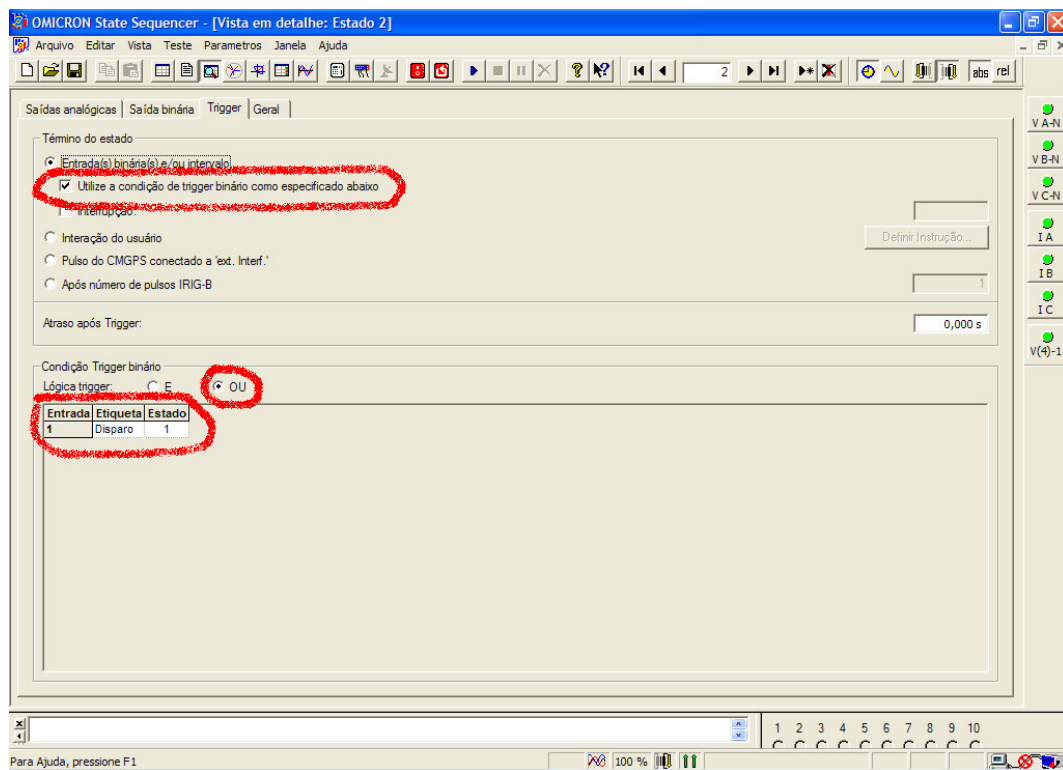


Figura 6.8 – Configuração do término do estado 2 no State Sequencer.

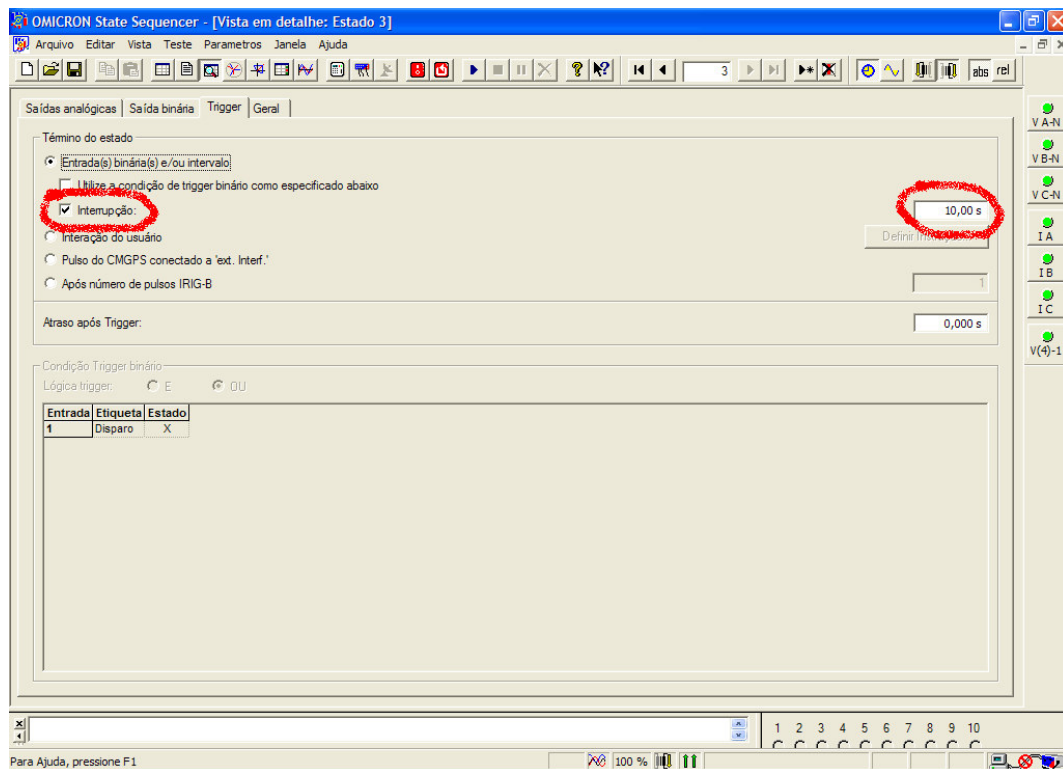


Figura 6.9 – Configuração do término do estado 3 no State Sequencer.

O relé primário foi alimentado pela Omicron CMC 256-6 com as tensões e correntes definidas no estado e foi conectado ainda à caixa de simulação de disjuntores conforme a Figura 6.10. O relé 2 não foi utilizado pois sua operação seria similar à do relé 1.

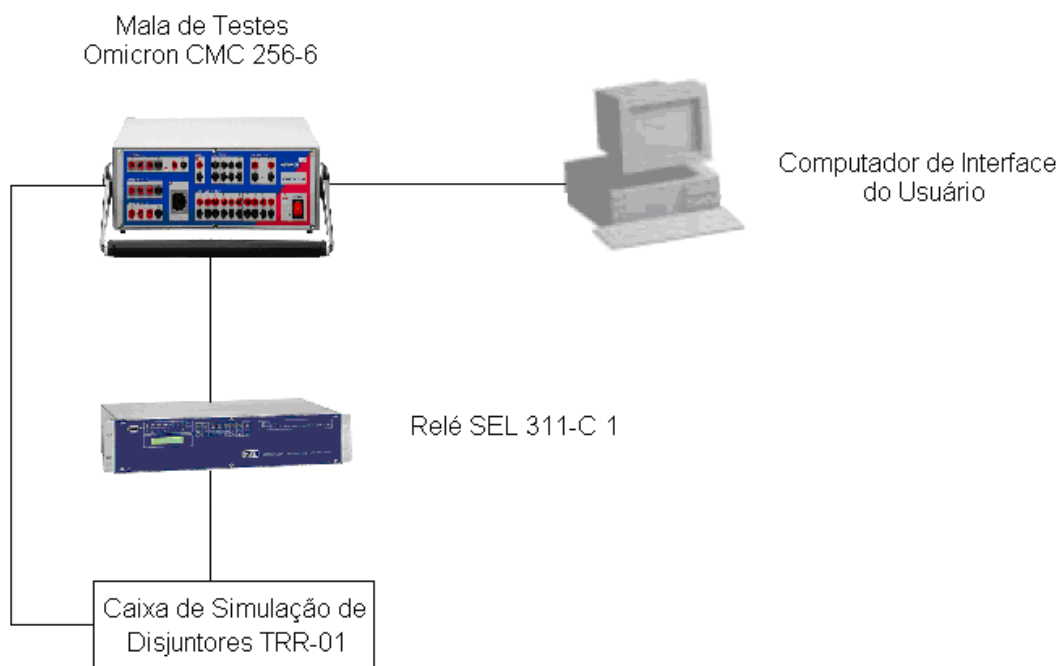


Figura 6.10 – Esquema simplificado do ensaio realizado.

Com a execução do teste, o tempo necessário para a interrupção do fornecimento de corrente pela mala de teste Omicron CMC 256-6 foi de 33,5ms como pode ser visto na Figura 6.11. A oscilografia do ensaio está apresentada na Figura 6.12. Após o fim do segundo estado de simulação, o religamento automático do disjuntor ocorreu em 3,06s conforme a Figura 6.13, valor próximo aos 3s programados.

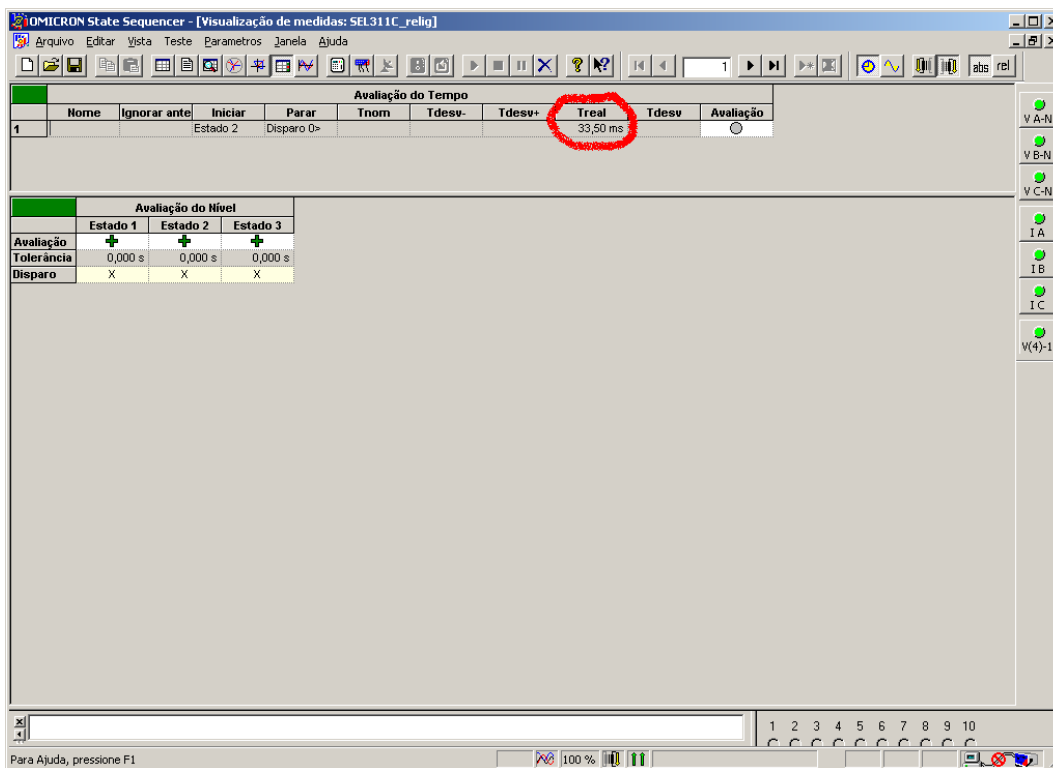


Figura 6.11 – Tempo de duração do segundo estado.

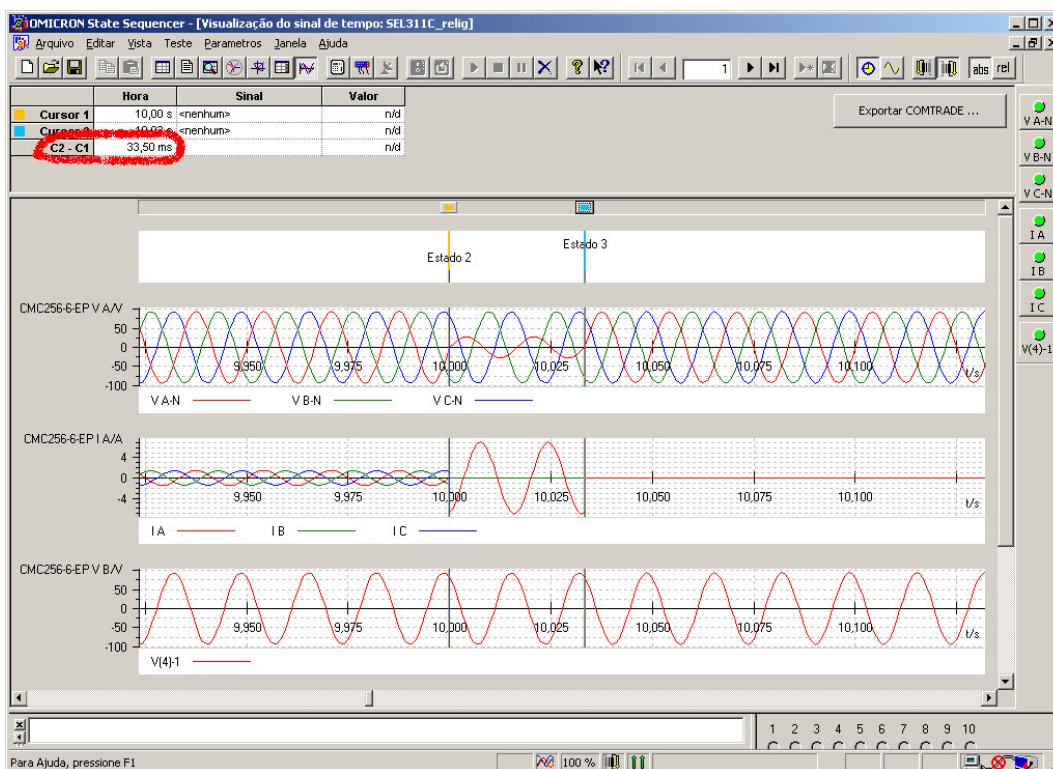


Figura 6.12 – Oscilografia gerada durante o ensaio.



6.13 – Tempo de religamento do circuito.

6.2.2. Operação da Função de Distância com Simulação de Defeito na Segunda Zona Acelerada de Atuação do Relé 1

Este ensaio foi executado da mesma forma que o ensaio anterior, com alteração apenas no valor das tensões das fases no estado 2 e no estado 3. Neste ensaio, a magnitude da tensão decresce a 900mV e as correntes foram aumentadas para 5A defasadas em $-85,25^\circ$ das tensões, resultando em uma impedância monofásica de falta de $0,18\angle 85,25^\circ \Omega$ e no terceiro estado as tensões da linha não são restabelecidas o que impede o religamento de acordo com a Figura 6.14.

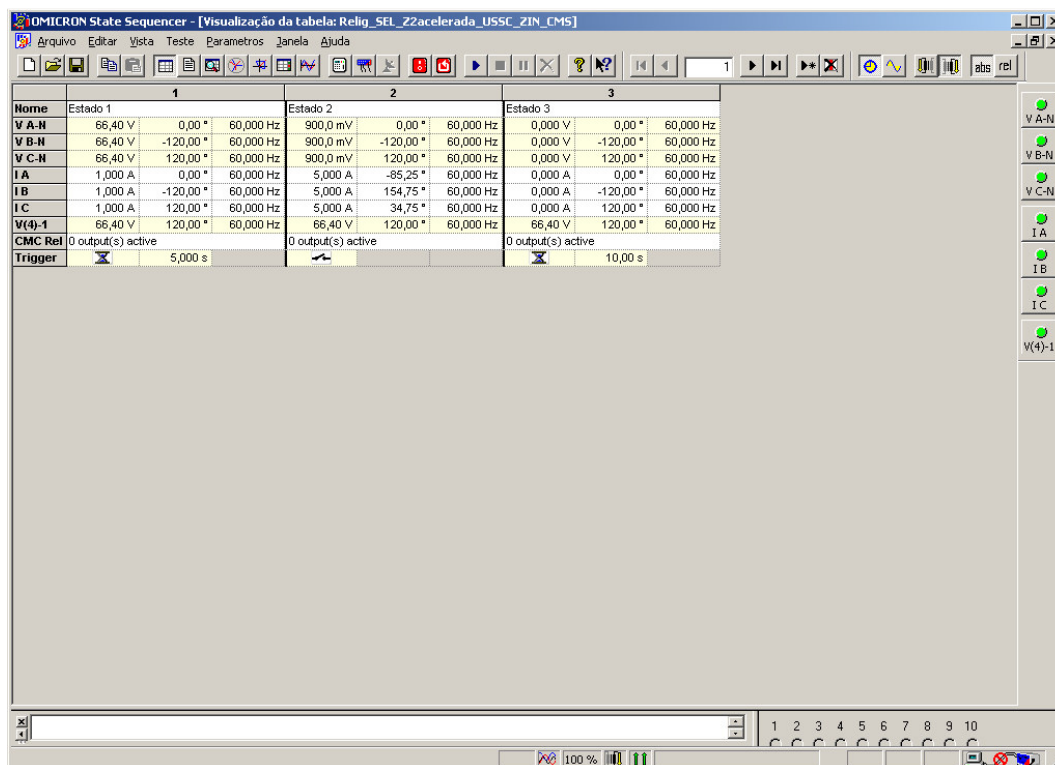


Figura 6.14 – Estados do ensaio da operação da função de distância com simulação de defeito na segunda zona acelerada de atuação do relé 1.

Através da Figura 6.15 e da oscilografia presente na Figura 6.16, obtidas da mala Omicron CMC 256-6, o tempo de atuação da proteção de 76,8ms pode ser observado.

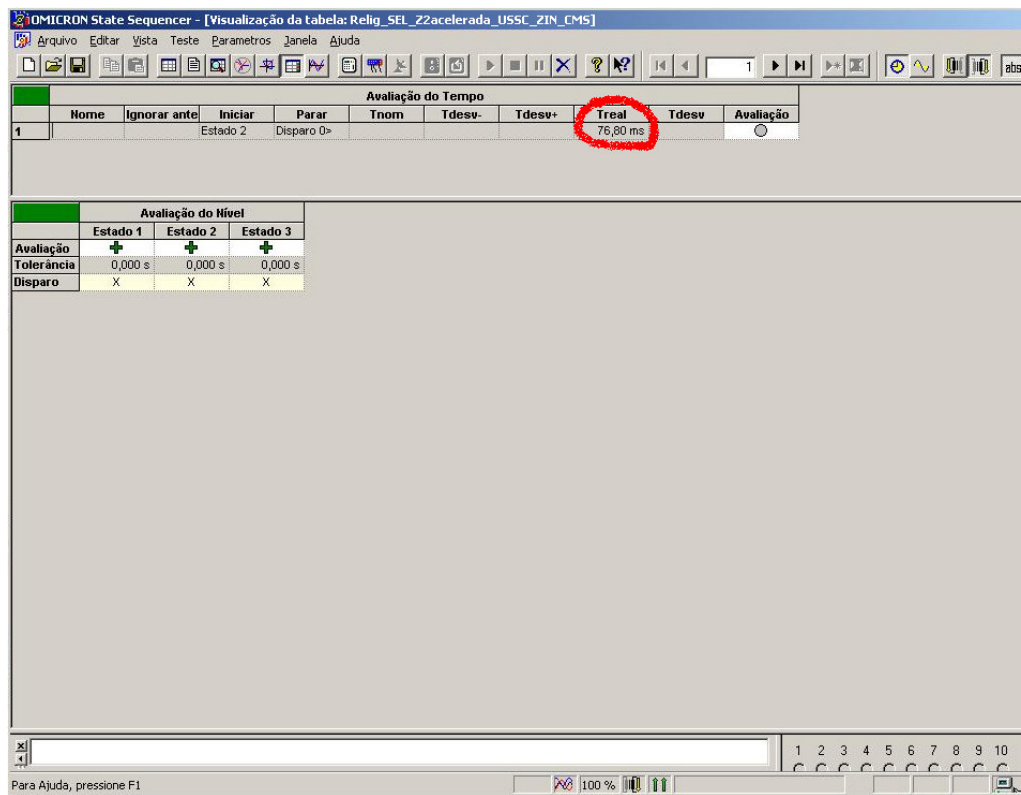


Figura 6.15 – Tempo de duração do segundo estado.

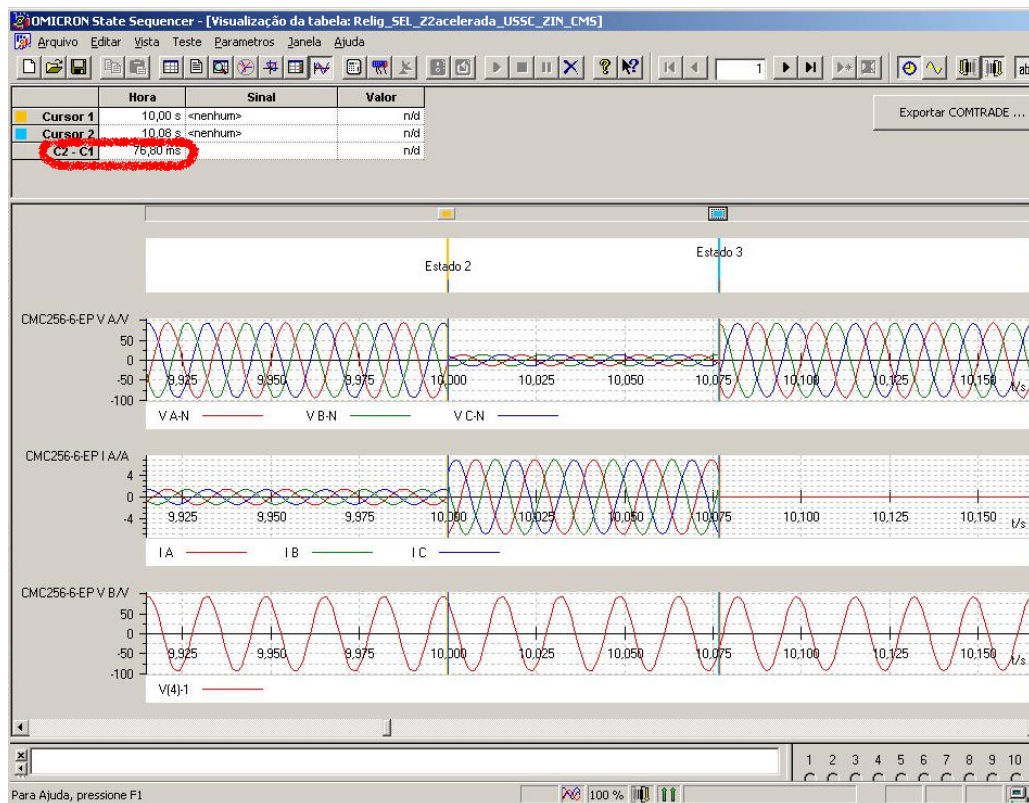


Figura 6.16 – Oscilografia gerada durante o ensaio.

6.2.3. Operação da Função de Sobrecorrente Direcional do Relé 1

Neste ensaio, a situação do segundo estado da mala de teste Omicron CMC 256-6 foi configurada de modo que as tensões aplicadas fossem as mesmas do estado inicial e as correntes fossem para zero, com exceção da fase “A”, onde a corrente foi defasada em $-80,85^\circ$ e seu valor eficaz foi ampliado para 10A. A configuração dos estados de operação pode ser observada na Figura 6.17. Neste ensaio, o religamento também foi bloqueado pela configuração do terceiro estado.

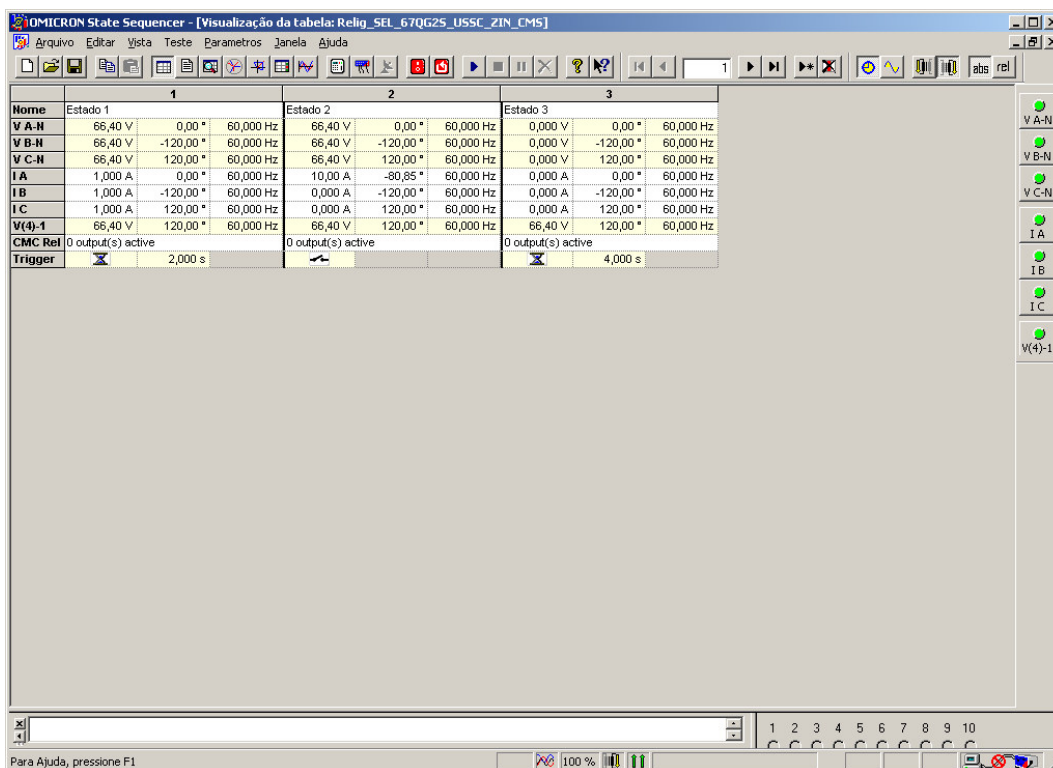


Figura 6.17 – Estados do ensaio da operação da função de sobrecorrente direcional do relé 1.

O tempo decorrido antes da atuação da unidade de sobrecorrente direcional foi 332,8ms conforme a Figura 6.18.



Figura 6.18 – Tempo de duração do segundo estado.

6.2.4. Operação da Função de Proteção Contra Falha de Disjuntor do Relé 1

O ensaio de proteção contra falha de disjuntor foi realizado utilizando apenas dois estados: o inicial que simula as condições normais de operação da linha durante 2s e outro que simula a situação de defeito e é interrompido por um pulso binário proveniente da caixa de simulação de disjuntores como o observado na Figura 6.19.

No primeiro estado foram fornecidas três tensões alternadas de 66,4V e defasada entre si de 120°. Do mesmo modo, foram fornecidas três correntes alternadas de 1A igualmente defasadas.

No segundo estado, as tensões foram reduzidas para 5V e as correntes aumentadas para 10A e atrasadas em 80,2° em relação às tensões.

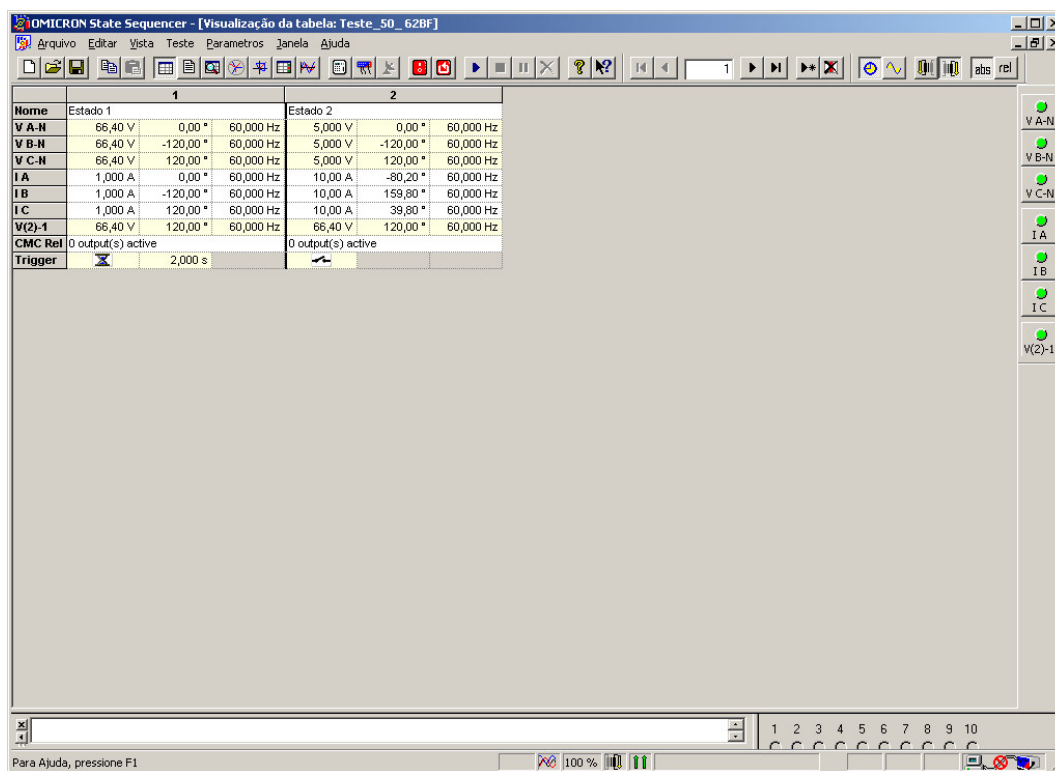


Figura 6.19 – Estados do ensaio da operação da função de proteção contra falha de disjuntor do relé 1.

Foi programada uma temporização de 300ms após o diagnóstico da falha do disjuntor e, assim como o apresentado na Figura 6.20, o relé operou após 331,6ms: 300ms como o programado e 31,6ms do tempo necessário para o fechamento dos contatos de saída do relé.

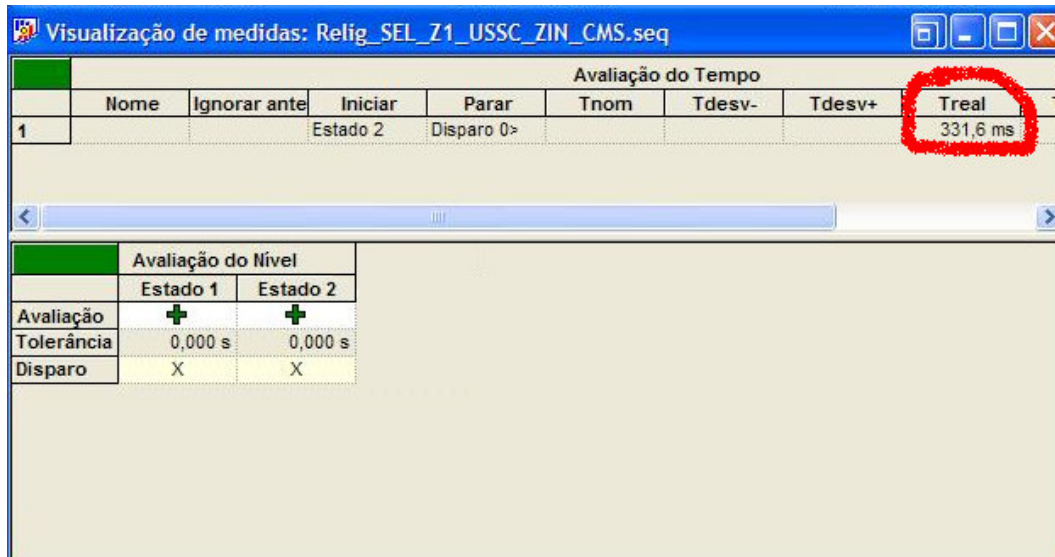


Figura 6.20 – Tempo de duração do segundo estado.

6.2.5. Operação da Função de Distância com Simulação de Defeito na Segunda Zona de Atuação do Relé 1 e da Terceira Zona ou Zona Reversa de Atuação do Relé 2

Este ensaio simula não só a operação da segunda zona de atuação do relé 1, mas verifica a operação também da terceira zona ou zona reversa do equipamento 2. Isto acontece porque a região onde o defeito foi simulado, situada na linha entre as barras “B” e “C” pertence a essas duas zonas.

No segundo estado a magnitude da tensão decresce a 10V e as correntes foram aumentadas para 5A defasadas em -80,2° das tensões de acordo com a Figura 6.21.

Com o início do terceiro estado, as condições iniciais de tensão são restabelecidas, mas não houve religamento pois a falta ocorreu na segunda zona de operação do relé 1.

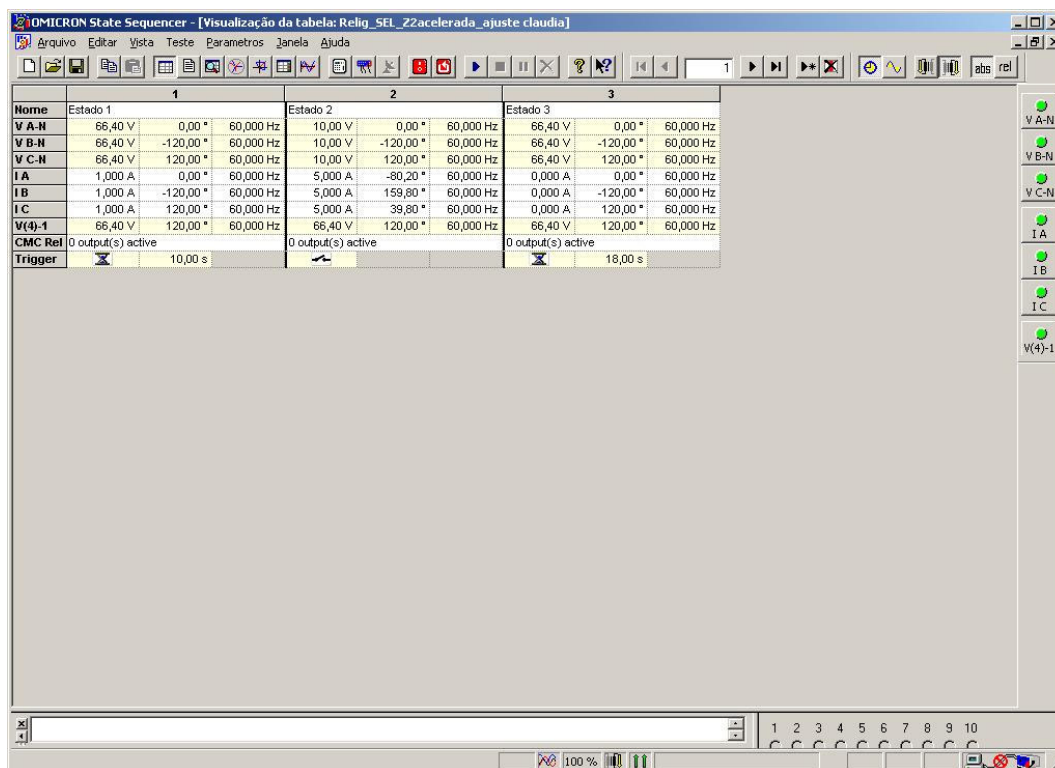


Figura 6.21 – Estados do ensaio da operação da função de distância com simulação de defeito na segunda zona de atuação do relé 1 e terceira zona do relé 2.

O relé 1 foi alimentado pela Omicron CMC 256-6 com as tensões e correntes definidas e o relé 2 foi alimentado com as mesmas tensões mas com os contatos de corrente invertidos, de forma que fosse gerada uma defasagem de 180° em relação às correntes do relé 1, resultando em uma impedância de falta de $2\angle 80,2^\circ \Omega$ para o relé 1 e $2\angle 160,2^\circ \Omega$ para o relé 2. O relé 2 não foi conectado à caixa de simulação de disjuntores, pois se desejava apenas testar o envio do sinal de bloqueio através de um sinalizador que acende um led vermelho ao receber um sinal binário alto em seus terminais de entrada. O esquema simplificado do teste está mostrado na Figura 6.22.

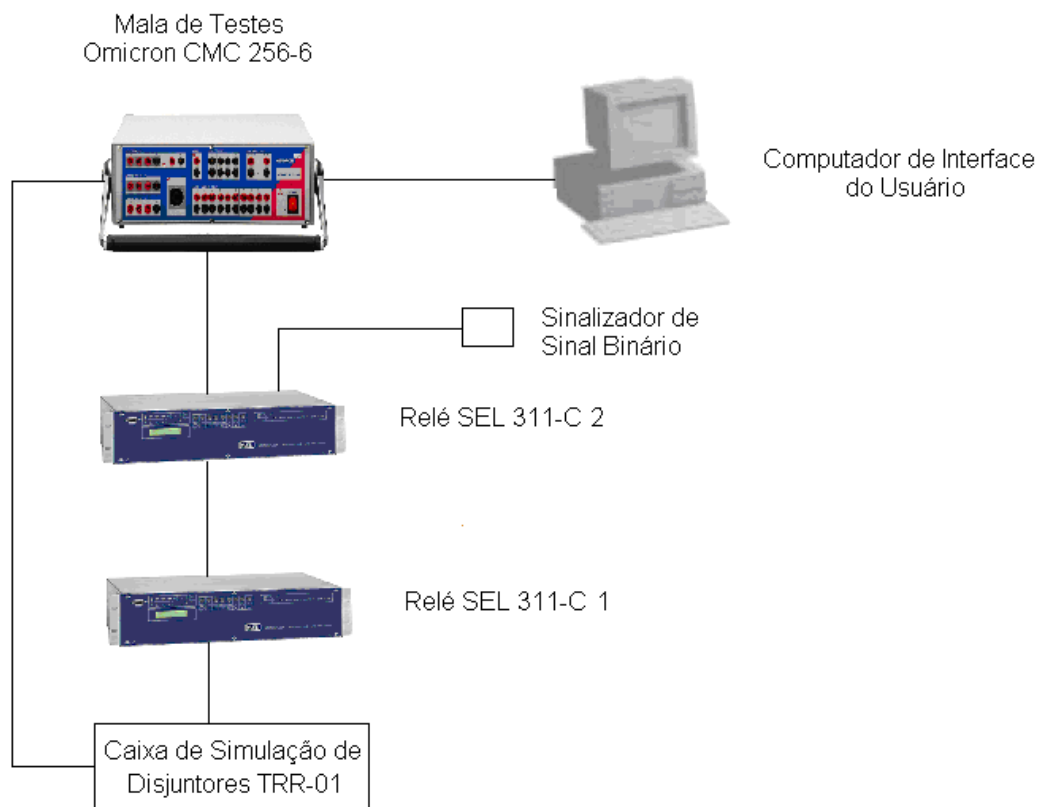


Figura 6.22 – Esquema simplificado do ensaio realizado.

Com a execução do teste, o tempo necessário para a interrupção do fornecimento da mala de teste Omicron CMC 256-6 foi de 327,9ms como pode ser visto na Figura 6.23. A oscilografia do ensaio pode ser também observada através da Figura 6.24 e o led responsável pela sinalização do envio de sinal do relé 2 é mostrado na Figura 6.25.

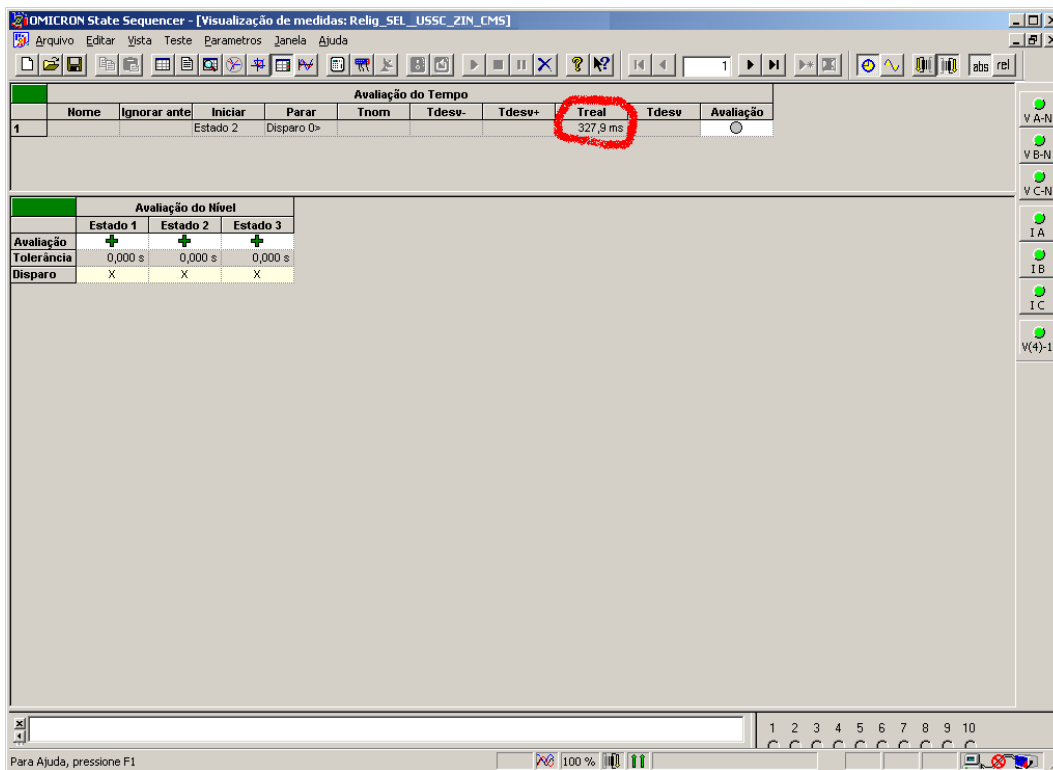


Figura 6.23 – Tempo de duração do segundo estado.

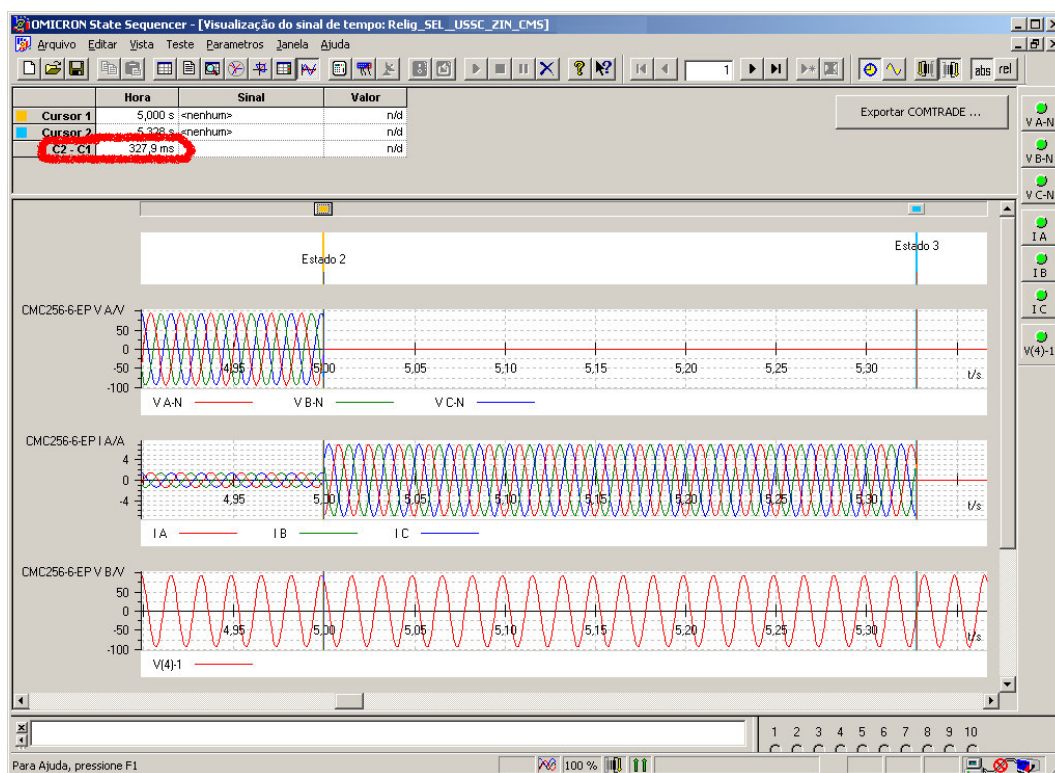


Figura 6.24 – Oscilografia gerada durante o ensaio.



Figura 6.25 – Sinalização positiva para o teste de envio de sinal.

CAPÍTULO 7: CONCLUSÃO

Os relés digitais mostraram-se extremamente eficazes, e sua funcionalidade os destaca como equipamentos cada vez mais importantes aos esquemas de proteção. Todos os testes aqui descritos corresponderam às especificações do fabricante e descreveram brevemente as características principais destes dispositivos, com capacidade instantânea de interrupção de aproximadamente 2 ciclos para frequências de 60Hz.

A possibilidade de coordenar os relés digitais integradamente confere ao projetista as ferramentas necessárias ao desenvolvimento de uma filosofia de proteção seletiva e segura. Através da comunicação com redes de informação e unidades centrais de controle as decisões podem ser tomadas quase que em tempo real, sem que trechos sãos da linha de transmissão sejam desligados indevidamente.

A programação básica do relé SEL 311-C mostrou-se simples, de forma que qualquer usuário com conhecimento no idioma Inglês pode realizá-la.

Conclui-se ainda que a utilização de equipamentos auxiliares como a mala de testes Omicron CMC 256-6 e a caixa Triel TRR-01 é de extrema importância na execução de ensaios em relés de proteção, medidores de qualidade de energia etc. As inúmeras funções destes equipamentos possibilitam a simulação de diversas situações reais, em condições normais de operação ou sobre falta. Através da combinação da ferramenta *State Sequencer* da mala Omicron CMC 256-6 e dos contatos NA da caixa Triel TRR-01, pôde ser simulado o comportamento dos relés perante a abertura de disjuntores e falhas na operação dos mesmos mediante situações de curto-circuito.

Espera-se que futuramente que sejam realizados outros ensaios em relés digitais deste tipo, utilizando outros aplicativos da mala Omicron CMC 256-6 como o *Advanced Transplay* que permite a repetição em laboratório de uma situação real do passado, através de um arquivo de oscilografia gravado durante sua ocorrência.

CAPÍTULO 8: ANEXOS

Tabela 9.1 – Sensibilidade do relé SEL 311-C de acordo com o modelo.

Função	Corrente Nominal do Relé de Acordo com o Modelo (A)	Ajuste	Faixa de Detecção
21 - Fase (4 zonas Mho)	1	Alcance (Ω secundário)	Desligado ou variando de 0,25 a 320,00
		Detecção de Corrente de Falta Fase-Fase Secundária (A)	Variando de 0,10 a 34,00
	5	Alcance (Ω secundário)	Desligado ou variando de 0,05 a 64,00
		Detecção de Corrente de Falta Fase-Fase Secundária (A)	Variando de 0,05 a 170,00
21 - Terra (4 zonas Mho e quadrilaterais)	1	Alcance Mho (Ω secundário)	Desligado ou variando de 0,25 a 320,00
		Alcance Reatância (Ω secundário)	Desligado ou variando de 0,25 a 320,00
		Alcance Resistência (Ω secundário)	Desligado ou variando de 0,25 a 250,00
		Detecção de Corrente de Falta de Fase e Residual Secundária (A)	Variando de 0,10 a 20,00
	5	Alcance Mho (Ω secundário)	Desligado ou variando de 0,05 a 64,00
		Alcance Reatância (Ω secundário)	Desligado ou variando de 0,05 a 64,00
		Alcance Resistência (Ω secundário)	Desligado ou variando de 0,05 a 50,00
		Detecção de Corrente de Falta de Fase e Residual Secundária (A)	Variando de 0,50 a 100,00
50 - Fase (3 níveis)	1	Corrente de Pickup Secundária (A)	Variando de 0,50 a 20,00
	5	Corrente de Pickup Secundária (A)	Variando de 0,25 a 100,00
	Ambos	Tempo de Atraso/Delay (ciclos)	Variando de 0 a 16.000,00
50 - Sequência Negativa e Residual (4 níveis cada)	1	Corrente de Pickup Secundária (A)	Variando de 0,5 a 20,0
	5	Corrente de Pickup Secundária (A)	Variando de 0,25 a 100,00
	Ambos	Tempo de Atraso/Delay (ciclos)	Variando de 0 a 16.000,00

Função	Corrente Nominal do Relé de Acordo com o Modelo (A)	Ajuste	Faixa de Detecção
51 - Fase, Residual e Sequência Negativa	1	Corrente de Pickup Secundária (A)	Variando de 0,10 a 3,20
	5	Corrente de Pickup Secundária (A)	Variando de 0,50 a 16,00
	Ambos	Dial US	Variando de 0,50 a 15,00
		Dial IEC	Variando de 0,05 a 1,00
25	Ambos	Escorregamento de Frequência (Hz)	Variando de 0,005 a 0,500
		Ângulo de Fase (°)	Variando de 0 a 80
81 (6 níveis)	Ambos	Frequência (Hz)	Variando de 41 a 65
		Tempo de Atraso/Delay (ciclos)	Variando de 2 a 16,000

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ARAÚJO, Carlos A. S., CÂNDIDO, José R. R., SOUSA, Flávio C., DIAS, Marcos P., *Proteção de Sistemas Elétricos*, 2ª Edição, Editora Interciência, Light, 2005
- [2] NOTAS DE AULA DE ADESP (Análise de Defeitos em Sistemas de Potência), Professor Alessandro Manzoni
- [3] DECOURT, Pedro C. K., *Facilidades do Programa Anafas para Estudos de Curto-Circuito e Proteção de Sistemas de Energia Elétrica*, Projeto de Graduação, DEE-UFRJ, Junho 2007
- [4] STEVENSON, William D. JR; GRAINGER, J. J. *Power System Analysis*, McGraw-Hill International Editions, Electrical Engineering Series, 1994.
- [5] BORGES, Carmen L. T., *Análise de Sistemas de Potência*, DEE -UFRJ, Março 2005
- [6] CARDOSO, Abílio J. R., *Ensaio das Funções de Sobrecorrente e Distância Utilizando Relé Digital de Proteção e Aplicação de Sinais com Caixa de Teste*, Projeto de Graduação, DEE, Junho de 2009
- [7] KINDERMAN, Geraldo, *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*, Edição do Autor, Florianópolis - SC, 1999
- [8] NOTAS DE AULA DE PROTEÇÃO (Proteção de Sistemas Elétricos de Potência), Professor Sebastião E. M. de Oliveira
- [9] *Schweitzer Engineering Laboratories, Comercial LTDA*, Disponível em <http://www.selinc.com.br/>, Acesso em 11 de Outubro de 2009
- [10] OMICRON TEST UNIVERSE: Teoria e Prática; Apostila treinamento Light, Rio de Janeiro, 2007
- [11] OMICRON TEST UNIVERSE, Catálogo Linha, CM
- [12] *Fonte Trifásica Omicron Procedimentos Especiais*, Procedimentos, GMT-PROT, Light